

\*\*\*\*\*

## THÈSE

Présentée à la Faculté pour obtenir le grade de :

**Docteur**

UFR : Thermique et Mécanique des Fluides

Spécialité : Mécanique des Fluides et Energétique -Télétection

### **Estimation des besoins en eau des cultures dans la région de Tensift AL Haouz : Modélisation, Expérimentation et Télétection**

Par :

**Salah ER-RAKI**

(DESA : Mécanique des Fluides et Energétique)

Soutenue le 02 Mai 2007, devant la commission d'examen :

<b>Président :</b>	<b>S. Khabba</b>	Professeur	Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Maroc
<b>Examineurs :</b>	<b>A. Chehbouni</b>	Directeur de Recherche	Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère, Toulouse, France
	<b>J. P. Garatuza</b>	Professeur	Instituto Tecnológico de sonora, Obregon, Mexique
	<b>N. Guemouria</b>	Professeur	Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Maroc
	<b>F. Jacob</b>	Chargé de Recherche	IRD-UMR-LISAH- supAgro, Montpellier, France
	<b>S. Wahbi</b>	Professeur	Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Maroc
<b>Invité</b>	<b>M. El Amghari</b>	Ingénieur d'état	Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Haouz (ORMVAH), Marrakech, Maroc

***A mes chers Parents***

***A mes frères et mes sœurs***

***A tous ceux qui me sont chers***

## FICHE PRÉSENTATIVE DE LA THÈSE

- Nom et prénom de l'auteur : **M. Salah ERRAKI**
- Intitulé du travail : **Estimation des besoins en eau des cultures dans la région de Tensift  
AL Haouz : Modélisation, Expérimentation et Télédétection.**
- Nom-Prénom des directeurs de thèse :
  - **Chebouni Abdelghani: Directeur de recherche scientifique, CESBIO-UMR 5126  
CNES-CNRS-IRD-UPS bpi 18 Avenue Edouard Belin. 31401 Toulouse Cedex 9-  
France.**
  - **Guemouria Noura: Professeur d'Enseignement Supérieur, Faculté des Sciences  
Semlalia-Marrakech.**
- Unité de Formation et de Recherche:  
**Thermique et Mécanique des Fluides, département de physique, Faculté des Sciences  
Semlalia-Marrakech.**
- Laboratoire où les travaux ont été réalisés :  
**Laboratoire du projet SudMed attaché à l'Institut de Recherche pour le Développement  
(IRD), salle 26, Center Geber, Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad,  
Marrakech.**
- Laboratoires avec lesquels il y a eu collaboration pour ce travail :
  - **Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère (CESBIO), Toulouse, France**
  - **University of Wyoming, Laramie, WY 82071, USA**
  - **Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON), Obregon, Mexico**
  - **Universidad de Sonora (UNISON), Hermosillo, Mexico**
  - **Comisión de Ecología y Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora (CEDES),  
Hermosillo, Mexico**
- Date de commencement de ce travail : **Janvier 2002**
- Rapporteurs autres que l'encadrant (nom, prénom, grade, institution) :
  - **M. Jaime Garatuza, Professeur, Instituto Tecnológico de Sonora, Obregon,  
Mexique;**
  - **M. Frédéric Jacob, Chargé de Recherche, IRD-UMR-LISAH- supAgro,  
Montpellier, France;**
  - **M. Said Wahbi, Professeur, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Maroc**
- Soutien financier

- **Projet SUDMED:** Collaboration entre l'Université Cadi Ayyad (Maroc) et l'Institut de Recherche pour le développement (France). <http://www.irrimed.org/sudmed/>
  - **Projet IRRIMED:** Collaboration entre Université Cadi Ayyad (le Maroc), Centre d'Etudes Spatiale de la Biosphère (CESBIO) et Institut de recherche pour le développement (IRD) (la France), Meteorology and Air Quality Group of the Wageningen University (Pays-bas), The Arab Center for the Studies of Arid zones and Dry lands (la Syrie), Institut National de Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts (la Tunisie) et The Faculty of Agriculture, University of Jordan (Jordanie). ([www.irrimed.org](http://www.irrimed.org))
  - **Projet WATERMED:** Collaboration entre Université Cadi Ayyad (Maroc), Globale Change Unit (Spain), Institut National de Recherche Agronomique (France), RISOE National Laboratory Technical University of Denmark – DTU (Denmark), and National Authority for Remote Sensing and Space Sciences (Egypt). (<http://www.uv.es/ucg/watermed>).
- Ce travail a donné lieu aux résultats suivants (communications, publications,...) :

### **Articles dans des revues internationales à comité de lecture**

1. **Er-Raki, S.,** Chehbouni, A., Guemouria, N., Duchemin, B., Ezzahar, J., Hadria, R., 2007. Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. *Agricultural Water Management*, 87: 41-54.
2. **Er-Raki, S.,** Chehbouni, A., Guemouria, N., Khabba, S., Simonneaux, V., Ouldbba, A., Rodriguez, J.C., Watts, C. Assessment of reference evapotranspiration methods in semi-arid regions: Can weather forecast data be used as alternate of ground meteorological parameters? *Irrigation and Drainage Systems journal (Soumis)*.
3. **Er-Raki, S.,** Chehbouni, A., Guemouria, N., Ezzahar, J., Khabba, S., Boulet, G., Measurement and modelling evapotranspiration of irrigated citrus orchard under drip and flood irrigations. *Plant Biosystems (Soumis)*.
4. **Er-Raki, S.,** Chehbouni, A., Guemouria, N., Ezzahar, J., Boulet, G., Williams, D.G. Application of FAO-56 based single and dual crop coefficients approaches for estimating actual evapotranspiration of olive orchards in a semi-arid region. *En preparation*.
5. Duchemin, B., Hadria, R., **Er-Raki, S.,** Boulet, G., Maisongrande, P., Chehbouni, A., Escadafal, R., Ezzahar, J., Hoedjes, J.C.B., Karrou, H., Khabba, S., Mougenot, B., Olioso, A., Rodriguez, J-C., Simonneaux, V., 2006. Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: on the use of relationship between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management*. 79: 1- 27.

6. Ezzahar J., Chehbouni A., Hoedjes, J.C.B., **Er-Raki S.**, Chehbouni Ah, and J-M Bonnefond, and De Bruin, H.A.R. (2007). The use of the Scintillation Technique for estimating and monitoring water consumption of olive orchards in a semi-arid region, *Agricultural Water Management*, 89,173-184.
7. Simonneux, V., Duchemin, B., Helson, D., **Er-Raki, S.**, Oliosio, A., Chehbouni, A. Using high resolution image time series for crop classification and evapotranspiration estimate over an irrigated area in south Morocco. *International Journal of Remote Sensing(accepté)*
8. Hadria, R., B. Duchemin, A. Lahrouni, S. Khabba, **S. Er-Raki**, G. Dedieu, A. Chehbouni and A. Oliosio, 2006. "Monitoring of irrigated wheat in a semi-arid climate using crop modelling and remote sensing data: Impact of satellite revisit time frequency". *International Journal of Remote Sensing*. 27: 1093-1117.
9. Williams, D. G, W. Cable, K. Hultine, J.C.B. Hoedjes, E.A. Yopez, V. Simonneux, **S. Er-Raki**, G. Boulet, H.A.R. de Bruin, A. Chehbouni, O.K. Hartogensis, and F. Timouk. 2004. Evapotranspiration components determined by stable isotope, sap flow and eddy covariance technique. *Agricultural and Forest Meteorology*, 125:241-258.
10. Duchemin, B., Hagolle O., Mougnot B., Simonneux V., Benhadj I., Hadria R., Ezzahar J., Hoedjes J., Khabba S., Kharrou M.H, Boulet G., Dedieu G., **Er-Raki S.**, Escadafal R., Oliosio A., Chehbouni A.G.. Agrometeorological study of semi-arid areas: an experiment for analysing the potential of FORMOSAT-2 time series of images in the Tensift-Marrakech plain. *International Journal of Remote sensing (accepté)*.
11. Ezzahar J., Chehbouni A., Hoedjes J.C.B., **Er-Raki S.**, Duchemin B. and Ah. Chehbouni. The use of the Scintillation Technique for estimating evapotranspiration ET over several agricultural fields in semi-arid region. *Plant Biosystems (Soumis)*.
12. Chehbouni, A., Escadafal, R., Boulet, G., Duchemin, B., Simonneux, V., Dedieu, G.,Mougnot, B., Khabba, S., Kharrou, H., Merlin, O., Chaponnière, A., Ezzahar, J., **Er-Raki, S.**, Hoedjes, J., Hadria, R., Abourida, H., Cheggour, A., Raïbi, F., Hanich, L., Guemouria, N., Chehbouni, Ah., Oliosio, A., Jacob, F., Sobrino, J., 2007. The Use of Remotely Sensed data for Integrated Hydrological Modeling in Arid and Semi-Arid Regions: the SUDMED Program. *International Journal of Remote sensing (accepté)*.

## **Communications dans des colloques nationaux et internationaux**

1. **Er-Raki, S.**, Guemouria, N., Chehbouni, G., Fachtali, B., Ezzahar, J., Hadria, R. and Chehbouni, A. Measurement and modelling evapotranspiration of irrigated citrus orchard under drip and flood irrigations. *3rd International Conference on Water Resources in Mediterranean basin: WATMED 3", Lebanon, Tripoli, 1-3 November 2006*.
2. **Er-Raki, S.**, Chehbouni, G., Guemouria, N., Duchemin, B., Ezzahar, J., Hadria, R. and BenHadj, I., 2006, Driven FAO-56 dual crop coefficient approach with remotely-sensed data for estimating water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. *Second Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*, Ed. José A. Sobrino, Servicio de Publicaciones, Universitat de Valencia, Valencia, 2006, pp. 431-636.

3. **Er-Raki, S.,** Chehbouni, G., Guemouria, N., Ezzahar, J., Hadria, R., Duchemin, B., Boulet, G. and Chehbouni, A. Developing crop coefficients for olive, wheat and orange growing in semi arid region (Marrakech, Morocco). *Congrès International sur la Gestion Intégrée des Ressources en Eaux et Défis du Développement Durable (GIRE3D)*, Marrakech, 23, 24 et 25 Mai 2006.
4. **Er-Raki, S.,** Guemouria, N., Chehbouni, G., Ezzahar, J., Hadria, R. and Chehbouni, A. Assessing water consumption of olive orchards in a semi arid region (Marrakech, Morocco). *1<sup>er</sup> Congrès national sur l'Amélioration de la Production Agricole (APA), Settat (Maroc)*, 16-17 Mars 2006.
5. **Er-Raki, S.,** Chehbouni, G., Guemouria, N., Ezzahar, J., Chehbouni, A., and Hadria, R. Détermination des besoins en eau des cultures de la région de Tensift Al Haouz. *2<sup>ème</sup> Congrès Méditerranéen "RESSOURCES EN EAU DANS LE BASSIN MEDITERRANEEN : WATMED 2"*, Marrakech (Maroc), 14 -17 Novembre 2005.
6. **Er-Raki, S.,** Chehbouni, G., Guemouria, N., Ezzahar, J., Chehbouni, A., and Hadria, R. The feasibility of sing FAO-56 model to estimate olive orchards evapotranspiration in semi arid region. *6<sup>ème</sup> Conférence Internationale. European Water Resources Association (EWRA2005)*, 7-10 Septembre 2005, Menton, France.
7. **Er-Raki, S.,** Guemouria, N., Chehbouni, G., Ezzahar, J., Hadria, R. and Chehbouni, A. Using of the FAO-56 model for estimating actual evapotranspiration of olives orchards in semi arid region. *Congrès international sur les Méthodes d'Approximation et Modélisation numérique en Environnement et Ressources Naturelles (MAMERN 2005)*. 09-11 Mai 2005, Oujda, Maroc.
8. **Er-Raki, S.,** Chehbouni, G., Guemouria, N., Ezzahar, J., Duchemin, B., Hadria, R., Boulet, G., Lakhal, A., Chehbouni, A. and Rodriguez, J.C. The feasibility of using remotely sensed measures of vegetation index to estimate crop water requirement of winter wheat in semi arid region (Marrakech, Morocco). *Integrated Water Resources Research and Development in southeastern Morocco. International conference*. Ouarzazate, Maroc, 01 - 02 April 2004.
9. **Er-Raki, S.,** Chehbouni, G., Guemouria, N., Ezzahar, J., Williams, D.G., Boulet, G., Duchemin, B., Hadria, R., Lakhal, A. and Rodriguez, J.C. Sap-flow-scaled transpiration responses to climate and soil moisture in an olive (*olea europaea* L.) orchard in Marrakech, Morocco. *EGU 1st General Assembly Nice*, France, 25 - 30 April 2004.
10. **Er-Raki, S.,** Chehbouni, G., Guemouria, N., Ezzahar, J., Hadria, R., Lakhal, A., Boulet, G., Duchemin, B. and Rodriguez, J.C. Measurement of evapotranspiration and development of crop coefficients of olive (*olea europaea* L.) orchards in semi arid region (Marrakech, Morocco). *La modernisation de l'agriculture irriguée dans les pays du Maghreb*, 19-21 Avril 2004 Rabat. Maroc.

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu mes directeurs de thèse, Monsieur Ghani Chehbouni, directeur de recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), et Madame Noura Guemouria, professeur à la Faculté des Sciences Semlalia, à la fois pour leurs patiences et leurs disponibilités, leurs suivis attentifs et leurs conseils avisés.

Je remercie aussi Monsieur Ghani pour tous les efforts qu'il a faits pour créer le projet SudMed au sein duquel j'ai réalisé ce travail multidisciplinaire et enrichissant dans des meilleures conditions. Je remercie également les agents de l'Institut de Recherches pour le Développement, pour leur financement de ce projet. Je remercie en particulier Monsieur Jean-Claude Menaut, Directeur du CESBIO (Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère) et Monsieur Richard Escadafal, pour la coordination du projet. Merci aussi à Messieurs Sadik Errouane et Ahmed Chehbouni, qui ont assuré la coordination du projet SudMed au Maroc.

Je remercie les personnes qui m'ont fait l'honneur de participer au jury de thèse, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail: Monsieur Saïd Khabba, pour en avoir accepté la présidence; les rapporteurs: Monsieur Jaime Garatuza malgré la barrière "linguistique" et pour l'effort qu'il a fait pour se déplacer de Mexique au Maroc, Messieurs Frédéric Jacob et Saïd Wahbi pour les remarques enrichissantes qu'ils m'ont apportées. Je remercie aussi Monsieur El Amghari qui a enrichi le débat par ses remarques pratiques en tant qu'Ingénieur D'Etat à L'ORMVAH.

J'adresse aussi mes remerciements à toutes les personnes qui, de près comme de loin, ont contribué à ce travail que ce soit par leur participation ou leur encouragement. Merci à Aahd Abourida, Iskander BenHadj, Gilles Boulet, Aouatif Cheggour, Benoit Duchemin, Jamal Ezzahar, Rachid Hadria, Lhoucine Hanich, Dorian Helson, Joost Hoedjes, Abdenacer Kamil, Mohamed Kasbani, Laarbi Lahmadi, Abderrahmane Lahrouni, Abderrahim Lakhal, Jerome Metral, Bernard Mougnot, Fatima Raïbi, Vincent Simonneaux, Frank Timouk et Dave Williams.

Mes remerciements vont aussi aux agents de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Haouz (ORMVAH) pour leur collaboration, leurs discussions et pour les différentes informations fournies. Je remercie aussi tous les gérants des exploitations qui nous

ont donné l'accès de faire les différentes expériences dans leurs fermes: olivier d'Agdal du Domaine Royal, blé du secteur irrigué R3 (Sidi Rahal) et les orangers du Saada.

Je tiens également à remercier Messieurs Julio-Cesar Rodriguez, Chris Watts et Jaime Garatuza, Chercheurs à CEDES, UNISON et ITSON, Mexico, pour l'accueil qu'il m'ont réservé et de l'excellence de leur collaboration durant mon séjour au Mexique. Gracias por todos!!!!. J'adresse mes remerciements aussi à Madame Florence et la niña Naila pour leurs accueils si chaleureux à Mexico.

Enfin j'exprime toute mon affection et ma gratitude à ma famille (mes parents, mes frères et mes sœurs.....) pour sa patience et son soutien indéfectible. Un énorme merci pour mes amis qui ont su me supporter.

# RESUME

## **Estimation des besoins en eau des cultures dans la région de Tensift AL Haouz : Modélisation, Expérimentation et Télédétection**

Cette étude intervient dans le cadre du projet SudMed qui a pour objectif d'étudier et de modéliser le fonctionnement des ressources hydro-écologiques dans le bassin versant du Tensift (Marrakech, Maroc). Ce projet est mené conjointement par une équipe de chercheurs de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), et par la Faculté des Sciences Semlalia (Université Cadi Ayyad, Marrakech).

L'objectif du travail est de développer des méthodologies permettant de combiner un modèle de flux de surface et des mesures satellites pour estimer les besoins en eau des cultures dans une région semi-aride (Tensift Al Haouz). L'approche climatique basée sur la méthode FAO-56 faisant appel aux coefficients cultureux a été utilisée. La détermination de ces coefficients adaptés aux cultures dans cette région est nécessaire pour le pilotage de l'irrigation. Dans cet objectif, les principales cultures présentes dans la région à savoir le blé, l'olivier et l'oranger ont été suivis expérimentalement.

La démarche suivie repose sur une étude expérimentale et une étude théorique basée sur la modélisation de transfert d'eau et d'énergie entre le sol, la végétation et l'atmosphère. Le modèle utilisé est celui de la FAO-56 (Allen et al., 1998); considéré comme un modèle simple et opérationnel. L'étude expérimentale repose sur plusieurs campagnes de mesures terrain. Ces dernières visent à déterminer les paramètres d'entrée du modèle, à calibrer et à valider le modèle FAO-56 à deux approches (l'approche simple et double) pour les couverts dominants de la zone d'étude (blé, olivier et oranger). Les résultats montrent que le modèle FAO-56 a permis d'estimer d'une façon acceptable les besoins en eau des cultures malgré sa simplicité.

Comme l'approche à coefficient cultural double du modèle FAO-56 permet de calculer séparément l'évaporation du sol et la transpiration de la végétation, nous avons essayé de valider cette partition du flux d'évapotranspiration à l'aide des mesures de la transpiration par la technique du flux de la sève pour des couverts arborés notamment l'olivier. Cette partition nous a permis aussi de quantifier les pertes en eau par évaporation du sol liées à la technique d'irrigation gravitaire. Une quantité importante d'eau se perd par

évaporation du sol (30% de l'irrigation), qui peut être économisée par un choix judicieux de la technique d'irrigation (goutte à goutte par exemple).

Au niveau de l'application de la télédétection spatiale, l'utilisation combinée de données terrain et de données satellite à haute résolution (SPOT et LANDSAT) a fait l'objet de la spatialisation du modèle FAO-56 à coefficient cultural double. Selon ce modèle, deux paramètres sont nécessaires à spatialiser afin de produire des cartes des besoins en eau. Il s'agit de l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  et le coefficient cultural  $K_c$ . La spatialisation de  $ET_0$  a été faite en utilisant les données climatiques (Température, Humidité, Vent et Rayonnement global) issues du modèle météorologique ALADIN de la Direction de la Météorologie Nationale. Pour le coefficient cultural  $K_c$ , l'équation établie à partir des données acquises au sol entre  $K_c$  et l'indice de végétation (NDVI : Normalized Difference Vegetation Index) accessible par les données de la télédétection a été appliquée aux images satellitaires. Les résultats de la spatialisation montrent que le modèle FAO-56 a permis d'estimer d'une façon raisonnable les besoins en eau de la culture du blé à l'échelle d'un secteur test de 9 km<sup>2</sup>.

**Mots clés :** Modèle FAO-56, besoin en eau des cultures, évapotranspiration, coefficient cultural, expérimentation, télédétection, blé, olivier, agrume, Tensift Alhaouz.

## ABSTRACT

### **Water consumption estimates for agricultural crops in the Tensift AL Haouz region: Modelling, Experiments and Remote Sensing**

This study was conducted within the Framework of the Sudmed project. The latter is an applied study that deals with the characterization, modelling and forecasting of hydro-ecological resources in the semi-arid region of Tensift Al Haouz, Marrakech, Morocco. The Sudmed project is carried out jointly by a team of researchers of the Institute of Research for the Development (IRD), and by the Faculty of Science Semlalia (Cadi Ayyad University, Marrakech).

The objective of our study is to develop a methodology allowing to combine a model of surface flux and remote sensing data in order to estimate crop water requirement in the semi arid region of the Tensift Al Haouz. The FAO-56 model based on the concepts of crop coefficients  $K_c$  and reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) was used. Derivation of the localized  $K_c$  for the dominant crops (wheat, olives and citrus) in the Tensift Al Haouz is advisable for proper irrigation management.

The method adopted here is based on the experimental and the theoretical study on modeling of Soil Vegetation Atmosphere Transfer. The simple and operational model named FAO-56 (Allen et al. 1998) was used. In order to calibrate and validate this model, several experiments measurements was made in three fields of study: wheat, olives and citrus. The results showed that he FAO-56 model gave accurate estimates of crop water requirement in this semi-arid region.

Since the dual approach predicts separately soil evaporation and plant transpiration, an attempt was made to validate this partitioning of evapotranspiration with the measurements of sap flow in the olive orchard. This partitioning allowed quantifying the lost of the water by soil evaporation due to the flooding irrigation. A large quantity of water is lost by direct soil evaporation (30% of the irrigation), which can be saved by a judicious choice of the technique of irrigation (drip irrigation for example)

At large scale, we combined between the ground measurements and remote sensing data acquired by high spatial resolution (SPOT and Landsat) in order to spatial the FAO-56 dual approach. Following this approach, two parameters must be estimated in order to get the maps of crop water requirements. The first parameter is the reference evapotranspiration  $ET_0$ ,

which it was estimated spatially by using the meteorological data (temperature, humidity, wind speed and solar radiation) provided by the ALADIN model used by the national meteorological services from Morocco. The second parameter is the crop coefficient  $K_c$ , which can be estimated by converting the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) maps to the  $K_c$  by using the relationship established between two parameters at ground measurements. The results showed that the FAO-56 model provides accurate estimates of wheat water needs over an irrigated area of 9 km<sup>2</sup>.

**Keywords:** FAO-56 model, crop water requirements, evapotranspiration, crop coefficient, experiment, remote sensing, wheat, olives, citrus, Tensift Al Haouz.

## ملخص الرسالة

### تحديد الاحتياجات المائية للزراعات السائدة بمنطقة تانسيفت الحوز باستعمال نماذج معلوماتية، تجارب ميدانية و تقنية الاستشعار عن بعد

أجريت هذه الدراسة في إطار المشروع العلمي "Sudmed" الذي يهدف إلى دراسة الموارد البيئية لمنطقة تانسيفت الحوز. يندرج هذا المشروع في إطار التعاون القائم بين المعهد الفرنسي للأبحاث و التنمية (IRD) و كلية العلوم السملا لية مراكش (جامعة القاضي عياض). الهدف الأساسي من هذه الدراسة هو استعمال طرق جديدة تعتمد على نماذج معلوماتية و تقنية الاستشعار عن بعد من أجل تحديد الاحتياجات المائية للزراعات السائدة بمنطقة تانسيفت كالمح و الزيتون و الحوامض. من أجل هذا تم استعمال نموذج منظمة الزراعة و التغذية رقم 56 (FAO-56) الذي يعتمد على المعاملات الزراعية المستعملة في برمجة السقي.

تعتمد المنهجية المتبعة من أجل تحقيق الأهداف المتوخاة على دراسة نظرية و دراسة ميدانية. يكمن العمل النظري في نمذجة انتقال الماء والطاقة بين التربة، النبات و الجو. أما الدراسة التجريبية فتعتمد على عدة أعمال ميدانية تهدف إلى استخلاص المعطيات من أجل معايرة مدى صلاحية النموذج FAO-56. و قد بينت النتائج المحصل عليها أن هذا النموذج يمكن من تحديد الاحتياجات المائية للزراعة بطريقة مقبولة.

لقد حاولنا أيضا تقييم كميات المياه الضائعة نتيجة طريقة الري التقليدية باستعمال طريقة قياس التعرق عند الزيتون بواسطة تقنية تدفق الخندق. و قد أثبتت هذه الدراسة أن حوالي 30% من كمية ماء السقي تضيع بشكل عشوائي عن طريق التبخر المباشر قبل وصولها إلى النبتة. وهذا راجع إلى طريقة الري المتبعة التي يمكن تعويضها بطريقة عصرية كالتنقيط مثلا. كما بينت هذه الدراسة أيضا مدى صلاحية نموذج FAO-56 ذي معامل زراعي مزدوج للقيام بحساب منفصل لتبخر التربة من جهة و تعرق النباتات من جهة أخرى.

على مستوى تطبيق تقنية الاستشعار عن بعد، تم مزج المعطيات المستخلصة من الحقل و المعطيات الملتقطة عن طريق الأقمار الاصطناعية ذات دقة عالية (SPOT و LANDSAT) من أجل تمييز نموذج FAO-56 ذي معامل زراعي مزدوج. حسب هذا النموذج يجب تمييز معاملين من أجل الحصول على خرائط الاحتياجات المائية. المعامل الأول هو التبخر-التعرق المرجعي ( $ET_0$ ) و المعامل الثاني هو المعامل الزراعي (Kc). تم تمييز  $ET_0$  عن طريق استعمال المعطيات المناخية (الإشعاع، دراجة الحرارة، الرطوبة و سرعة الرياح) المحصل عليها من نموذج ALADIN الذي تستعمله الأرصاد الجوية الوطنية من أجل التوقعات المناخية. أما فيما يتعلق بتمييز المعامل الزراعي Kc، تم استعمال علاقة بين هذا المعامل و معامل آخر يمكن استخلاصه من معطيات الاستشعار عن بعد، ألا وهو NDVI. هذه العلاقة تم تحديدها اعتمادا على معطيات الحقل، و تم تطبيقها على معطيات الأقمار الاصطناعية. و قد بينت النتائج المحصل عليها أن نموذج FAO-56 ذا معامل زراعي مزدوج يمكن من حساب الاحتياجات المائية لزراعة القمح على مستوى منطقة سقوية تقدر ب 9 كلم<sup>2</sup>.

**الكلمات المفاتيح:** نموذج FAO-56، الاحتياجات المائية للنباتات، التبخر-التعرق، معامل زراعي، أعمال ميدانية، استشعار عن بعد، قمح، زيتون، حوامض، منطقة تانسيفت الحوز.

# Sommaire

RESUME.....	IX
ABSTRACT .....	XI
ملخص الرسالة.....	XIII
INTRODUCTION GENERALE.....	1
<b>CHAPITRE 1 : BESOINS EN EAU DES CULTURES .....</b>	<b>5</b>
1.1 INTRODUCTION.....	6
1.2 LA CULTURE DE BLE .....	6
1.3 LA CULTURE DE L'OLIVIER .....	8
1.4 LES AGRUMES.....	9
1.5 BESOINS EN EAU DES CULTURES : DEFINITION ET MODELISATION.....	11
1.6 APPORT DE LA TELEDETECTION SPATIALE POUR L'ESTIMATION DES BESOINS EN EAU DES CULTURES .....	14
<b>CHAPITRE 2 : MODELE ET DONNEES EXPERIMENTALES .....</b>	<b>18</b>
2.1 PRESENTATION DU PROJET SUDMED .....	19
2.2 MODELE FAO-56 .....	20
2.2.1 L'évapotranspiration de référence ( $ET_0$ ).....	21
2.2.2 Le coefficient cultural ( $K_c$ ) .....	22
2.2.3 Le coefficient du stress hydrique ( $K_s$ ).....	26
2.2.4 Relation $K_{cb}$ -NDVI et $f_c$ -NDVI.....	29
2.3 DONNEES EXPERIMENTALES.....	29
2.3.1 Présentation de la région d'étude: bassin versant du Tensift Al Haouz.....	30
2.3.2 Le dispositif expérimental.....	34
<b>CHAPITRE 3 : APPLICATION DU MODELE FAO-56 POUR ESTIMER LES BESOINS EN EAU DE TROIS CULTURES DOMINANTES (BLE, OLIVIER ET ORANGER) DANS LE BASSIN DE TENSIFT AL HAOUZ.....</b>	<b>43</b>
3.1 INTRODUCTION.....	44
3.2 APPLICATION DU MODELE FAO-56 POUR ESTIMER LES BESOINS EN EAU DU BLE.....	44
3.2.1 Comparaison de $f_c$ et $K_{cb}$ estimés par les trois méthodes.....	45
3.2.2 Comparaison de l'évapotranspiration estimée par les trois méthodes.....	48
3.3 APPLICATION DU MODELE FAO-56 POUR ESTIMER LES BESOINS EN EAU DE L'OLIVIER .....	52
3.3.1 Évapotranspiration de Référence $ET_0$ .....	52
3.3.2 Évapotranspiration et coefficient cultural.....	53
3.3.3 Partition de l'évapotranspiration par l'approche à coefficient cultural double .....	58
3.3.4 Efficience de l'irrigation gravitaire.....	60
3.4 APPLICATION DU MODELE FAO-56 POUR ESTIMER LES BESOINS EN EAU DE L'ORANGER .....	63
3.4.1 Évapotranspiration de référence $ET_0$ .....	63
3.4.2 Évapotranspiration et coefficient cultural.....	63
3.4.3 Évaluation des pertes d'eau par évaporation du sol due à l'irrigation gravitaire .....	68
3.5 CONCLUSIONS .....	69
<b>CHAPITRE 4 : SPATIALISATION DU MODELE FAO-56 A PARTIR DES DONNEES DE LA TELEDETECTION .....</b>	<b>71</b>
4.1 INTRODUCTION.....	72
4.2 SPATIALISATION DU MODELE FAO-56 A PARTIR DES DONNEES SATELLITES.....	72
4.2.1 Distribution spatiale de l'évapotranspiration de référence : $ET_0$ .....	73
4.2.2 Carte des besoins en eau du blé ( $ET_c$ ).....	76
4.2.3 Validation des résultats de la spatialisation à l'échelle parcellaire.....	82
4.3 CONCLUSION .....	84
<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>86</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>91</b>

<b>ANNEXE A : METHODES UTILISEES POUR L'ESTIMATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION DE REFERENCE: <math>ET_0</math></b> .....	<b>104</b>
<b>ANNEXE B : DESCRIPTION DE LA METHODE DE MESURE DE FLUX DE LA SEVE: HRM (HEAT RATIO METHOD)</b> .....	<b>109</b>

## Liste des figures

Figure 1. 1. Schéma de calcul des besoins en eau des cultures ou de l'évapotranspiration maximale $ET_c$ selon la méthode de la FAO- 56 (Allen et al., 1998). .....	12
Figure 2. 1. Trois types d'évapotranspiration estimés par le modèle FAO-56 : Evapotranspiration de référence ( $ET_0$ ), évapotranspiration sous les conditions standard ( $ET_c$ ) et sous les conditions réelles ( $ET_c$ adj) (Allen et al., 1998). .....	21
Figure 2. 2. Courbe représentative du coefficient cultural simple (Allen et al., 1998). .....	23
Figure 2. 3. Organigramme de calcul d'évapotranspirations maximale $ET_c$ et réelle ETR par les deux approches du modèle FAO-56 (Allen et al., 1998). .....	28
Figure 2. 4. Localisation du bassin versant du Tensift. La figure ci-dessous est une image composite couvrant l'ensemble du bassin versant du Tensift (capteur Thematic Mapper, satellite Landsat). Le trait bleu limite le bassin versant. ....	30
Figure 2. 5. Localisation de la plaine du Haouz ainsi que les trois sites d'étude : Agdal, R3 et Saada .....	31
Figure 2. 6. Le site d'olivier d'Agdal (site Sud et site Nord) vu par une image Quickbird. ....	35
Figure 2. 7. La technique d'irrigation des oliviers d'Agdal (gravitaire). ....	35
Figure 2. 8. Localisation de trois champs de blé (limités par des rectangles blancs) suivis durant la saison agricole 2002/03. La station météorologique (triangle noir) et les tours de mesure de flux (disques noirs) sont présentées. Des mesures de reflectances à l'aide d'un radiomètre portable multispectral (Crop Scan, MSR87) ont été faites le long des trajets (lignes solides et noires) sur chaque 10 mètres. ....	37
Figure 2. 9. a. Photographie du site d'olivier avec la tour des instruments. ....	39
Figure 2. 9. b. Photographie du site du blé avec la tour des instruments. ....	39
Figure 2.9. c. Photographie du site d'oranger avec la tour des instruments. ....	39
Figure 2. 10. La mesure des reflectances du blé à l'aide d'un radiomètre portable multi spectral (Crop Scan, MSR87). ....	41
Figure 2. 11. La mesure du flux de sève par la méthode HRM (Heat Ratio Method). ....	41
Figure 3. 1. Évolution de la fraction du couvert $f_c$ pour les trois champs de blé, calculée par les trois méthodes: méthode 1 (ligne solide épaisse), méthode 2 (ligne discontinue) et méthode 3 (ligne solide mince). Les valeurs de $f_c$ dérivées à partir des photos hémisphériques (cercles) et celles dérivées à partir de NDVI (losange) sont présentées. A noter que dès que $f_c$ atteint son maximum, il reste constant et égal à ce maximum. DAS signifie la date after la semis. ....	46
Figure 3. 2. Évolution du coefficient cultural de base $K_{cb}$ pour les trois champs de blé, calculée par les trois méthodes: méthode 1 (ligne solide épaisse), méthode 2 (ligne discontinue) et méthode 3 (ligne solide mince)...	47
Figure 3. 3. Comparaison entre l'évapotranspiration ETR mesurée (triangles sur une ligne discontinue) par la technique d'eddy covariance et celle simulée (line continue) par trois methodes: No-Calibration (à gauche), Local-Calibration (centre) et NDVI-Calibration (à droite) pour trois champs de ble: champ 1 (figures en haut), champ 2 (figures au milieu) et champ 3 (figures en bas). ....	50
Figure 3. 4. Évolution journalière de l'évapotranspiration de référence $ET_0$ calculée par l'équation de la FAO-Penman-Monteith durant les deux saisons agricoles de l'olivier: 2003 et 2004. Les événements de pluie et d'irrigation sont aussi présentés. ....	53
Figure 3. 5. Comparaison entre l'évapotranspiration mesurée par la technique d'eddy covariance et celle simulée par le modèle FAO-56 à coefficient cultural simple durant les deux saisons agricoles de l'olivier: 2003 et 2004. ....	56
Figure 3. 6. Comparaison entre l'évapotranspiration mesurée par la technique d'eddy covariance et celle simulée par le modèle FAO-56 à coefficient cultural double durant les deux saisons agricoles de l'olivier: 2003 et 2004. ....	57
Figure 3. 7. Performance de la partition de l'évapotranspiration. ....	59
Figure 3. 8. Evaluation des pertes d'eau par évaporation du sol. ....	60

Figure 3. 9. Coefficient du stress hydrique estimé par le modèle FAO-56 durant la saison agricole 2003. L'événement du stress est indiqué par le cercle vert. ....	62
Figure 3. 10. Comparaison de l'irrigation donnée par le gérant et celle estimée par le modèle FAO-56 pour que la plante ne souffre pas du stress hydrique ( $K_s=1$ ).....	62
Figure 3. 11. Evolution journalière de l'évapotranspiration de référence $ET_0$ calculée par la méthode de FAO-Penman-Monteith, caractérisant le climat de la région de Saada durant l'année 2004 et 2005.....	63
Figure 3. 12. Comparaison entre l'évapotranspiration mesurée par la technique d'Eddy covariance et celle simulée par le modèle FAO-56 à coefficient cultural simple pour les deux sites d'oranger : Saada1 (2004) par goutte à goutte (figure en haut) et Saada 2 (2005) irrigué par gravitaire (figure en bas).....	65
Figure 3. 13. Comparaison entre l'évapotranspiration mesurée par la technique d'Eddy covariance et celle simulée par le modèle FAO-56 à coefficient cultural double pour les deux sites d'orangers : Saada1 (2004) irrigué par goutte à goutte (figure en haut) et Saada 2 (2005) irrigué par gravitaire (figure en bas). ....	66
Figure 3. 14. Comparaison entre le coefficient cultural mesuré et celui donné dans le document FAO-56 pour Saada 1 (figure haut) et Saada 2 (figure en bas).....	67
Figure 3. 15. Comparaison entre le coefficient cultural de l'oranger irrigué par goutte à goutte (Saada 1) et celui de l'oranger irrigué par gravitaire (Saada 2) du jour julien 116 à 160 de l'année 2005. A noter que la pluie est absente durant cette période. ....	69
Figure 4. 1. Domaine d'étude avec les points de grille du modèle ALADIN régulièrement répartis sur le bassin versant du Tensift. Le positionnement des stations météorologiques sur le bassin versant du Tensift a été présenté sur la même figure.....	75
Figure 4. 2. Cartes du cumul mensuel de $ET_0$ (mm/mois), calculée par la méthode de Hargreaves de Janvier à Décembre 2004.....	75
Figure 4. 3. Comparaison entre $ET_0$ mensuelle estimée par la méthode de Hargreaves en utilisant les données climatiques issues du modèle ALADIN et celle calculée par l'équation de FAO-Penman-Monteith (Equation A. 8) en utilisant les paramètres climatiques mesurés par les stations météorologiques.....	76
Figure 4. 4. Carte de 50 classes de blé(zone R3).....	77
Figure 4. 5. Les profils de NDVI du blé correspondant à 50 classes.....	77
Figure 4. 6. Carte de la date de semis du blé (zone R3). La valeur 1 correspond au 7 Novembre 2002. ....	78
Figure 4. 7. Comparaison entre la date de semis du blé dérivée à partir des données de la télédétection et celle observée pendant la saison 2002/03. ....	78
Figure 4. 8. Carte du cumul saisonnier des besoins en eau du blé estimé par l'approche double du modèle FAO-56 en utilisant les données satellites.....	80
Figure 4. 9. Carte du cumul saisonnier d'irrigation de la culture du blé dans le bassin de Tensift Al Haouz. ....	80
Figure 4. 10. Distribution spatiale et temporelle de la quantité d'irrigation de la culture du blé dans le bassin de Tensift Al Haouz. ....	81
Figure 4. 11. Comparaison entre l'évapotranspiration maximale $E_{Tc}$ simulée par l'approche double du modèle FAO-56 en utilisant les données satellites et l'évapotranspiration réelle (ETR) mesurée par la technique d'Eddy covariance sur trois blocs du blé.....	83
Figure 4. 12. Comparaison entre l'évapotranspiration maximale $E_{Tc}$ simulée par l'approche double du modèle FAO-56 en utilisant les données satellites et l'évapotranspiration réelle (ETR) mesurée par la technique d'Eddy covariance sur un champ de blé non stressé et de faible évaporation du sol. ....	83
Figure B. 1. Schéma de la sonde de mesure du flux de sève par la méthode Heat Ratio Method (HRM). ....	110

## Liste des Tableaux

Table 2. 1. Les différents paramètres mesurés ainsi les instruments de mesure utilisés.....	38
Table 2. 2. Dates d'acquisition des différentes images utilisées, avec leurs résolutions spatiales.....	42
Table 3. 1. Analyse statistique de l'évapotranspiration réelle estimée par les trois méthodes pour chaque champ de blé. ....	51
Table 3. 2. Comparaison entre l'évapotranspiration réelle cumulée (AET), évaporation du sol cumulée (SE) et la transpiration de la végétation cumulée (CT) estimée par les trois méthodes pour chaque champ de blé. ....	52
Table 3. 3. Les valeurs des différents paramètres, utilisés par le modèle FAO-56 données par Allen et al. (1998) et celles ajustées dans notre région.....	55
Table 4. 1. Comparaison entre le cumul saisonnier d'irrigation (en mm) observé et celui simulé par le modèle FAO-56 en utilisant les données de la télédétection dans trois champs du blé.....	83

# **INTRODUCTION GENERALE**

Comme grand nombre de pays à travers le monde, le Maroc fait face à la problématique du développement et de la gestion durable des ressources en eau. Ces ressources en eau limitées sont caractérisées par une grande disparité géographique et une forte sensibilité aux aléas climatiques. La poussée démographique, l'extension de l'agriculture irriguée, ainsi que le développement urbain, industriel et touristique font forte pression sur cette ressource rare.

Le capital eau, déjà à la limite de la situation de stress hydrique (1.010 m<sup>3</sup>/habitant par an en 2000), est en régression permanente. La situation est particulièrement préoccupante en milieu rural où l'on enregistre un déficit important en matière d'alimentation en eau potable.

L'irrigation est le principal consommateur d'eau au Maroc (85% des eaux mobilisées vont à l'agriculture) (Chehbouni et al., 2007), bien qu'elle ne concerne que 13% de la surface agricole utile. Près de la moitié des terres cultivables est située dans les zones à faible pluviométrie (inférieure à 400 mm par an), ne permettant qu'un système de culture précaire, basé sur l'alternance céréales/jachère (MADREF, 2000).

Une gestion rationnelle et rigoureuse de l'eau dans le domaine agricole s'avère donc nécessaire. Une des premières solutions pour économiser l'eau dans ce domaine consiste à piloter la demande, c'est-à-dire, optimiser les apports, en fonction des besoins réels de la culture à un moment donné de son développement en tenant compte des conditions environnementales.

Afin que l'utilisation de l'eau soit plus rationnelle, il est nécessaire d'améliorer sa rentabilité et de faciliter la gestion et la programmation des irrigations. L'expression programmation de l'irrigation décrit la procédure par laquelle un agriculteur détermine la périodicité et le dosage des applications d'eau. Lorsque l'on programme l'irrigation, on se pose les deux questions suivantes: quand faut-il irriguer? et quelle quantité d'eau faut-il appliquer/apporter? Pour cela, il est souhaitable de connaître les facteurs climatiques et édaphiques, les techniques et les conditions agronomiques d'exploitation des parcelles agricoles (stades phénologiques et critiques).

Dans ce contexte, les études concernant le comportement des écosystèmes terrestres, leurs possibles modifications et leurs adaptations aux pressions humaines et climatiques, ainsi que les impacts de ces modifications sur les ressources hydriques, occupent une place importante dans les préoccupations de la communauté scientifique et des organismes de

gestion des ressources naturelles : HAPEX-Sahel<sup>1</sup> (Goutorbe et al., 1997a) et SALSA<sup>2</sup> (Chehbouni et al., 2000; Goodrich et al., 2000), et plus particulièrement, le programme SudMed (Chehbouni et al., 2003, 2004, 2007) dans le cadre duquel se situe ce travail.

L'objectif de ce travail est d'estimer les besoins en eau des cultures dominantes dans la région de Tensift Al Haouz (blé, olivier et oranger). L'approche climatique basée sur la méthode FAO-56 faisant appel aux coefficients cultureux a été utilisée. Pour se faire, il est nécessaire de déterminer les coefficients cultureux adaptés aux cultures dans cette région.

Notre attention s'est portée sur trois cultures: deux cultures arborées (l'olivier et l'oranger) et une culture annuelle (blé). Ces trois cultures ont été choisies pour leur prédominance dans la région de Tensift Al Haouz (43.3% du blé, 29% de l'olivier et 6% de l'oranger, source : ORMVAH « Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Haouz »). De plus, l'olivier et l'oranger sont connus depuis toujours sur l'ensemble des pays méditerranéens. Il s'agit de deux arbres ayant une résistance redoutable aux caprices du temps et aux variations climatiques. Leur physiologie particulière est adaptée pour les rendre résistants aux hivers les plus froids, aux étés les plus brûlants et aux sécheresses les plus dévastatrices. Le blé, lui, c'est un aliment de base de l'alimentation dans tout le pourtour méditerranéen. La consommation moyenne annuelle de céréales par habitant au Maroc est très importante: elle est de l'ordre de 210 Kg par habitant par an. Vu l'importance de ces cultures dans notre région d'étude, il est intéressant d'estimer adéquatement les besoins en eau de ces cultures. La description de trois cultures dominantes dans la région, leurs différents stades de développement ainsi que les contraintes qui affectent la production de ces cultures ont été présentés dans le chapitre 1. Nous allons présenter aussi dans ce chapitre une revue bibliographique sur les méthodes et les modèles qui permettent de déterminer les besoins en eau des cultures.

La démarche suivie pour réaliser ce travail repose sur une étude expérimentale et une étude théorique (Chapitre 2) basée sur la modélisation de transfert d'eau et d'énergie entre le sol, la végétation et l'atmosphère. Le modèle utilisé est un modèle simple et opérationnel, appelé le modèle FAO-56 (Allen et al., 1998). L'étude expérimentale qui s'appuie sur des campagnes de mesure, vise à déterminer les paramètres d'entrée du modèle. Ensuite, il s'agit de calibrer et valider le modèle FAO-56 selon ses deux approches (approche à coefficient cultural simple et l'approche à coefficient cultural double) pour les couverts dominants de la zone d'intérêt (blé, olivier et oranger) (Chapitre 3). La calibration et la

---

<sup>1</sup> Hydrological -Atmospherical Pilot Experiment in the Sahel

<sup>2</sup> Semi-Arid-Land-Surface-Atmosphere

validation du modèle sont basées sur la minimisation de l'écart entre les paramètres simulés et ceux mesurés notamment l'évapotranspiration. Comme l'approche à coefficient cultural double du modèle FAO-56 permet de calculer séparément l'évaporation du sol et la transpiration de la végétation, cette partition du flux d'évapotranspiration a été validée par des mesures de la transpiration par la technique du flux de la sève pour des couverts arborés notamment l'olivier.

La dernière partie de ce travail (chapitre 4) a été consacrée à la spatialisation du modèle FAO-56 à partir des données de télédétection. Selon ce modèle, deux paramètres sont nécessaires à spatialiser : il s'agit de l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  et le coefficient cultural  $K_c$ . La spatialisation de  $ET_0$  a été faite à l'aide des données climatiques (Température, Humidité, Vent, Rayonnement global) issues d'un modèle météorologique marocain (ALADIN-Maroc). Ce modèle permet de donner les paramètres climatiques sur chaque point d'une grille de l'ordre de 16km×16km, ce qui va nous permettre d'estimer des cartes de  $ET_0$ . Finalement, nous conclurons ce travail en proposant des perspectives.

# **CHAPITRE 1 : BESOINS EN EAU DES CULTURES**

## 1.1 Introduction

L'agriculture représente le secteur clef de l'économie dans la région de Tensift Al Haouz. En effet, plus de 50% de la population active travaille dans l'agriculture. La superficie agricole utile (SAU) s'étend sur environ un million et demi d'hectares dont plus de 60% sont généralement réservés à la céréaliculture. La région produit également des fruits (olives, agrumes, abricots...) et légumes et elle est la première au Maroc en production de l'olivier qui s'étend sur une superficie de plus de 126 000 hectares. Grâce à la politique des barrages, aux équipements hydro-agricoles et à la petite et moyenne hydraulique, les superficies irriguées représentent quelques 20% de la superficie agricole utile.

## 1.2 La culture de blé

### Importance de la culture du blé

Au Maroc, la céréaliculture constitue l'ossature de l'agriculture du pays. Cette culture couvre annuellement une superficie de l'ordre de 5.4 millions d'hectares (soit 63% de la SAU totale du pays), répartie principalement dans les régions à agriculture pluviale (bour). Presque 95% des céréales sont cultivées dans ces régions, et la moitié est localisée dans les zones arides et semi-arides. Parmi ces régions, on trouve notre région d'étude (Tensift Al Haouz) pour laquelle la céréaliculture constitue la principale activité agricole. La production céréalière dans cette région représente 12,5% de la production nationale qui a atteint 77,67 millions de quintaux durant la campagne 2002/2003. Ce secteur, avec les diverses activités qu'il engendre, en terme de création d'emploi (60 millions journées de travail), a une grande importance socio-économique (MADREF, 2000).

### Cycle végétatif et productif du blé

D'une manière générale, le cycle de blé peut être divisé en deux périodes : végétative et reproductrice. La période végétative correspond à la phase de la formation des organes végétatifs (feuilles, talles...) et la période reproductrice correspond aux phases de formation et de croissance des organes reproducteur (épis). On identifie quatre étapes principales de développement du blé:

- i. la germination : du semis à l'émergence;

- ii. la pousse du couvert végétal : de l'émergence jusqu'à l'initiation du premier épillet;
- iii. l'épiaison - de l'initiation du premier épillet à la formation terminale de l'épillet;
- iv. la maturité. Elle comporte plusieurs étapes. La maturité laiteuse, la maturité jaune et la maturité complète.

### **Contraintes pour la production de la culture du blé**

Malgré l'importance économique de la culture de blé, le rendement moyen, qui est de l'ordre de 12 à 13 quintaux à l'hectare, reste très modeste. Ceci est dû à plusieurs contraintes, à savoir les contraintes climatiques et les contraintes techniques. Concernant les contraintes climatiques, la majorité des céréales est cultivée dans les régions non irriguées (zones bours). Ces cultures sont souvent exposées à une sécheresse intermittente à n'importe quel moment de leur cycle, selon la distribution saisonnière de la pluviométrie, mais sont dans tous les cas soumises à la sécheresse de fin de cycle qui est accentuée par de fortes températures qui caractérisent cette période. Des études ont montré que la dépendance directe de la céréaliculture aux pluies est l'un des premiers facteurs affectant les rendements. Karrou (2003) a reporté que la production des céréales au Maroc peut passer de 18 millions de quintaux en années sèches (cas de 1994/95 et 2000/2001) à 100 millions en années pluvieuses (cas de 1995/96).

Concernant les contraintes techniques, la majorité des agriculteurs ne maîtrisent pas bien les pratiques agricoles. En bour, la conduite du blé est caractérisée par un semis à la volée suivi d'un travail du sol pour enfouir les semences et les mauvaises herbes précoces, et par un apport périodique et non raisonné des engrais, un désherbage souvent manuel et tardif, et une récolte non maîtrisée engendrant un niveau élevé de pertes. En zone irriguée, les exploitants utilisent des techniques culturales très modestes et ne maîtrisent pas bien la gestion de l'eau d'irrigation. Ils utilisent des techniques d'irrigations (gravitaire) qui conduisent à des pertes d'eau énormes, pouvant atteindre 60% (Karrou, 2003). Certains d'entre eux donnent la priorité aux cultures les plus rentables (arbres fruitiers) et les céréales profitent peu de l'eau d'irrigation. D'autres ne connaissent ni la quantité d'eau ni celle d'engrais à apporter, ni le moment convenable d'apport.

## 1.3 La culture de l'olivier

### Importance de la culture de l'olivier

La culture de l'olivier occupe dans le monde 8,6 millions d'hectares pour une production de 17,3 millions de tonnes d'olives. Les quatre premiers pays producteurs (Espagne, Italie, Grèce et Turquie) représentent 80 % de la production mondiale d'olives et les dix premiers sont tous situés dans la zone méditerranéenne (Civantos, 1997). Parmi ces dix premiers pays, on trouve le Maroc, qui est le 7<sup>ème</sup> producteur d'oliviers dans le monde. Son climat méditerranéen, la nature des sols et le savoir faire des agriculteurs créent un contexte pédoclimatique et socio-économique favorable au développement de l'olivier. La production marocaine est d'environ 500.000 tonnes d'olives par an et permet de créer 11 millions de journées de travail. L'olivier représente la principale culture fruitière au Maroc. Elle occupe une surface de l'ordre de 560.000 ha répartie principalement sur deux zones. Une zone irriguée située au centre du Maroc dont la région de Tensift Al Haouz (notre région d'étude) est la principale zone adaptée à la culture de l'olivier. Une autre région plus favorable se situe au Nord du Maroc.

### Cycle végétatif et productif de l'olivier

Au cours de son cycle annuel de développement, l'olivier passe par les phases suivantes (Walid et al., 2003):

- i. induction, initiation et différenciation florale : durant Janvier et Février;
- ii. croissance et développement des inflorescences à l'aisselle des feuilles : au cours du mois Mars;
- iii. floraison: durant le mois d'Avril;
- iv. fécondation et nouaison des fruits: fin Avril-début Mai;
- v. grossissement des fruits: durant Juin- Juillet et Août;
- vi. véraison: au cours du mois Septembre;
- vii. maturation : Le fruit atteint son calibre final en Octobre et s'enrichit en huile;
- viii. récolte des fruits: Mi-Novembre à Janvier.

A noter que la période la plus intense du cycle annuel de l'olivier se déroule de Mars à Juin. Au cours de cette phase, les oliviers ont besoin d'une quantité importante de l'eau et de nutriments.

## Exigences agro-écologiques

En repos végétatif hivernal, l'olivier résiste jusqu'à -8 à -10°C. Mais, les dégâts peuvent être très importants pour des basses températures (0 à -1°C) pendant la floraison. A des températures élevées (35-38°C), la croissance végétative s'arrête et à 40°C et plus, l'appareil foliacé peut être brûlée et les fruits peuvent chuter, surtout si l'irrigation est insuffisante. La production de l'olivier est normale avec 600 mm de pluie bien répartis dans le temps. Entre 450 et 600 mm, la production est possible pour un sol profond et argilo-limoneux (les capacités de rétention en eau du sol soient suffisantes). Avec une pluviométrie inférieure à 200 mm, l'oléiculture est économiquement non rentable. Les facteurs défavorables de la production des oliviers sont: les vents chauds au cours de la floraison, et les gelées en printemps (Walid et al., 2003).

## 1.4 Les agrumes

### Importance des agrumes

De nos jours, les agrumes sont les fruits les plus consommés dans le monde. Leur production dépasse 100 millions de tonnes par an. Le bassin méditerranéen produit plus du quart de la production mondiale. Le Maroc est l'un des premiers producteurs d'agrumes dont les oranges constituent la majeure partie de la production. Il forme avec l'Espagne, Israël et l'Italie les principaux pays exportateurs de la région méditerranéenne (El Hari, 1992).

Au Maroc, l'agrumiculture constitue l'un des principaux secteurs de l'économie nationale; elle couvre une superficie de l'ordre de 74750 ha, répartie entre le Souss, le Nord et le centre sud (Haouz), avec une production annuelle de l'ordre de 1300000 tonnes (Boubker, 2004). Ce secteur, avec les diverses activités qu'il engendre, à savoir la production et la création d'emploi, représente une source de devises considérable de l'ordre de 1.60 milliards de dirhams par an (Walid et al., 2003; Boubker, 2004).

Malgré l'importance économique de ce secteur, le rendement moyen qui est de 15 à 20 tonnes à l'hectare reste très modeste et paraît largement inférieur à celui réalisé dans d'autres pays agrumicoles tels que l'Espagne et l'Italie, qui ont atteint des rendements de l'ordre de 40 tonnes par hectare. Ce faible niveau est dû essentiellement au vieillissement des arbres, au manque de sélection variétale et aux modestes techniques culturales en particulier la mauvaise gestion de l'eau d'irrigation. En effet, les exploitants ne maîtrisent ni la quantité d'eau à apporter, ni le moment convenable d'apport d'eau. Certains d'entre eux utilisent des méthodes

empiriques d'évaluation des besoins en eau qui ont été établies et calibrées dans des conditions différentes de nos conditions. Ceci risque de surestimer ou sous-estimer les besoins en eau (Kashyap and Panda, 2001).

### Cycle végétatif et productif des agrumes

Les agrumes sont des espèces subtropicales qui se développent dans des zones où le gel est absent. A  $-3^{\circ}\text{C}$ , le gel peut affecter dangereusement le feuillage. A  $-9^{\circ}\text{C}$ , la charpente est détruite. L'activité de croissance commence à  $13^{\circ}\text{C}$  et se poursuit jusqu'à  $36^{\circ}\text{C}$ . Les agrumes subissent deux périodes de dormance: (1) une dormance d'été qui se produit en jours longs et chauds. (2) une dormance d'hiver survenant en jours courts et froids. Une humidité atmosphérique pendant la saison chaude peut provoquer des attaques de phytophthora. Des vents secs l'été amplifient la chute des fruits. Les vents, s'ils sont violents provoquent la chute des fruits et le bris des branches. On peut décomposer le cycle des agrumes en six périodes principales (Praloran, 1971; El Hari, 1992):

- i. la pousse végétative. on trouve trois pousses végétatives chez les agrumes. (1) pousse de printemps, elle débute en fin Février et se termine au début de Mai. Elle est la pousse la plus importante, non seulement par le nombre et la longueur des rameaux émis, mais aussi par le fait qu'elle est la pousse florifère; (2) pousse d'été, elle commence en Juillet et se termine en Août; (3) pousse d'automne, elle débute en Octobre et se termine en fin Novembre. Cette pousse assure le renouvellement des feuilles;
- ii. La floraison. Elle a lieu en printemps (fin Mars, début Mai). Le nombre de fleurs portées par un arbre est très important. il est estimé pour un arbre adulte d'orange à 60000 (Loussert, 1987), mais seulement 1% de ces fleurs donnera des fruits;
- iii. la pollinisation et la fécondation. Elle a lieu durant les mois Mai et Juin.
- iv. La nouaison. Elle vient après la fécondation. C'est la première étape de développement des fruits;
- v. Le grossissement du fruit est très rapide après sa nouaison. Il dépend de l'âge de l'arbre, des conditions climatiques et de l'alimentation hydrique;
- vi. La maturité. Le fruit atteint son calibre final en Octobre, après une continuité de grossissement pendant Juillet- Août -Septembre. La maturité est marquée par un changement de couleur et par la qualité de la teneur en jus de sa pulpe.

Tenant compte de l'importance économique de l'agriculture dans la région de Tensift Al Haouz, et les contraintes qui limitent une meilleure production, il est nécessaire de développer des techniques agricoles qui permettent d'utiliser au mieux les faibles ressources en eau disponibles pour une amélioration et une stabilisation de la production. Dans ce sens, une gestion rationnelle et rigoureuse de l'eau dans le domaine agricole s'impose. Une des premières solutions pour économiser l'eau dans ce domaine consiste à optimiser les apports en fonction des besoins réels de la culture. La connaissance des besoins en eau des cultures ou l'évapotranspiration est essentielle dans la planification et l'aménagement des ressources hydriques.

## **1.5 Besoins en eau des cultures : définition et modélisation**

Déterminer les besoins en eau des cultures revient dans la pratique à déterminer les quantités d'eau perdues. Après irrigation, une grande partie de l'eau qui pénètre dans le sol s'absorbe par les racines et remonte vers les feuilles pour s'évacuer sous forme de vapeur d'eau dans l'air à travers les stomates. Une faible quantité maintient l'hydratation des cellules et une autre quantité plus faible encore, est utilisée pour la composition de la matière organique. L'évacuation de la vapeur d'eau par les stomates est appelée la transpiration. Quand on passe à l'échelle d'un champ, la transpiration végétale ne représente plus la seule quantité d'eau perdue, puisque le sol lui aussi a sa propre évaporation. L'ensemble de ces pertes en eau constitue le terme d'**évapotranspiration**.

Selon la définition donnée par la FAO-56, le besoin en eau d'une culture est "la quantité d'eau nécessaire pour couvrir les pertes en eau par évapotranspiration d'une culture saine, cultivée en grande parcelle, sans contraintes du sol (fertilité et humidité), et réalisant son potentiel de production sous les conditions considérées" (Allen et al., 1998). Cette définition correspond à l'évapotranspiration maximale d'une culture ( $ET_c$ ) qui dépend de la demande climatique ou de l'évapotranspiration de référence ( $ET_0$ ) et du coefficient cultural ( $K_c$ ) (Figure 1.1 ci-dessous).

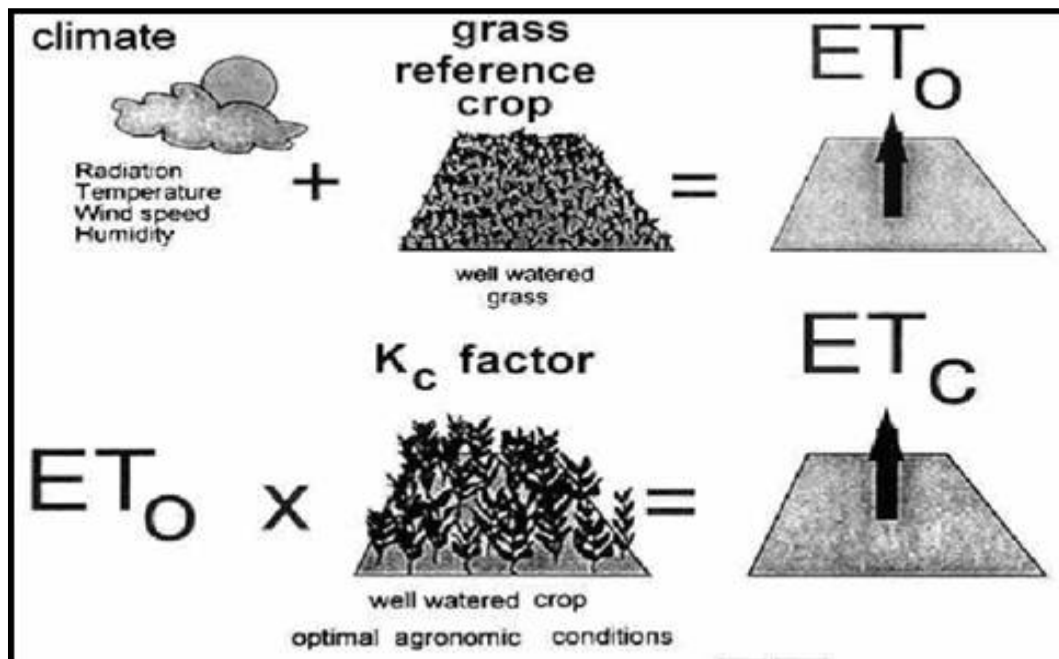


Figure 1. 1. Schéma de calcul des besoins en eau des cultures ou de l'évapotranspiration maximale  $ET_c$  selon la méthode de la FAO- 56 (Allen et al., 1998).

Il est donc important de quantifier la quantité d'eau perdue par évapotranspiration. Les travaux réalisés depuis plusieurs décennies jusqu'à nos jours sur la détermination des besoins en eau des cultures, s'orientent essentiellement, soit vers des approches expérimentales (méthodes dites directes), soit vers des approches basées sur des modèles (méthodes dites indirectes). Pour les méthodes directes, nous pouvons citer: la méthode du bilan hydrique (Damagnez, 1968; Katerji and Hallair, 1984; Palomo et al., 2002), la méthode lysimétrique (Ducrocq, 1987 ; Marek et al., 1988) et des méthodes microclimatiques basées sur le bilan d'énergie de la surface du couvert végétal (rapport de Bowen, méthode des corrélations turbulentes ou méthodes aérodynamique). Leur mise en oeuvre nécessite toutefois un équipement très sophistiqué et coûteux. Dans ce sens, de nombreuses techniques ont été développées au cours des dernières années pour mesurer la perte en eau par évapotranspiration ou par transpiration. Parmi ces dernières figurent la technique de flux de la sève (Sakuratani, 1981; Granier, 1985, 1987 ; Edwards et al., 1996; Burgess et al., 2001; Fernández et al., 2001) qui permet de mesurer seulement la transpiration de la plante et la méthode d'eddy-covariance (Running et al., 1999) qui mesure l'évapotranspiration à l'échelle de la parcelle. A l'échelle régionale, l'évapotranspiration peut être déterminée par la méthode de scintillation en utilisant le scintillomètre micro-onde (Green et al., 2000).

Parmi les méthodes indirectes, l'approche climatique basée sur la méthode FAO-56 est généralement la plus utilisée. Elle est basée sur le modèle suivant :

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad \text{Equation 1. 1}$$

Où  $ET_0$  représente l'évapotranspiration d'une surface étendue de gazon bien alimentée en eau, ayant une hauteur uniforme de 8 à 15 cm, en pleine période de croissance, couvrant complètement le sol et ne souffrant pas de stress hydrique (Allen et al., 1998).  $K_c$  correspond au coefficient cultural, fonction du type de la culture et de son stade végétatif.

Devant la difficulté de respecter les conditions standards pour le calcul de  $ET_0$ , différentes formules empiriques ont été développées pour estimer  $ET_0$ . Ces formules empiriques peuvent être classées en trois groupes : les méthodes de température (Blaney and Criddle, 1950; Hargreaves and Samani, 1985), les méthodes de rayonnement (Makkink, 1957; Turc, 1961; Priestly and Taylor, 1972) et les méthodes combinées (Penman, 1948; Allen et al., 1998). Leur utilisation est basée sur plusieurs considérations comme le type du climat et la disponibilité des paramètres nécessaires. L'utilisation de formules empiriques non adéquates peut surestimer ou sous estimer les besoins en eau des cultures (Saeed, 1986; Jensen et al., 1990; Kashyap and Panda, 2001; Droogers and Allen, 2002)

Le second terme de la formule (Eq. 1.1) de calcul des besoins en eau des cultures est le coefficient cultural ( $K_c$ ). Sa valeur est affectée par plusieurs paramètres: aérodynamiques, biologiques, physiques, physiologiques, phénologiques et agronomiques. Le coefficient cultural est donc toujours établi expérimentalement au début, pour une région et une culture données, puis ensuite confiné dans des tables pour une utilisation ultérieure dans la même région ou dans une région similaire.

D'autres modèles plus compliqués que le modèle FAO-56 ont été développés pour simuler l'évapotranspiration et dans certains cas ses composantes (évaporation du sol et la transpiration de la plante). Ces modèles sont de type SVAT simple « Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfert » (Sinclair and Seligman, 1996, Olioso et al., 1999; Boulet et al., 2000), et complexe comme SiSPAT « Simple-Soil-Plant-Atmosphere-Transfert » (Braud et al., 1995). Ces modèles de transfert sol- végétation- atmosphère permettent de quantifier les échanges d'eau et d'énergie entre le sol, la végétation et l'atmosphère. Ils permettent notamment de mieux connaître les besoins en eau des plantes et les conditions génératrices de stress hydrique. Comme le modèle FAO-56 à coefficient cultural double, ils permettent, de calculer séparément l'évaporation du sol et la transpiration de la végétation. Cependant, ces modèles nécessitent la connaissance d'un nombre important de variables, ce qui rend difficile à l'heure actuelle leur utilisation à l'échelle régionale.

On trouve d'autres modèles de type spécifique (ou monospécifique) ou parcellaires qui sont généralement des modèles d'écosystèmes naturels ou agronomiques. Les modèles STICS (Brisson et al., 1998), CERRES (Ritchie, 1986) et SUCROS87 (Spitters et al., 1989) font partie intégrante de ces derniers. Ces modèles utilisent quatre catégories de données d'entrée: les données climatiques, les données du sol, les itinéraires techniques et les caractéristiques variétales.

Après le développement des modèles physiques qui permettent de décrire les processus de transfert d'eau et d'énergie entre le sol, la végétation et l'atmosphère, ces modèles doivent être validés à l'aide des observations sur le terrain d'où l'intérêt des campagnes de mesure effectuées dans le cadre du projet SudMed (les cultures suivies de 2002 à 2005 comprennent deux parcelles d'oliviers, deux parcelles d'orangers, et quatre parcelles de blé. (Pour plus de détail, voir le chapitre 2).

Si nous disposons de modèles réalistes qui permettent de quantifier les besoins en eau des cultures, nous pourrions apporter une aide aux décideurs pour la gestion et la programmation des irrigations à l'échelle parcellaire. Mais, si les décideurs veulent gérer leurs ressources en eau à l'échelle régionale au lieu de l'échelle parcellaire, l'un des problèmes majeurs rencontrés est la variabilité des paramètres du modèle. D'où l'intérêt de la télédétection spatiale qui permette d'extrapoler les informations locales à l'échelle spatiale.

## **1.6 Apport de la télédétection spatiale pour l'estimation des besoins en eau des cultures**

### *Qu'est-ce que la télédétection ?*

La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. Elle englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information dans plusieurs domaines : météorologie, climatologie, océanographie, hydrologie, agriculture,.....

Dans le domaine agricole, la télédétection spatiale pourrait être un outil puissant pour la surveillance des cultures à différentes échelles d'espace (haute résolution SPOT<sup>3</sup>,

---

<sup>3</sup>Satellite Pour l'Observation de la Terre

LandSat<sup>4</sup>..., basse résolution NOAA<sup>5</sup>). La télédétection dans le domaine des micro-ondes, (Jackson et al., 1983; Jackson and Schmugge, 1989; Kerr and Njoky, 1988), dans l'infrarouge thermique (Jackson, 1985; Taconet, 1986; Laguarde and Choisnel, 1989, Brasa et al., 1998), dans le visible et le proche infrarouge (Tucker, 1979; Asrar et al., 1984; Caselles et Delegido, 1987; Caselles et al., 1998; Huete, 1988) permet l'accès à un certain nombre de caractéristiques du couvert végétal à différentes échelles de temps et d'espace. La télédétection dans le domaine thermique permet d'estimer la température de la surface qui varie fortement en fonction de l'environnement micro-climatique des feuilles et de l'état d'alimentation hydrique de la plante. Le coefficient cultural, l'albédo de surface et la fraction du couvert peuvent être estimés par des mesures dans le visible et le proche infrarouge, alors que la quantité en eau dans le sol et dans la végétation par les mesures dans les micro-ondes.

Beaucoup de travaux utilisant la télédétection spatiale ont été développés pour la planification et la gestion de l'eau d'irrigation (Carlson and Buffum, 1989; Thuinnissen et Nieuwenhuis, 1990; Chanzy, 1991; Moran, 1994; Wanjura and Mahan, 1994; Moran et al., 1997; Schmugge and Kustas, 1999; Luquet, 2002). Ces travaux sont basées sur des relations entre la température de surface la transpiration: une plante en conditions de stress hydrique limite sa transpiration par la fermeture de ses stomates conduisant à des températures foliaires élevées. Plusieurs approches ont été développées pour exploiter l'information issue de la télédétection infrarouge thermique dans le but d'estimer l'état hydrique d'une culture (Jackson et al., 1981; Wanjura et al., 1984; Asrar et al., 1985; Krieg et al., 1993; Moran, 1994). Dans ce sens, plusieurs indicateurs de stress ont été développés: SDD (Stress Degree Day, Idso et al., 1977), CT (Canopy Temperature, Berliner et al., 1984; Moran, 2001), CWSI (Crop Water Stress Index, Jackson et al., 1981), WDI (Water Deficit Index, Moran et al., 1994; Luquet, 2002).

La télédétection permet d'avoir des informations continues sur l'état de la végétation par le biais des indices de végétation. L'indice de végétation le plus répandu et le plus utilisé est le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Ce dernier est définie par le rapport de la différence entre les reflectances de surface dans les domines proche infrarouge et le rouge sur la somme de celles-ci (Rouse et al., 1974; Jackson, 1983). Cependant dans les zones arides et semi-arides, la végétation étant éparse, le sol affecte considérablement le NDVI

---

<sup>4</sup> Land Satellite

<sup>5</sup>National Oceanic and Atmospheric Administration

(Huete, 1988), d'où l'intérêt de développer un autre indice de végétation indépendant des effets de la brillance du sol (SAVI : Soil Adjusted Vegetation Index).

Des études expérimentales et théoriques ont montré que les indices de végétation peuvent être reliés simplement aux caractéristiques de la végétation, notamment l'indice foliaire (LAI) (Asrar et al., 1984; Duchemin et al., 2006), le coefficient cultural (Jackson et al., 1980; Heilman et al., 1982; Neale et al., 1989; Choudhury et al., 1994; Garatuza and Watts, 2005) et la couverture végétale (Purevdorj et al., 1998; Er-Raki et al., 2007).

La similitude entre l'évolution de l'indice de végétation (NDVI) au cours du cycle d'une culture et celle du coefficient cultural (Heilman et al., 1982; Neal et al., 1989; Jackson et al., 1980) a encouragé les scientifiques à chercher des relations entre ces deux paramètres afin d'estimer les besoins en eau des cultures à l'échelle régionale. Plusieurs études ont montré qu'il existe une relation linéaire entre les deux paramètres (e.g. Choudhury et al., 1994; Jackson et al., 1980). Cependant cette relation peut être perturbée par l'évaporation du sol (Allen and Tasumi, 2003). Pour cette raison, plusieurs auteurs ont essayé de chercher des relations entre les indices de végétation et le coefficient de transpiration des plantes  $K_{cb}$ . Bausch et Neale (1987) et Neale et al. (1989) ont dérivé des relations linéaires entre SAVI et  $K_{cb}$  pour le maïs cultivé au Colorado (USA). Ces relations ont permis une bonne gestion de l'eau d'irrigation du maïs (Bausch and Neale, 1989; Bausch, 1993; Bausch, 1995). Hunsaker et al. (2003) ont trouvé deux relations de régression entre le coefficient cultural de base  $K_{cb}$  et le NDVI pour le coton cultivé au sud-Est des USA: une fonction linéaire entre les deux paramètres du semis jusqu'au plein développement et une fonction à régression multiple entre  $K_{cb}$ , NDVI et CGDD (Cumulative Growing Degree Day) pendant la phase de sénescence. De même, Hunsaker et al. (2005) ont trouvé aussi une fonction à régression multiple entre  $K_{cb}$  et NDVI, pour la culture du blé. Récemment, nous avons déterminé dans le cadre du projet SudMed une relation linéaire entre  $K_{cb}$  et NDVI pour le blé développé dans le bassin versant du Tensift (Duchemin et al., 2006; Er-Raki et al., 2007). Cette relation nous a permis de spatialiser le modèle FAO-56 afin d'estimer les besoins en eau à l'échelle plus large.

Un autre paramètre très important dans l'estimation des besoins en eau est l'évapotranspiration de référence ( $ET_0$ ). La spatialisation de ce terme est très importante pour la gestion de l'eau d'irrigation à grande échelle. Dans ce sens, beaucoup de travaux utilisant la télédétection ont été développés pour estimer  $ET_0$ . Certains d'entre eux sont basés

principalement sur des relations entre la température de la surface ou le rayonnement solaire afin de spatialiser  $ET_0$  (Reginato et al., 1985; Chaudhury, 1997; Granger, 1997; Stefano and Ferro, 1997; Caselles et al., 1998; Stewart et al., 1999; Rivas and Caselles, 2004). D'autres travaux utilisent des combinaisons entre les modèles Digital Elevation Model (DEM) et les Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour cartographier  $ET_0$  (Baxter et al., 1996; Moore, 1996; Srinivasan et al., 1996; Chuanyan et al., 2004). D'autres méthodes utilisent les données climatiques spatialisées (Température, Humidité, Vent, Rayonnement global) issues de modèles météorologiques. Dans notre étude, le modèle météorologique utilisé est celui de la Direction de la Météorologie Nationale, il s'appelle ALADIN (Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International). Ce modèle génère les paramètres météorologiques sur chaque point de grille d'une taille de l'ordre de 16 km×16 km. Ceci nous a permis de spatialiser l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  en utilisant des techniques d'interpolation à savoir la méthode des splines et la méthode de la distance inverse (IDWA) (Amrhar, 2004; El Karouni et Koraichi, 2005).

## **CHAPITRE 2 : MODELE ET DONNEES EXPERIMENTALES**

Dans ce chapitre, nous allons présenter le modèle ainsi que les sites d'études qui ont été utilisés au cours de ce travail. Le modèle utilisé est un modèle simple opérationnel qui est le modèle FAO-56 (Allen et al., 1998). Les données expérimentales utilisées ont été effectuées dans le cadre du projet SudMed dans trois sites: olivier d'Agdal, blé de R3 (sidi Rahal) et les orangers de Saada.

## 2.1 Présentation du projet SudMed

Le projet SudMed est un projet Franco-marocain, mené en partenariat entre la Faculté des Sciences Semlalia de Marrakech (FSSM), le Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO, France), l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, France) et d'autres partenaires marocain : l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Haouz (ORMVAH), la Direction Régionale des Eaux et Forêts (DREF), l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT) et la Direction Nationale de la Météorologie (DMN)

Le projet SudMed a pour objectif d'étudier et de modéliser le fonctionnement des ressources hydroécologiques dans le bassin versant du Tensift (Marrakech, Maroc). Cette région a connu des périodes de sécheresse qui ont affecté les ressources hydriques. Les nappes phréatiques présentent des réserves appréciables mais sont surexploitées par pompage pour l'approvisionnement en eau et exposées à divers types de pollutions. Il importe donc d'analyser et de comprendre l'impact de l'action humaine et des modifications climatiques sur les ressources naturelles dans le but de proposer des outils de gestion durable.

Dans cette optique, le programme SudMed a pour ambition de développer les méthodologies permettant d'intégrer les informations de terrain, les mesures satellitales et les modèles physiques pour documenter, comprendre et prévoir l'évolution des ressources hydroécologiques d'un bassin versant aride en vue d'une gestion durable.

La démarche du projet SudMed pour atteindre cet objectif se traduit par trois axes de recherche:

- ✚ reconstituer en les distinguant les évolutions d'origine naturelle ou humaine qui ont marqué la région depuis 25 ans ou plus;
- ✚ décrire d'une manière intégrée les processus dominants qui contrôlent les flux, la production végétale et les bilans hydriques dans une région semi-aride;
- ✚ développer des scénarios d'évolution des ressources hydriques et végétales sous différents impacts anthropiques et climatiques.

## 2.2 Modèle FAO-56

Le modèle utilisé est le modèle FAO-56 (Allen et al., 1998), qui permet d'estimer les besoins en eau des cultures en se basant sur l'évapotranspiration de référence et les coefficients culturaux. Dans ce modèle, On distingue trois types d'évapotranspiration selon le type de la culture et les conditions climatiques comme l'indiquent la figure 2.1:

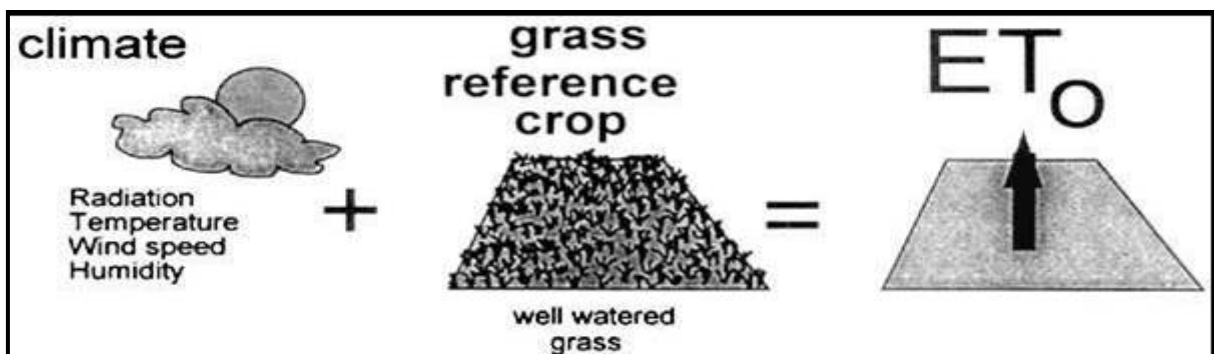
- La première c'est l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  qui est définie comme l'ensemble des pertes d'eau par évaporation et par transpiration d'une surface étendue de gazon bien alimentée en eau, ayant une hauteur uniforme de 8 à 15 cm, en pleine période de croissance, couvrant complètement le sol.
- La deuxième c'est l'évapotranspiration sous des conditions standards  $ET_c$  appelée aussi évapotranspiration maximale. Elle est définie à différents stades de développement d'une culture donnée sous des conditions agronomiques optimales; c'est à dire sans maladie et sans stress ni hydrique ni nutritionnel.  $ET_c$  est reliée à  $ET_0$  par l'intermédiaire d'un coefficient  $K_c$  appelé coefficient cultural qui tient compte de la différence physique et physiologique entre la surface de référence et la culture donnée :

$$ET_c = K_c * ET_0$$

- Enfin la dernière c'est l'évapotranspiration sous des conditions non standards  $ETR$  or  $ET_{adj}$  appelée aussi évapotranspiration réelle (ETR) qui est définie comme la somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et la végétation à un stade de développement physiologique donné et une état sanitaire réelle (présence des maladies et des insectes, stress hydrique...). ETR est reliée aussi à  $ET_c$  par un coefficient  $K_s$  appelé coefficient de stress hydrique ainsi :

$$ETR = K_s * ET_c = K_s * K_c * ET_0$$

Equation 2. 1



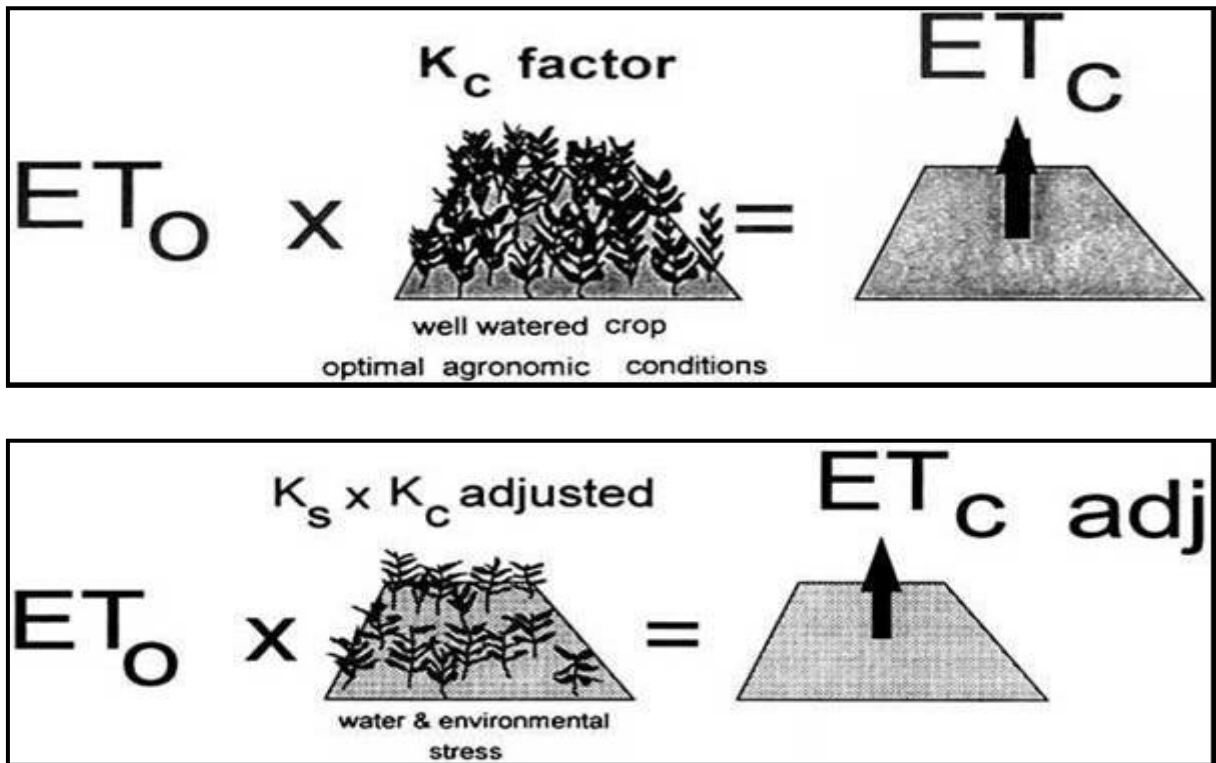


Figure 2. 1. Trois types d'évapotranspiration estimés par le modèle FAO-56 : Evapotranspiration de référence ( $ET_0$ ), évapotranspiration sous les conditions standard ( $ET_c$ ) et sous les conditions réelles ( $ET_c$  adj) (Allen et al., 1998).

Afin de déterminer l'évapotranspiration maximale et l'évapotranspiration réelle, il est nécessaire de déterminer trois paramètres : l'évapotranspiration de référence  $ET_0$ , le coefficient cultural  $K_c$  et le coefficient de stress hydrique  $K_s$ .

### 2.2.1 L'évapotranspiration de référence ( $ET_0$ )

Le concept de l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  a été introduit pour étudier la demande évaporative de l'atmosphère indépendamment du type du couvert végétal et des pratiques de gestion. Devant la difficulté à respecter les conditions standards pour le calcul de  $ET_0$ , des méthodes empiriques ou semi-empiriques ont été développées pour estimer l'évapotranspiration de référence à partir de différentes variables climatiques. Ces formules empiriques peuvent être classées en trois groupes : les méthodes de température (Blaney and Criddle, 1950; Hargreaves and Samani, 1985), les méthodes de radiation (Makkink, 1957; Turc, 1961; Priestly and Taylor, 1972) et les méthodes combinées (Penman, 1948; Allen et al. 1998). La plupart de ces relations sont obtenues et ensuite testées pour des zones particulières ou pour une culture donnée. Cependant, leur extrapolation à d'autres conditions climatiques nécessite parfois des ajustements afin qu'elles soient adaptées aux conditions locales. A titre

d'exemple, la relation proposée par Blaney and Criddle (1950) donne de bonne estimation de l'évapotranspiration pour des régions arides ou semi-arides. Cependant, elle a tendance à surestimer l'évapotranspiration pour des climats humides. Les différentes méthodes d'estimation de  $ET_0$  sont détaillées dans l'annexe A.

### 2.2.2 Le coefficient cultural ( $K_c$ )

Rappelons que c'est le rapport entre l'évapotranspiration maximale ( $ET_c$ ) et celle de l'évapotranspiration de référence  $ET_0$ . Selon le modèle FAO-56, deux approches ont été développées pour la détermination de ce coefficient: une approche à coefficient cultural simple et une autre à coefficient cultural double. Dans la première approche, le coefficient cultural simple  $K_c$  regroupe l'évaporation du sol et la transpiration de la plante. Dans la deuxième approche,  $K_c$  est divisé en deux termes:

- $K_e$  qui tient compte uniquement de l'évaporation du sol,
- $K_{cb}$  qui tient compte de la transpiration de la plante.

Le paramètre  $K_c$  représente l'effet intégral de plusieurs caractéristiques qui distinguent la végétation du gazon de référence. Sa valeur est largement affectée par plusieurs facteurs : les facteurs aérodynamiques liés à la hauteur et à la densité de la végétation, les facteurs biologiques liés à la croissance et la sénescence des feuilles, les facteurs physiques liés principalement à l'évaporation du sol, les facteurs physiologiques liés à la réponse des stomates à la pression de vapeur saturante et aux facteurs agronomiques liés aux pratiques culturales (système d'irrigation, fréquence des pluies et d'irrigation...). Le coefficient cultural est donc toujours établi expérimentalement au début, pour une région et une culture données, puis ensuite confiné dans des tables pour une utilisation ultérieure dans la même région ou dans une région similaire.

Les valeurs de  $K_c$  publiées par la FAO-56 (Allen et al., 1998) sont souvent données par culture, tout en tenant compte des diverses phases de croissance. Le cycle des cultures est souvent subdivisé en quatre phases de croissance: (1) la phase initiale de durée  $l_{ini}$ , qui s'étend du semis à environ 10% de la couverture du sol, (2) la phase de développement du couvert végétal de durée  $l_{dev}$  se terminant au moment où la couverture du sol est complète, (3) la phase mi-saison de durée  $l_{mid}$  qui se termine par le début de la chute ou la sénescence du

couvert foliaire, et (4) la phase de l'arrière-saison ou de maturation ( $l_{end}$ ). La figure suivante illustre une courbe représentative de l'évolution d'un coefficient cultural simple.

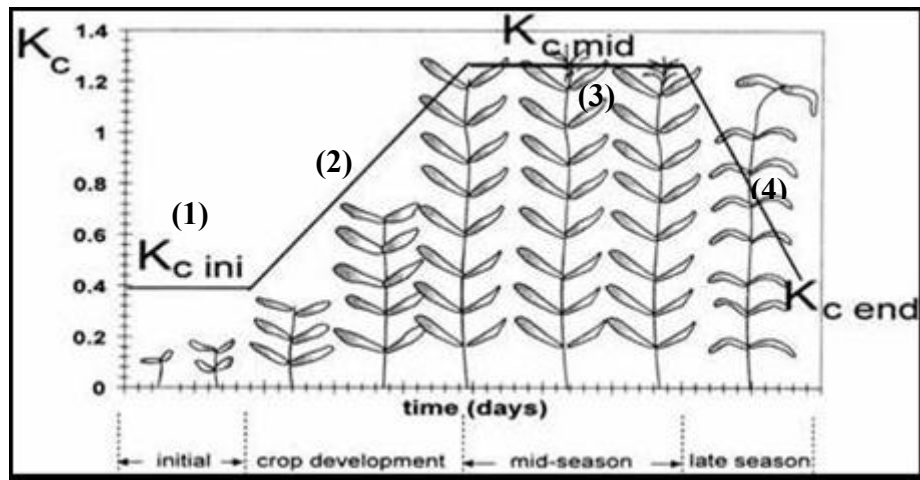


Figure 2. 2. Courbe représentative du coefficient cultural simple (Allen et al., 1998).

L'évolution du coefficient cultural  $K_C$  au cours du cycle d'une culture présente la forme d'une cloche similaire à celle de l'indice foliaire (LAI<sup>6</sup>) ou du taux de couverture du sol. La valeur du  $K_C$  est donc considérée comme constante durant la phase initiale où le sol est prédominant et pendant la phase de mi-saison où la couverture du sol par la culture est maximale. Les valeurs du  $K_C$  pendant les autres phases de croissance (2 et 4) sont obtenues par interpolation. Connaissant les valeurs du coefficient cultural de la phase initiale ( $K_{cini}$ ), de la mi-saison ( $K_{cmid}$ ), et de la récolte ( $K_{cend}$ ) d'une part, et les durées des périodes de croissance, d'autre part, nous pouvons obtenir pour une culture considérée la valeur du  $K_C$  à n'importe quel moment du cycle.

A noter que l'évolution du coefficient cultural de base ou coefficient de la transpiration ( $K_{cb}$ ) est similaire à l'évolution du coefficient cultural simple.

### Approche à coefficient cultural simple

Dans cette approche, l'effet de la transpiration de la plante et de l'évaporation du sol est confiné dans un seul coefficient. La procédure de calcul de l'évapotranspiration maximale  $ET_c$  consiste à :

<sup>6</sup> Leaf Area Index en anglais : la surface totale des feuilles par unité de surface au sol ( $m^2.m^{-2}$ )

- ✓ Identifier les phases de croissance de la culture et les durées correspondantes, et sélectionner les coefficients culturaux correspondants,
- ✓ Ajuster les coefficients culturaux pour les conditions climatiques durant les mêmes phases de croissance (Allen et al., 1998),
- ✓ Construire la courbe du coefficient cultural,  $K_c$ ,
- ✓ Calculer  $ET_c$  comme le produit de  $ET_0$  par  $K_c$ .

### Approche à coefficient cultural double

Cette approche consiste à diviser le coefficient cultural  $K_c$  en deux coefficients : Un pour la transpiration  $K_{cb}$  appelé coefficient cultural de base, et l'autre pour l'évaporation du sol  $K_e$  appelé coefficient d'évaporation:

$$ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_0 \quad \text{Equation 2. 2}$$

L'approche du coefficient cultural double est beaucoup plus compliquée et nécessite plus de calcul comparativement à l'approche simple. Deux termes sont nécessaires à déterminer pour estimer l'évapotranspiration maximale :  $K_{cb}$ ,  $K_e$ .

#### ❖ Coefficient cultural de base, $K_{cb}$

Ce coefficient est défini comme étant le rapport entre  $ET_c$  et  $ET_0$  lorsque la surface du sol est sèche et la culture est dans des conditions optimales (absence du stress hydrique). La procédure de calcul de ce terme est exactement similaire à celle du calcul du coefficient cultural simple.

#### ❖ Coefficient d'évaporation du sol, $K_e$

Le coefficient d'évaporation du sol  $K_e$  décrit la composante évaporation de  $ET_c$ . Quand le sol est mouillé suite à des précipitations ou à une irrigation le coefficient d'évaporation  $K_e$  est maximal, mais quand la surface du sol est sèche  $K_e$  est faible et tend à s'annuler.

L'évaporation de l'eau du sol sous un couvert végétal ou exposé à la radiation, est gouvernée par la quantité d'énergie disponible à la surface du sol. L'évaporation du sol est ainsi limitée par la fraction du sol exposée et mouillée  $f_{ew}$  qui, par son effet d'ombre sur le sol, intercepte la radiation solaire. Sous ces conditions,  $K_e$  est donné par l'équation suivante (Allen et al., 1998) :

$$K_e = K_r (K_{cmax} - K_{cb}) \leq f_{ew} \cdot K_{cmax} \quad \text{Equation 2. 3}$$

Avec :

$K_{c\max}$  : Valeur maximale de  $K_c$  obtenue à la suite d'une pluie ou d'une irrigation,

$K_r$  : Coefficient de réduction de l'évaporation du sol,

$f_{ew}$  : Fraction du sol exposée et mouillée.

Le calcul de  $K_e$  consiste à déterminer trois paramètres.

- La limite supérieure  $K_{c\max}$

Le coefficient  $K_{c\max}$  représente la limite supérieure de l'évaporation et la transpiration d'une culture donnée. Quand le sol est humide, l'évaporation du sol est maximale, le coefficient cultural  $K_c$  ne peut jamais dépasser cette valeur maximale  $K_{c\max}$ . Elle varie avec le climat et le type de la surface de référence. Quand cette dernière est le gazon  $K_{c\max}$  est donné par (Allen et al., 1998) :

$$K_{c\max} = \max \left[ \left\{ 1.2 + [0.04.(u_2 - 2) - 0.004.(R_{h\min} - 45)] \left( \frac{h}{3} \right)^{0.3} \right\}, \{K_{cb} + 0.05\} \right] \quad \text{Equation 2.4}$$

$u_2$  : Vitesse du vent à 2m,

$R_{h\min}$  : Humidité relative minimale,

$h$  : hauteur de la végétation,

- Le coefficient de réduction de l'évaporation du sol  $K_r$

Quand la surface du sol est humide,  $K_r$  est égal à 1, dès que la surface commence à sécher,  $K_r$  décroît jusqu'à s'annuler.  $K_r$  est donné par l'équation suivante (Allen et al., 1998) :

$$K_r = \frac{TEW - D_{e,i-1}}{TEW - REW} \text{ pour } D_{e,i-1} \geq REW \quad \text{Equation 2.5}$$

Avec :

$D_{e,i-1}$  : Profondeur cumulative de l'évaporation de la surface du sol pour le jour i-1,

TEW : Profondeur cumulative maximale de l'évaporation de la surface du sol quand  $K_r=0$ ,

REW : Eau facile à évaporer.

TEW est donné par l'équation suivante :

$$TEW = 1000(\theta_{fc} - 0.5\theta_{wp})Z_e \quad \text{Equation 2.6}$$

Avec :

$\theta_{fc}$  : Humidité du sol à la capacité du champ [ $m^3.m^{-3}$ ],

$\theta_{wp}$  : Humidité du sol au point de flétrissement [ $m^3.m^{-3}$ ],

$Z_e$  : Profondeur de la surface du sol qui subit l'évaporation [0.10-0.15m],

Le calcul de  $K_r$  nécessite un bilan hydrique au niveau de  $Z_e$  afin de déterminer  $D_{e,i}$  :

$$D_{e,i} = D_{e,i-1} - (P_i - RO_i) - \frac{I_i}{f_w} + \frac{E_i}{f_{ew}} + DP_{e,i} \quad \text{Equation 2.7}$$

Avec :

$D_{e,i-1}$  : Profondeur cumulative de l'évaporation de la surface supérieure du sol exposée et mouillée pendant le jour (i-1) [mm],

$D_{e,i}$  : Profondeur cumulative de l'évaporation de la surface supérieure du sol exposée et mouillée pendant la fin du jour i [mm],

$P_i$  : Précipitations pendant le jour i [mm],

$RO_i$  : Ruissellement pendant le jour i [mm],

$I_i$  : Irrigation pendant le jour i [mm],

$E_i$  : Evaporation du sol pendant le jour i [mm],

$DP_{e,i}$  : Percolation de la surface supérieure [mm],

- La fraction du sol exposée et mouillée  $f_{ew}$  :

Ce terme est donné par l'équation suivante (Allen et al., 1998) :

$$f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w) \quad \text{Equation 2.8}$$

Avec :

$1 - f_c$  : Fraction du sol exposée (non couvert par la végétation) [0.01-1],

$f_w$  : Fraction du sol mouillée par précipitation ou irrigation. Ce terme dépend du type d'irrigation. Pour une irrigation par gravitaire (cas dominant dans la plaine du Haouz), ce terme vaut 1. Pour l'irrigation localisée,  $f_w$  varie de 0.3 à 0.4.

### 2.2.3 Le coefficient du stress hydrique ( $K_s$ )

Le coefficient du stress hydrique ( $K_s$ ) agit sur le coefficient cultural global ou sur le coefficient cultural de base, selon l'approche utilisée. Si on utilise l'approche à coefficient cultural simple, l'évapotranspiration réelle est donnée par :

$$ETR = K_s \cdot K_c \cdot ET_0 \quad \text{Equation 2.9}$$

Si on utilise l'approche à coefficient cultural double, l'évapotranspiration réelle est donnée par :

$$ETR = (K_s \cdot K_{cb} + K_e) ET_0 \quad \text{Equation 2. 10}$$

La démarche de calcul du coefficient du stress est similaire à celle du calcul de l'évaporation du sol. Il nécessite aussi un bilan hydrique mais dans la zone racinaire au lieu de la surface supérieure du sol. Il est donné par l'équation suivante (Allen et al., 1998) :

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} = \frac{TAW - D_r}{(1-p)TAW} \quad \text{Pour } D_r > RAW ; K_s = 1 \text{ pour } D_r < RAW \quad \text{Equation 2. 11}$$

Avec :

$D_r$  : Epuisement de l'eau dans la zone racinaire, calculé par un bilan hydrique dans la zone racinaire,

La fraction de  $TAW$  que la plante peut extraire de la zone racinaire sans souffrir du stress hydrique est appelée l'eau facilement disponible ( $RAW$ ). Elle est donnée par :

$$RAW = pTAW$$

$TAW$  : Quantité d'eau totale disponible dans la zone racinaire. Elle dépend du type de sol et de la profondeur des racines, elle est donnée par l'équation suivante :

$$TAW = 1000 \left( \theta_{fc} - \theta_{wp} \right) Z_r \quad \text{Equation 2. 12}$$

Avec :

$Z_r$  : Profondeur des racines [m],

$p * RAW$ : La fraction de  $TAW$  qu'une plante peut extraire sans souffrir du stress hydrique.

Pour  $D_r < RAW$ ,  $K_s = 1$ .

La procédure générale de calcul de  $ET_c$  et  $ETR$  est résumée dans l'organigramme suivant :

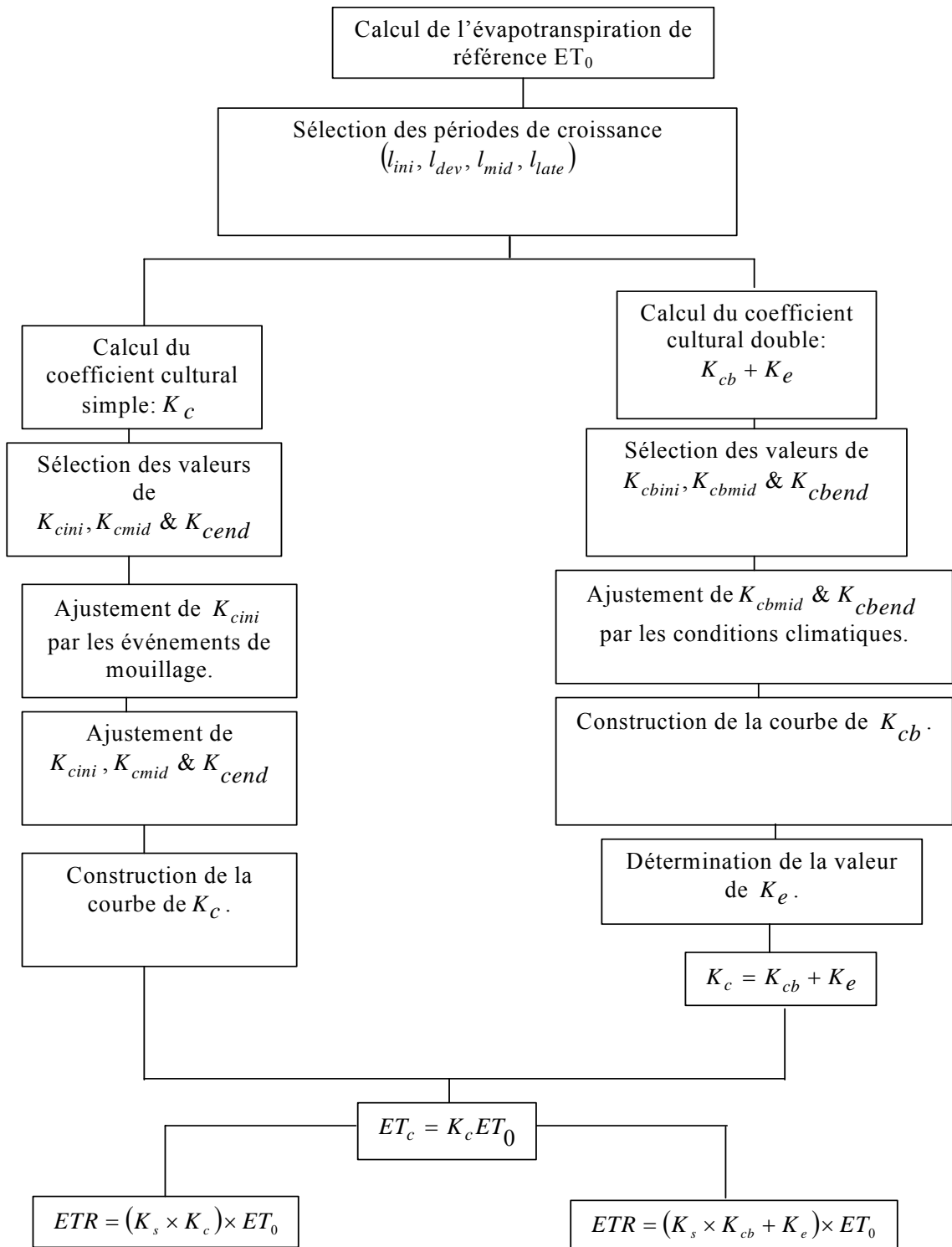


Figure 2. 3. Organigramme de calcul d'évapotranspiration maximale  $ET_c$  et réelle  $ETR$  par les deux approches du modèle FAO-56 (Allen et al., 1998).

### 2.2.4 Relation $K_{cb}$ -NDVI et $f_c$ -NDVI

Pour les cultures annuelles comme le cas du blé par exemple, l'évolution temporelle de l'indice de végétation (NDVI) est similaire au coefficient cultural de base ( $K_{cb}$ ) (Bausch et Neale, 1987; Neale et al., 1989; Hunsaker et al., 2005). Il est possible d'établir une relation entre ces deux paramètres. Effectivement, nous avons déterminé dans le cadre du projet SudMed une relation entre  $K_{cb}$  et NDVI pour le blé développé dans le bassin versant du Tensift (Er-Raki et al., 2007):

$$K_{cb} = 1.07 * \left[ 1 - \left( \frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^{\frac{0.84}{0.54}} \right] \quad \text{Equation 2. 13}$$

Avec

$NDVI_{min}$  et  $NDVI_{max}$  sont les valeurs minimale et maximale de NDVI relatives au sol nu et à la végétation en pleine de développement.

De même une relation entre le taux de couverture ( $f_c$ ) et NDVI a été établie (Er-Raki et al., 2007):

$$f_c = 1.18 * (NDVI - NDVI_{min}) \quad \text{Equation 2. 14}$$

Ces deux relations ont été combinées avec le modèle FAO-56 pour estimer les besoins en eau du blé (chapitre 3). Ceci va également nous permettre de développer une autre version du modèle FAO-56 basée sur des paramètres accessibles par la télédétection notamment les indices de végétation comme NDVI.

Après le développement des modèles physiques (le modèle FAO-56 pour notre étude) qui permettent d'estimer les besoins en eau des cultures, ils doivent être testés, calibrés et validés à l'aide des observations sur le terrain. D'où l'intérêt des campagnes de mesure effectuées dans le cadre du projet SudMed. Les cultures suivies sont: le blé, l'olivier et l'oranger.

## 2.3 Données expérimentales

Avant de présenter les jeux de données utilisées dans ce travail, nous présentons d'abord la région d'étude, sa situation géographique et ses caractéristiques climatiques...

### 2.3.1 Présentation de la région d'étude: bassin versant du Tensift Al Haouz

#### Situation géographique

Le bassin versant du Tensift est une vaste zone couvrant une superficie d'environ 22 000 km<sup>2</sup>, située au centre du Maroc (figure 2.4), constitué des ensembles suivants :

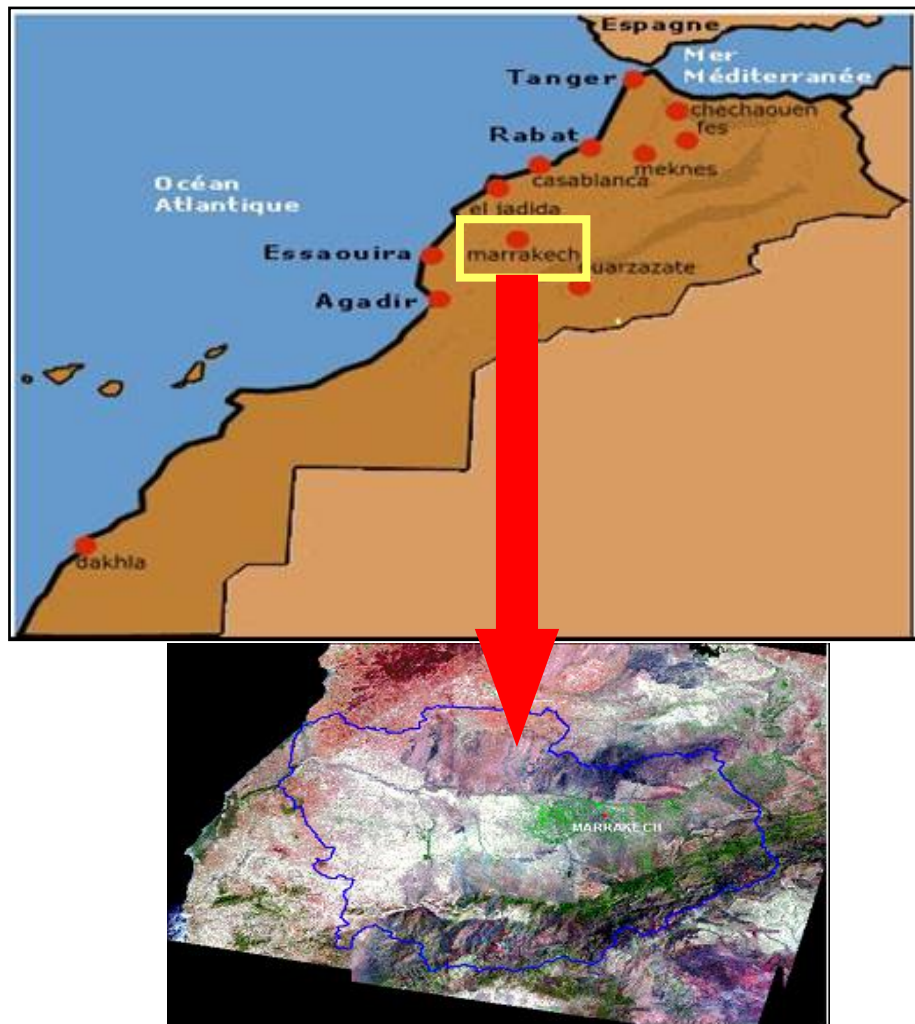


Figure 2. 4. Localisation du bassin versant du Tensift. La figure ci-dessous est une image composite couvrant l'ensemble du bassin versant du Tensift (capteur Thematic Mapper, satellite Landsat). Le trait bleu limite le bassin versant.

#### ❖ La plaine du Haouz

La plaine du Haouz est une vaste plaine de 6000 Km<sup>2</sup> de superficie qui s'étire sur une longueur d'environ 150 Km d'Est en Ouest (figure 2.5). La plaine est traversée du Sud vers le Nord par plusieurs oueds drainant les reliefs du Haut Atlas et rejoignant l'oued Tensift

(collecteur principal des eaux superficielles du bassin) au Nord. L'écoulement de l'oued Tensift se fait de l'Est vers l'Ouest avant de rejoindre l'océan atlantique.

Le relief de la plaine du Haouz est très peu marqué avec des pentes ne dépassant pas 5%. L'altitude est de 900 m au niveau des contreforts de l'Atlas et diminue progressivement vers le nord, pour atteindre environ 300 m au niveau de l'oued Tensift.

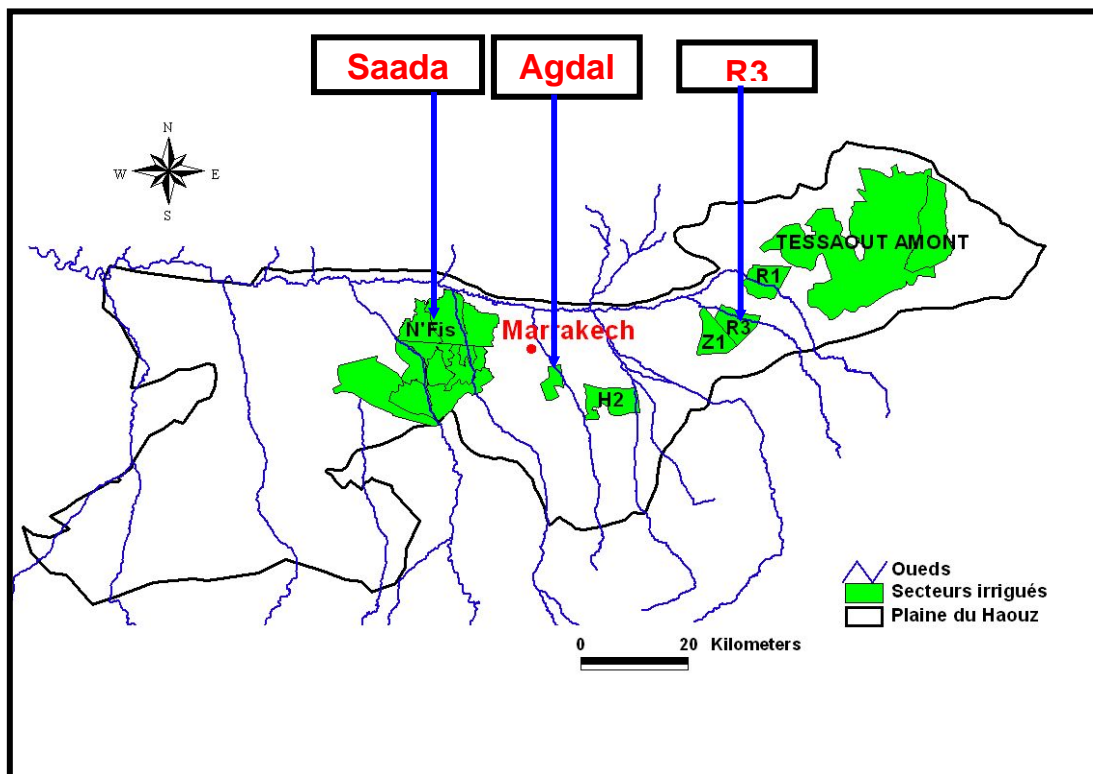


Figure 2. 5. Localisation de la plaine du Haouz ainsi que les trois sites d'étude : Agdal, R3 et Saada

L'occupation du sol conduit à distinguer deux grands types de paysage au sein de la plaine du Haouz :

- Le domaine irrigué de la plaine du Haouz : il se situe dans la partie orientale et centrale du Haouz, de la limite Est du bassin versant jusqu'à l'oued N'Fis, et se prolonge au sud jusqu'au piémont de l'Atlas au niveau de la vallée de l'Ourika. Outre les cultures annuelles (céréales, maraîchage), on rencontre de nombreuses cultures pérennes telles que l'olivier, les agrumes et l'abricotier. Nos trois sites d'étude se trouvent dans ce domaine (cf. figure 2.5).
- Le Haouz occidental: dans la partie occidentale du Haouz, seules quelques forages permettent l'irrigation. Les cultures principales (blé, orge) sont pluviales: on parle

généralement de zone Bour. L'absence d'irrigation dans cette partie du Haouz est liée à la faible disponibilité de la ressource en eau.

#### ❖ **Les chaînons des Jebilet**

Les Jebilets forment un massif situé au nord du Tensift sur une largeur de 20 à 30 Km du nord au sud. La végétation naturelle située sur les Jebilet est essentiellement constituée d'une steppe épars herbacée. Cette végétation spontanée ne représente cependant qu'une faible superficie suite à une exploitation intensive et à un développement important des surfaces cultivées. L'activité agricole prédominante dans les Jebilet est la culture pluviale de céréales (blé et orge) associée à quelques parcelles de maïs irriguées au nord du massif.

#### ❖ **Le Haut Atlas**

Le Haut Atlas est une chaîne de montagnes qui ferme la plaine du Haouz au sud. Les oueds situés sur ces versants drainent des sous bassins du Tensift. L'altitude croît très rapidement sur le versant nord de l'Atlas : sur une distance d'environ 35Km, on passe en effet de 900 m au niveau des piémonts à une altitude supérieure à 4000 m au sommet. A l'ouest, la transition plaine montagne est atténuée par l'existence de plateaux. Dans les montagnes du Haut Atlas, l'activité agricole est peu importante excepté dans les fonds de vallée où les cultures arbustives pérennes sont majoritaires avec une abondance d'oliviers, d'amandiers et de noyers.

Sur les versants, les reliquats de végétation naturelle sont constitués essentiellement de forêts qui se répartissent entre 2000 et 3000 m selon l'exposition des versants. Elles sont composées de chênes verts, de genévriers, de thuyas et d'une steppe d'altitude.

#### ❖ **Les plateaux d'Essaouira - Chichaoua**

Sur la bordure occidentale de la plaine du Haouz, s'étalent deux grands plateaux, le premier au nord du Tensift, bordant les Jebilets à l'est et possédant une altitude moyenne de 400 m. Le second qui s'étend au sud du Tensift se prolonge jusqu'aux piémonts de l'Atlas, son altitude est moins importante et son relief est moins marqué.

La végétation naturelle, constituée de steppes et de jujubiers au nord, cède progressivement du terrain aux cultures lorsque on se rapproche de la côte. Sous l'influence climatique océanique plus humide, les cultures de céréales (blé, orge et maïs) succèdent aux plantations d'oliviers plus à l'est. Plus au sud, près de la côte, s'étendent des forêts de genévriers, thuyas et arganiers.

#### ❖ **La région côtière**

Située au nord ouest du bassin versant du Tensift, cet ensemble correspond à l'embouchure de l'oued Tensift, son altitude ne dépasse pas 100 m au dessus du niveau de la mer. Cette zone bénéficie d'une pluviométrie importante du fait de l'influence océanique. Une mosaïque de parcelles cultivées constitue l'essentiel de l'occupation du sol avec essentiellement des cultures de blé et de maïs.

### **Les caractéristiques climatiques**

Le climat du bassin de Tensift est semi-aride caractérisé par une pluviométrie faible et irrégulière de 240 mm/an en moyenne. La température est très élevée en été (37.7°C en moyenne des maximas) et basse en hiver (4.9°C comme moyenne des minimas). La demande climatique ou l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  est très importante ( $ET_0 = 1600$  mm/an).

Ces caractéristiques climatiques limitent les possibilités d'amélioration et de diversification de la production agricole et montrent l'importance d'une gestion rationnelle des eaux de la région. Irriguées ou en pluviales, les cultures annuelles de blé et d'orge constituent les principales productions de céréales de la région et occupent environ 15000 Km<sup>2</sup>. Les rendements, de l'ordre de 15 Qt/ha, sont relativement faibles et variables d'une année à l'autre. La production fruitière totale est de 1.9 10<sup>6</sup> quintaux, dont près de la moitié provient des olives, des agrumes et des abricots. La forêt occupe une superficie de 6565 Km<sup>2</sup>, dont 5198 Km<sup>2</sup> de chêne vert et 1 475 Km<sup>2</sup> d'arganier.

### **Techniques d'irrigation**

L'irrigation gravitaire est le mode le plus répandu au Maroc en général et dans le périmètre irrigué du Haouz en particulier. La technique traditionnelle d'irrigation appelée "Robta" représente environ 90% des superficies irriguées en grande hydraulique. C'est une technique traditionnelle de montagne qui a été adaptée aux zones irriguées de la plaine. Ce mode d'irrigation consiste à laisser déborder la seguia (le canal quaternaire en terre), l'eau avance et inonde la parcelle. Cette méthode engendre la dégradation du nivellement et un gaspillage d'eau qui, à son tour, aboutit à un mauvais drainage qui cause la salinisation et l'alcalinisation des sols. Des mesures d'efficience ont montré que ce système conduit à des pertes d'eau d'environ 50% au niveau de la parcelle.

Dans le cadre de la politique de l'état pour la promotion de techniques modernes d'irrigation, l'irrigation localisée connaît un développement constant. La superficie équipée en irrigation localisée a été augmentée de 6720 ha en 2001 à 11688 ha en 2005, dont la majorité concerne l'arboriculture fruitière, notamment les agrumes.

### 2.3.2 Le dispositif expérimental

Notre étude s'est focalisée sur trois cultures : deux cultures arborées (olivier et oranger) et une culture annuelle (blé). Ces trois cultures ont été choisies pour leur prédominance dans la région de Tensift Al Haouz. Trois parcelles de blé ont été suivies durant la campagne agricole 2002/2003. Une parcelle d'oliviers a fait l'objet de notre étude durant l'année 2003 et 2004. Pour l'oranger, une parcelle irriguée par goutte à goutte a été suivie durant les années 2004 et 2005, d'autre parcelle d'oranger irriguée par le mode gravitaire comme le blé et l'olivier a été suivie durant l'année 2005.

#### Description des sites expérimentaux

Les expériences ont été réalisées sur trois sites expérimentaux. Le premier site programmé dans le cadre du projet SudMed est le jardin d'**Agdal** qui se trouve au sud de Marrakech. La parcelle choisie contient des oliviers et entourée par d'autres parcelles d'oliviers et d'agrumes. Le deuxième site nommé **R3** situé à 40 km à l'Est de Marrakech dont le blé est la principale culture cultivée. Le troisième site s'appelle **Saada**, planté en oranger. Le positionnement de ces trois sites d'étude est indiqué dans la figure 2.5.

##### ❖ Site de l'olivier

L'étude s'est déroulée à la ferme du Domaine Royal Agdal. Elle s'étale sur une superficie de 515 ha dont 275 ha plantés en oliviers et entourée de parcelles d'agrumes. Le site choisi contient deux parcelles (Nord et Sud) d'oliviers d'hétérogénéité contrastée, de point de vue hauteur de végétation, longueur de rugosité, strate inférieure, et taux de recouvrement (figure.2.6). Dans cette étude, nous nous sommes intéressés uniquement à la parcelle sud pour laquelle nous disposons de mesures étalées sur deux années 2003 et 2004. Ces mesures nous ont permis de calibrer et de valider notre modèle.



Figure 2. 6. Le site d'olivier d'Agdal (site Sud et site Nord) vu par une image Quickbird.

La majorité des arbres d'oliviers est âgée de 250 ans, certains entre eux sont morts et remplacés par de jeunes arbres. On trouve alors différents types d'arbres d'oliviers : des gros arbres ayant un seul tronc, des arbres ayant plusieurs troncs et des jeunes arbres. En première approximation, les arbres sont plantés tous les 6 x 6 mètres, leur hauteur est de l'ordre de 6 mètres, leur taux de recouvrement est de 60%. La strate inférieure (herbacée) est globalement peu développée mais très hétérogène. Les arbres sont périodiquement irrigués par la technique gravitaire (figure.2.7). Chaque arbre est entouré d'un petit bassin rempli d'eau. La quantité d'irrigation estimée pour chaque apport est de l'ordre de 100 mm. La texture du sol est sableux-argileux (44% en sable, 30% en argile et 26% en limon).



Figure 2. 7. La technique d'irrigation des oliviers d'Agdal (gravitaire).

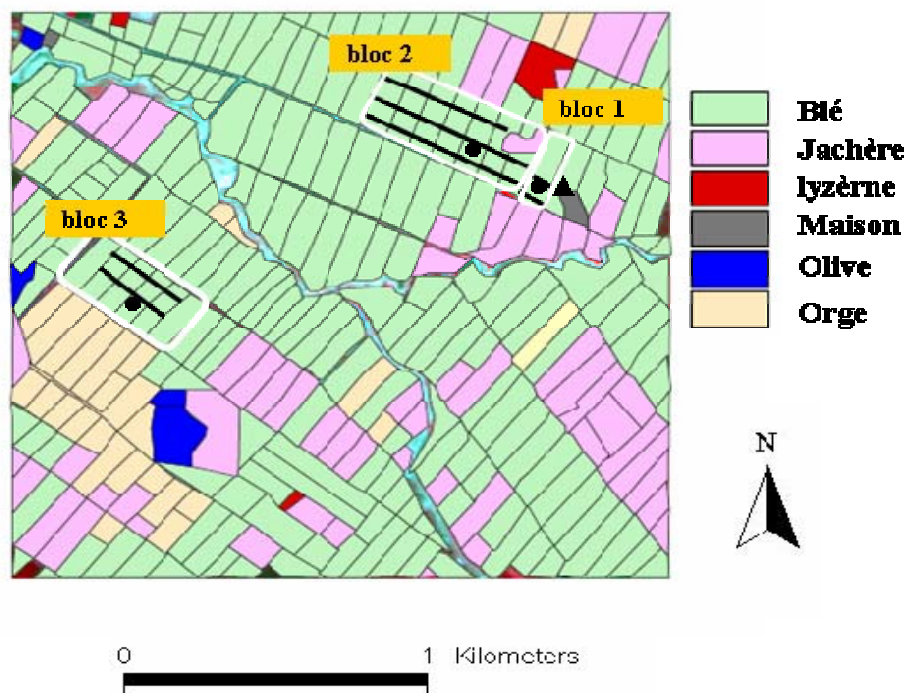
### ❖ Site de l'oranger

Deux sites d'oranger ont été suivis durant l'année 2004 et l'année 2005. Ces deux sites sont situés à Saada dans le périmètre irrigué de N'Fis. Le premier site nommé Saada 1 est caractérisé par une densité de peuplement élevée (5m x 3m) et irrigué par la technique de goutte à goutte alors que le deuxième site nommé Saada 2 est de faible densité (7m x 7m) et irrigué par le gravitaire avec une quantité de l'ordre de 40 mm pour chaque apport. Les deux sites sont plantés de mandarines (~15 ans, variété Nour). Les arbres d'oranger du Saada 1 ont des tailles pratiquement similaires et une géométrie particulière; la plupart de la masse foliaire se trouve à la surface de la couronne. Les arbres sont taillés de manière à faciliter la pénétration de la lumière à l'intérieur de la canopée. Pour le deuxième site, l'hétérogénéité est clairement observée du point de vue taille d'arbres et il y a même absence d'un certain nombre de pieds. Les mesures ont été faites au cours de l'année 2004 et 2005 pour Saada 1 et au cours de l'année 2005 pour Saada 2. Quant au sol, il est caractérisé par une texture sableu-limoneuse pour les deux sites (12% en argile, 38% en limon, 28.7% en sable fine, 22% en sable grossier).

### ❖ Site du blé

Le site choisi est un secteur irrigué nommé R3, situé à 40 km Est de Marrakech. Ce site s'étale sur une superficie de 2800 ha dont la majorité est utilisée pour la production de céréales (1550 ha en 2002/03 et 1750 ha en 2003/04). Ce secteur a été aménagé par l'ORMVAH (Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Haouz) depuis 1999. L'ORMVAH avec ses centres locaux et les associations des agriculteurs gèrent conjointement le fonctionnement de l'agriculture dans ce secteur, notamment la programmation de l'irrigation. Le nombre de tour d'irrigation est fonction du taux de remplissage des barrages. A chaque tour, les agriculteurs reçoivent un volume d'eau en fonction de la superficie exploitée. L'agriculteur a le droit d'utiliser la totalité du volume d'eau lui attribué pour une partie de son exploitation. L'eau d'irrigation est acheminée depuis les barrages par un canal principal qui aboutit à deux prises primaires. Ensuite, un réseau de canaux aériens secondaires et tertiaires acheminent l'eau jusqu'aux parcelles. La surface totale de la zone est découpée en blocs divisés eux même en 6 parcelles rectangulaires de 4 à 5 ha chacune. L'occupation du sol relevée sur le terrain dans un carré de 3x3 km<sup>2</sup> (cf. figure 2.8) a montré que le blé est majoritaire pour la saison 2002/03 (environ 60% du total de la zone). Au cours de la même saison, trois champs de blé (figure 2.8) ont été suivis d'une manière intensive (mesure des principales variables des bilans hydriques et énergétiques au pas de temps demi-horaire). Les

mesures relevées dans ces trois champs vont servir, par la suite, à la calibration et à la validation du modèle FAO-56 à coefficient cultural double (cf. chapitre. 3) d'une part, et à la validation de la spatialisation de ce modèle par les données satellites d'autre part (cf. chapitre. 4). La texture du sol de ces trois champs est argileux-limoneux (46% en argile, 34% en limon et 20% en sable). A noter que le sol est homogène sur toute la zone R3.



**Figure 2. 8. Localisation de trois champs de blé (limités par des rectangles blancs) suivis durant la saison agricole 2002/03. La station météorologique (triangle noir) et les tours de mesure de flux (disques noirs) sont présentées. Des mesures de reflectances à l'aide d'un radiomètre portable multispectral (Crop Scan, MSR87) ont été faites le long des trajets (lignes solides et noires) sur chaque 10 mètres.**

### Mesures expérimentales

Chaque site de notre étude (blé, olivier et oranger) a été équipé de tours de mesures et de fosses sol pourvues de capteurs électroniques pour le suivi des principaux termes des bilans hydrique et énergétique au pas de temps demi-horaire (figures 2.9 a-c): flux conductifs, radiatifs et convectifs dans le système sol-plante-atmosphère. Une station météorologique classique pour la mesure des données climatiques (Température, Humidité, Vent, Rayonnement global) a été installée dans chaque site. Les différents paramètres mesurés ainsi que les instruments de mesure associés sont résumés dans le Tableau 2.1. La calibration de ces instruments de mesure avec leurs principes de fonctionnement a été présentée en détail dans un rapport de stage effectué dans le même cadre du projet SudMed (El Guezar et Lahmadi, 2003).

**Table 2. 1. Les différents paramètres mesurés ainsi que les instruments de mesure utilisés.**

<b>Paramètre</b>	<b>Instrument de mesure</b>
<b>Climat</b>	
Rayonnement solaire global (Rg)	Pyranomètre CM3, Radiomètre CNR1
Rayonnement net (Rn)	Radiomètre Net REBS Q6 et Q7, Radiomètre CNR1
Température de l'air (Ta)	HMP45C, Vaisala
Humidité Relative de l'air (HR)	HMP45C, Vaisala
Vitesse du vent (U)	Anémomètre, A100R
Précipitations (P)	Rain gauge, FSS500
<b>Sol</b>	
Température dans le sol (Ts)	Thermistances CTN
Humidité dans le sol (teta)	TDR (Time Domain Reflectometry), théta probe, gravimétrie
Flux conductif dans le sol (G)	Plaquette de flux HPF01
<b>Flux</b>	
Flux de chaleur sensible (H)	Anémomètre sonique CSAT3, anémomètre Ultrasonique modèle 81000
Flux de chaleur latente (LE)	Open-path infrared gas analyzer (Li7500, Licor Inc.), Krypton
Transpiration (le cas de l'olivier)	Flux de la sève (HRM, Heat Ratio Method)
<b>Végétation</b>	
Température de végétation (Tv)	Thermo radiomètre infrarouge
Fraction du couvert (fc)	Photo hémisphérique
Indice foliaire (LAI, Leaf Area Index)	Allométrie (mesure des surfaces des feuilles)
Indice de végétation (NDVI)	Radiomètre portable multi spectrale (Crop Scan, MSR87)



**Figure 2. 9. a. Photographie du site d'olivier avec la tour des instruments.**



**Figure 2. 9. b. Photographie du site du blé avec la tour des instruments.**



**Figure 2.9. c. Photographie du site d'orangers avec la tour des instruments.**

En plus des mesures météorologiques, des mesures de flux et des mesure relatives au sol (humidité, température...), des mesures de reflectances à différentes longueurs d'onde à l'aide d'un radiomètre portable multi spectrale (Crop Scan, MSR87) (figure 2.10), de phénologie (stades de développement, indice foliaire ou LAI, rendement...) et d'itinéraire technique (semis, irrigation...) ont été collectées aussi pour plusieurs parcelles de blé (Duchemin et al., 2006; Er-Raki et al., 2007).

De même pour les oliviers, des mesures de flux de la sève ont été faites pour estimer la transpiration des arbres dont l'objectif est de valider la partition du flux d'évapotranspiration estimée par l'approche double du modèle FAO-56 d'une part et d'évaluer l'efficience de l'irrigation gravitaire d'autre part. Rappelons qu'il y a trois principales méthodes de mesure de flux de sève à savoir: la méthode de TDP (Thermal Dissipation Probe, Granier, 1985; 1987), la méthode basée sur le bilan d'énergie (Energy or Heat Balance, Dynagage, Sakuratani, 1981; Baker and Van Bavel, 1987) et la méthode Heat Pulse Velocity (HPV) (Marshall 1958; Edwards et al., 1996). Dans notre cas, nous avons utilisé une méthode appelée HRM (Heat Ratio Method, Burgess et al., 2001) (Figure 2.11). Cette méthode est une modification de la méthode HPV. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet d'estimer les faibles flux de la sève. Une description détaillée de cette méthode a été présentée dans l'annexe B et dans Williams et al. (2004). L'installation des sondes de mesure de flux de la sève a été faite dans 8 arbres: 4 arbres ayant un seul tronc et 4 autres ayant plusieurs troncs. Dans chaque arbre nous avons installé deux sondes. Le choix de ces arbres n'est pas au hasard, mais ils sont les arbres qui contribuent au maximum de flux de l'eddy covariance. Ceci nous a permis de faire une comparaison correcte entre les composantes mesurées par la technique du flux de la sève et celle de l'eddy covariance.

### **Données satellites**

Une série d'images a été collectée durant la saison agricole du blé 2002/2003. Cette série d'images provient du capteur LandSat7-ETM+, SPOT4-HRVIR et SPOT5-HRG avec une différence dans la résolution spatiale et une différence dans la répétitivité temporelle. Ces données sont constituées de 20 images à haute résolution d'une même scène de 160 x 160 pixels<sup>7</sup> sur le site test (3x3 km<sup>2</sup>). Chaque image contient des canaux rouge (0.58-0.68  $\mu\text{m}$ ) et proche infrarouge (0.725-1.11  $\mu\text{m}$ ) qui permettent de déterminer le paramètre Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

---

<sup>7</sup> Un pixel correspond au plus petit élément d'une surface d'affichage auquel on puisse associer individuellement une couleur (ou un niveau de gris) et une intensité.



**Figure 2. 10. La mesure des reflectances du blé à l'aide d'un radiomètre portable multi spectral (Crop Scan, MSR87).**



**Figure 2. 11. La mesure du flux de sève par la méthode HRM (Heat Ratio Method).**

Ces scènes couvrent la période du 07 Novembre 2002 au 20 Juin 2003, qui couvre la période de la saison agricole du blé d'hiver au Maroc. Dix images parmi les 20 sont nuageuses ou n'ont pas pu être corrigées des effets atmosphériques.

En effet, le rayonnement capté au niveau du satellite est perturbé en traversant l'atmosphère et il est nécessaire de procéder à des corrections. Celles-ci ont été faites en se basant sur les données acquises au sol avec le radiomètre CropScan (Helson, 2003). Le tableau suivant présente les dates d'acquisition des 10 images utilisées avec la résolution spatiale.

**Table 2. 2. Dates d'acquisition des différentes images utilisées, avec leurs résolutions spatiales**

<b>N° d'image</b>	<b>Satellite</b>	<b>Date d'acquisition</b>	<b>Résolution Spatiale</b>
<b>Image 1</b>	LANDSAT TM7	07-Nov-02	30 m
<b>Image 2</b>	LANDSAT TM7	25-Déc-02	30 m
<b>Image 3</b>	LANDSAT TM7	26-Jan-03	30 m
<b>Image 4</b>	LANDSAT TM7	11-Fév-03	30 m
<b>Image 5</b>	SPOT4	04-Mar-03	20 m
<b>Image 6</b>	SPOT4	25-Mar-03	20 m
<b>Image 7</b>	SPOT4	26-Avr-03	20 m
<b>Image 8</b>	LANDSAT TM7	18-Mai-03	20 m
<b>Image 9</b>	SPOT5	26-Mai-03	10 m
<b>Image 10</b>	SPOT5	20-Juin-03	10 m

**CHAPITRE 3 : APPLICATION DU MODELE  
FAO-56 POUR ESTIMER LES BESOINS EN  
EAU DE TROIS CULTURES DOMINANTES  
(BLE, OLIVIER ET ORANGER) DANS LE  
BASSIN DE TENSIFT AL HAOUZ**

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats relatifs à la détermination de l'évapotranspiration réelle de trois cultures: le blé, l'olivier et l'oranger. Le calcul de l'évapotranspiration est basé sur le modèle FAO-56. Les coefficients culturaux correspondants à ces trois cultures sont aussi déterminés. Ils sont très utiles pour la gestion de l'eau d'irrigation.

Ce chapitre est divisé en trois sections. Dans chaque section nous présenterons les résultats obtenus pour chaque culture. La première section décrit les résultats obtenus par trois approches basées sur le modèle FAO-56 à coefficient cultural double pour estimer l'évapotranspiration de la culture du blé. Dans la deuxième section, le modèle FAO-56 est appliqué pour estimer les besoins en eau de l'olivier. Nous avons aussi testé dans cette partie l'approche à coefficient cultural double afin de voir la partition du flux de l'évapotranspiration. Cette partition a été validée à l'aide des mesures de flux de la sève. Enfin, nous présenterons dans la troisième section l'évapotranspiration réelle de deux parcelles d'orangers irriguées différemment (gravitaire et goutte à goutte), par la méthode de la FAO-56 et nous avons évalué l'effet du type d'irrigation sur les coefficients culturaux. Dans cette section, nous avons aussi quantifié les pertes en eau par évaporation du sol liées à la technique d'irrigation gravitaire.

### 3.2 Application du modèle FAO-56 pour estimer les besoins en eau du blé

Dans cette section, nous allons présenter les résultats relatifs à la détermination de l'évapotranspiration réelle de trois champs de blé ayant différents itinéraires techniques (date de semis, apport d'eau...), à l'aide de trois méthodes basées sur le modèle FAO-56 à coefficient cultural double. Ces trois approches diffèrent par la méthode de calcul du coefficient cultural de base  $K_{cb}$  et par la fraction du couvert  $f_c$ . La première approche notée « No-Calibration method » utilise les valeurs de  $K_{cb}$  issues du tableau 17 du manuel FAO-56 (Allen et al., 1998). La fraction du couvert est calculée en fonction de  $K_{cb}$  (équation 76 dans FAO-56). La deuxième méthode notée « Local-Calibration method » utilise les valeurs de  $K_{cb}$  et  $f_c$  dérivées de mesures locales. La dernière méthode notée « NDVI-Calibration method » utilise les mesures au sol du terme

NDVI pour estimer  $K_{cb}$  et  $f_c$  (Eqs. 2.13 et 2.14). Rappelons que NDVI « Normalized Difference Vegetation Index » est un indice de végétation qui permet de caractériser la quantité de végétation présente, son activité photosynthétique et sa verdure. Nous allons comparer aussi les performances de chaque méthode dans l'estimation de l'évapotranspiration en se basant sur la technique de l'eddy covariance.

### 3.2.1 Comparaison de $f_c$ et $K_{cb}$ estimés par les trois méthodes

Les figures 3.1 et 3.2 présentent respectivement l'évolution de la fraction du couvert  $f_c$  et du coefficient cultural de base  $K_{cb}$  pour les trois champs de blé, calculés par les trois méthodes. D'après la figure 3.1, nous constatons que les valeurs de  $f_c$  estimées par la méthode 1 durant la phase initiale sont nulles pour tous les champs de blé. Ceci est normale puisque les valeurs de  $K_{cb}$  sont prises égales à  $K_{cmin}$  durant cette phase. Nous constatons aussi que les valeurs maximales de  $f_c$  varient d'une méthode à l'autre et d'un champs à l'autre. Par exemple pour la méthode 2, les valeurs maximales de  $f_c$  sont respectivement 0.82, 0.72 et 0.94 pour les champs 1, 2 et 3. Ceci est due aux itinéraires techniques qui sont différents d'un champ à l'autre (date de semis, quantité d'irrigation, fertilisation...). De même pour le coefficient cultural de base  $K_{cb}$ , il varie d'une méthode à l'autre (figure 3.2). La valeur maximale de  $K_{cb}$  qui correspond à la phase mi-saison estimée par la méthode 1 est supérieure à celle estimée par les deux autres méthodes. Rappelons que la méthode 1 utilise les valeurs de  $K_{cb}$  du blé données dans le document FAO-56 (Table 17). Une utilisation directe des coefficients culturaux donnés dans ce document surestime (dans notre cas) ou sous estime les besoins en eau des cultures. Dans le paragraphe suivant, nous allons présenter une comparaison entre les trois méthodes dans l'estimation des besoins en eau (l'évapotranspiration).

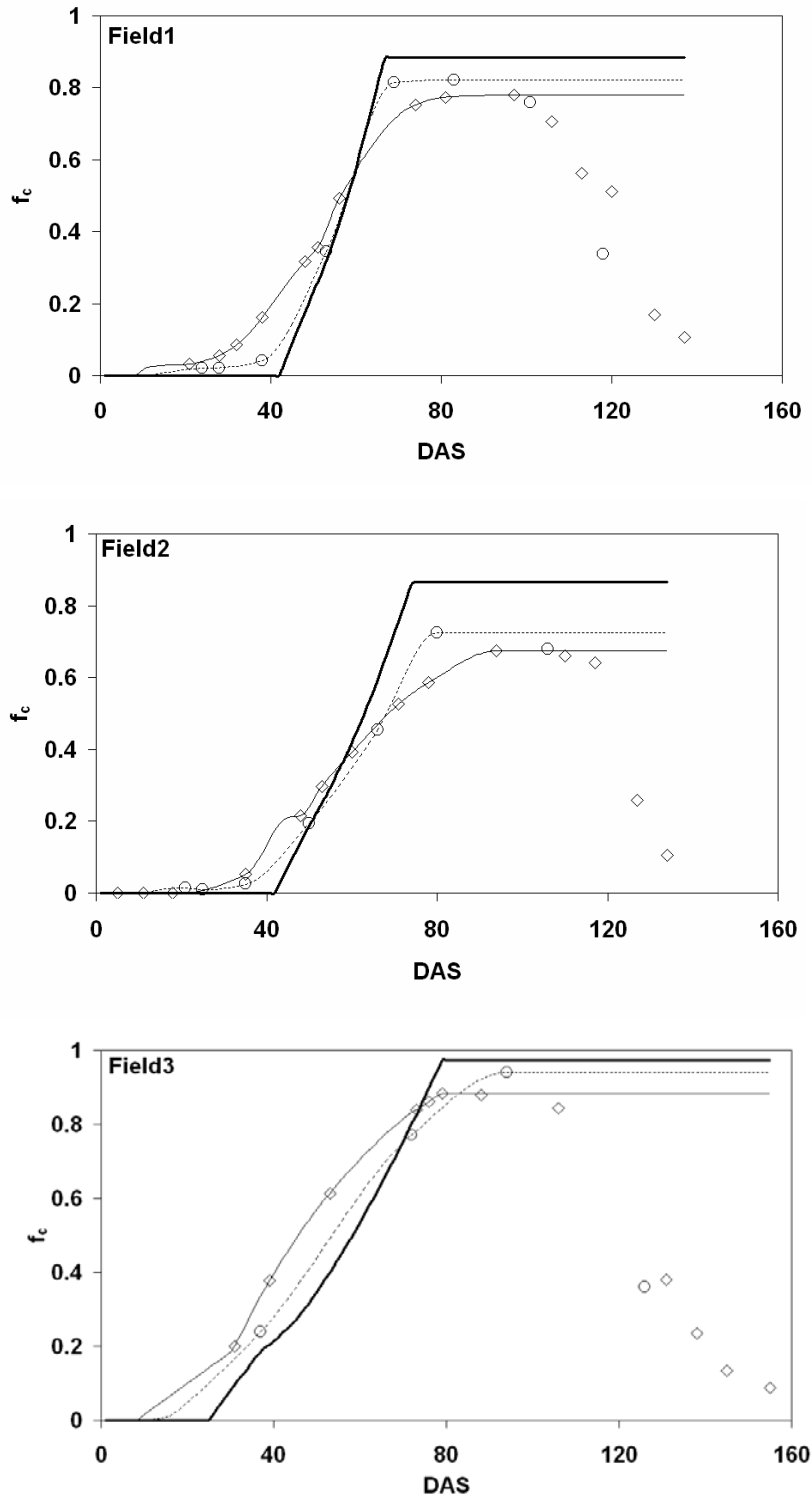


Figure 3. 1. Évolution de la fraction du couvert  $f_c$  pour les trois champs de blé, calculée par les trois méthodes: méthode 1 (ligne solide épaisse), méthode 2 (ligne discontinue) et méthode 3 (ligne solide mince). Les valeurs de  $f_c$  dérivées à partir des photos hémisphériques (cercles) et celles dérivées à partir de NDVI (losange) sont présentées. A noter que dès que  $f_c$  atteint son maximum, il reste constant et égal à ce maximum. DAS signifie la date after la semis.

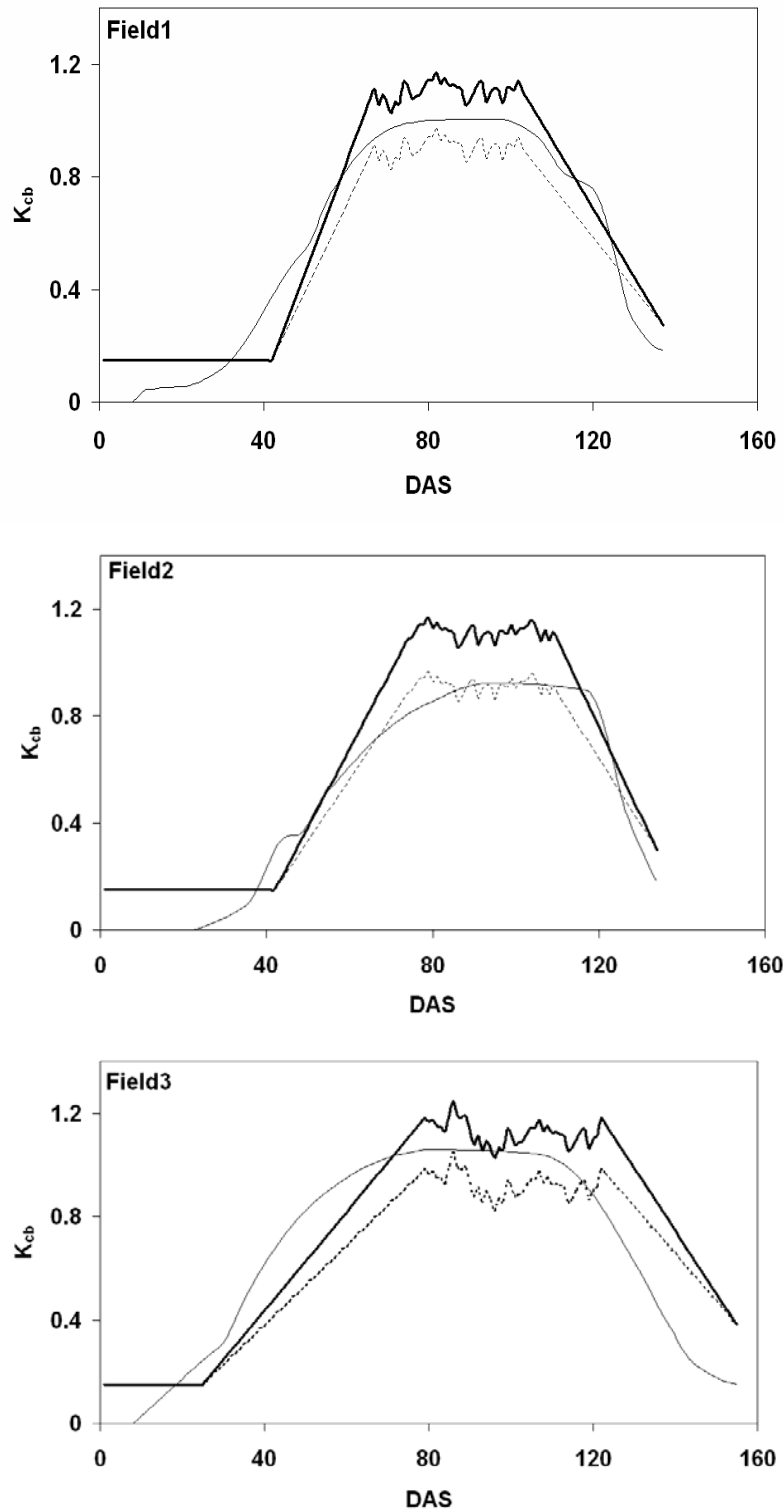


Figure 3. 2. Évolution du coefficient cultural de base  $K_{cb}$  pour les trois champs de blé, calculée par les trois méthodes: méthode 1 (ligne solide épaisse), méthode 2 (ligne discontinue) et méthode 3 (ligne solide mince).

### 3.2.2 Comparaison de l'évapotranspiration estimée par les trois méthodes

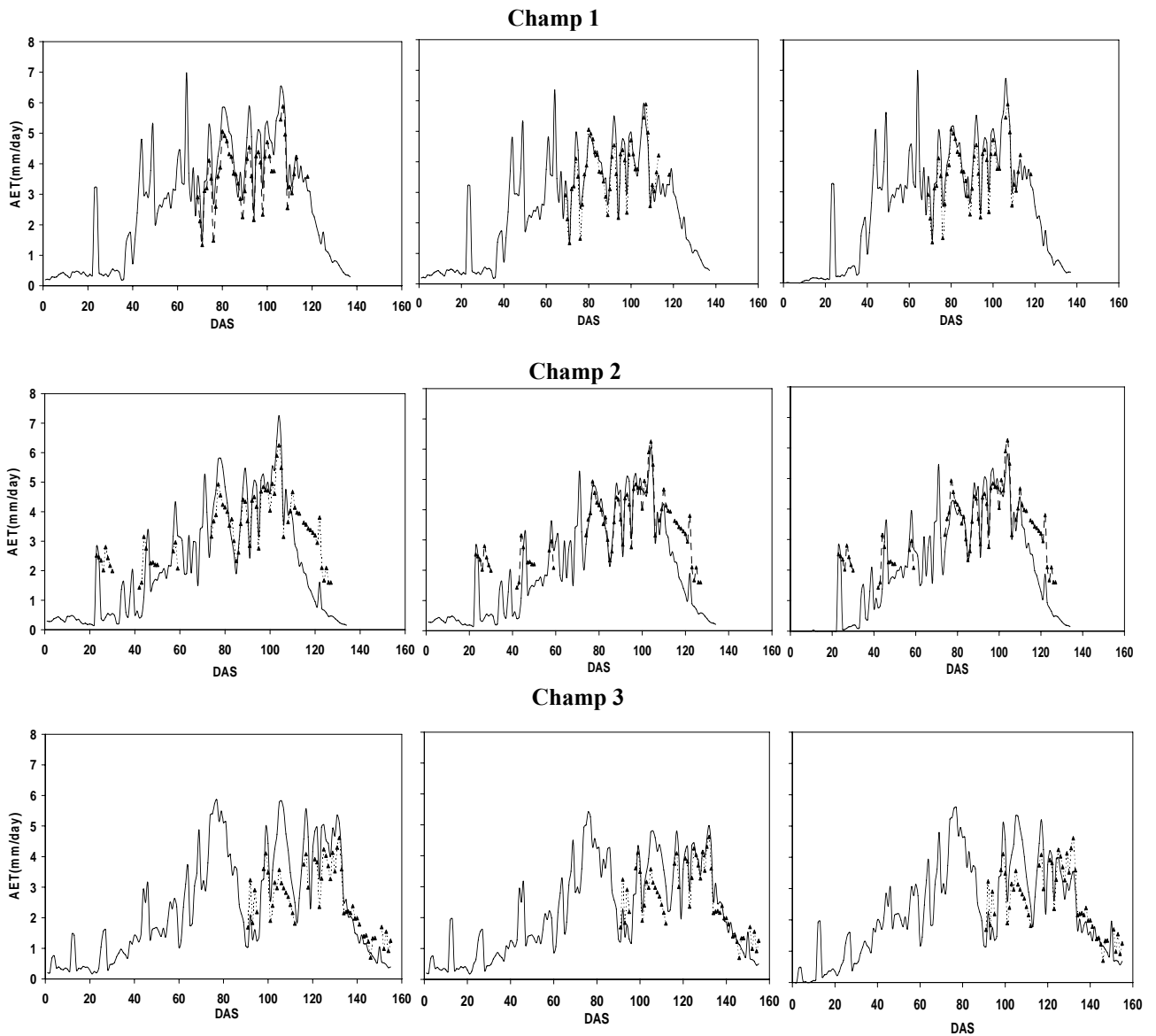
Avant de comparer l'évapotranspiration réelle (ETR) estimée par les trois méthodes, nous discutons d'abord la performance de chaque méthode. Pour cela, nous comparons l'évapotranspiration estimée par chaque méthode et pour chaque champ de blé avec celle mesurée par la technique de l'eddy covariance. La comparaison entre ETR simulée et celle mesurée a été présentée dans la figure 3.3. On constate que la méthode 1 surestime l'ETR pour les trois champs. Une surestimation de l'ordre de 16, 10 et 17% pour les champs 1, 2 et 3 respectivement. Cette surestimation n'est pas acceptable en comparant ces résultats avec ceux obtenus par d'autres travaux (e.g. Allen et al., 2000) dont lesquels ils ont trouvé une surestimation de l'ordre de 6%. De ce fait, une calibration et une validation de l'approche double du modèle FAO-56 est nécessaire (méthode 2). Après calibration, le modèle FAO-56 donne des résultats acceptables pour l'estimation de ETR (figure 3.3). Le tableau 3.1 résume les différents paramètres statistiques qui permettent d'analyser la performance de chaque méthode à savoir: le Root Mean Square Error (RMSE), l'EfficiencE, le Mean Bias Error (MBE). D'après ce tableau, nous constatons que la méthode 2 est la méthode qui donne une bonne estimation de l'évapotranspiration pour les trois champs de blé. Les valeurs du RMSE sont les plus petites, et l'efficiencE (E) est la plus proche de la valeur 1. Ceci est tout à fait normale puisque la méthode 2 utilise des valeurs de  $f_c$  et  $K_{cb}$  dérivées localement. Elle utilise les valeurs de  $K_{cb}$  dérivés à partir des mesures réelles de l'évapotranspiration.

Comme l'approche à coefficient cultural double simule séparément l'évaporation du sol et la transpiration de la plante, et dans le but de comparer les différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration, il est plus commode de comparer les deux composantes de l'évapotranspiration estimées par chaque méthode. Le cumul de ETR ainsi que ses composantes, déterminées par chaque méthode et pour chaque champ de blé, sont présentées dans le tableau 3.2. Comme il est indiqué dans ce tableau, la différence entre ETR estimée par chaque méthode est due aux deux composantes de l'évapotranspiration. L'évaporation du sol (SE) varie d'un champ à l'autre selon la méthode utilisée. La différence de l'évaporation du sol d'un champ à l'autre est due principalement aux apports d'eau. Le champ 1 qui est le mieux irrigué (6 apports d'irrigation) a une évaporation du sol la plus élevée par rapport aux autres champs. Aussi la

différence entre les valeurs de l'évaporation du sol est due à la fraction du couvert  $f_c$  (cf. Eqs. (2.3) et (2.8)).

De même, le cumul de la transpiration (CT) varie d'une méthode à l'autre et d'un champ à l'autre. La variabilité inter-champ de la transpiration est due essentiellement à la durée du cycle. En effet, le blé de champ 3 qui a été semé précocement a une transpiration plus grande que les autres champs. Le cumul de la transpiration simulée par la méthode 2 est inférieur à celui estimé par la méthode 1 d'une quantité d'environ 30 mm. Ceci est dû au fait que la valeur de  $K_{cb}$  dans la phase mi-saison est réduite de la valeur 1.1 pour la méthode 1 à la valeur 0.9 pour la méthode 2. La méthode 3 qui donne une valeur nulle de  $K_{cb}$  durant la phase initiale entraîne une différence dans l'estimation de la transpiration.

Un autre paramètre qui a un effet direct sur la transpiration est le coefficient du stress hydrique  $K_s$  (cf. eq. 2.10- chapitre 2). Ce paramètre est une autre source de la variabilité de la transpiration estimée par les différentes méthodes. En effet, l'éapotranspiration simulée (ETR) intervient dans le calcul de  $K_s$ , et comme ETR varie d'une méthode à l'autre, il est évident que  $K_s$  varie aussi d'une méthode à l'autre et par conséquent la transpiration.



**Figure 3. 3. Comparaison entre l'évapotranspiration ETR mesurée (triangles sur une ligne discontinue) par la technique d'eddy covariance et celle simulée (line continue) par trois methodes: No-Calibration (à gauche), Local-Calibration (centre) et NDVI-Calibration (à droite) pour trois champs de ble: champ 1 (figures en haut), champ 2 (figures au milieu) et champ 3 (figures en bas)**

**Table 3. 1. Analyse statistique de l'évapotranspiration réelle estimée par les trois méthodes pour chaque champ de blé.**

	<b>Statistical parameters</b>	<b>Field 1</b>	<b>Field 2</b>	<b>Field 3</b>
<b>No-Calibration</b>	<b>n</b>	<b>45</b>	<b>71</b>	<b>56</b>
	<b>slope</b>	<b>1.05</b>	<b>1.47</b>	<b>1.53</b>
	<b>Y-intercept</b>	<b>0.42</b>	<b>-1.98</b>	<b>-0.99</b>
	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0.87</b>	<b>0.74</b>	<b>0.78</b>
	<b>RMSE</b>	<b>0.74</b>	<b>1.15</b>	<b>1.05</b>
	<b>MBE</b>	<b>0.61</b>	<b>-0.38</b>	<b>0.40</b>
	<b>E</b>	<b>0.44</b>	<b>-0.11</b>	<b>-0.09</b>
<b>Local-Calibration</b>	<b>n</b>	<b>45</b>	<b>71</b>	<b>56</b>
	<b>slope</b>	<b>0.86</b>	<b>1.11</b>	<b>1.18</b>
	<b>Y-intercept</b>	<b>0.64</b>	<b>-0.73</b>	<b>-0.25</b>
	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0.82</b>	<b>0.65</b>	<b>0.76</b>
	<b>RMSE</b>	<b>0.45</b>	<b>0.99</b>	<b>0.75</b>
	<b>MBE</b>	<b>0.16</b>	<b>-0.53</b>	<b>0.24</b>
	<b>E</b>	<b>0.79</b>	<b>0.17</b>	<b>0.44</b>
<b>NDVI-Calibration</b>	<b>n</b>	<b>45</b>	<b>71</b>	<b>56</b>
	<b>slope</b>	<b>0.96</b>	<b>1.25</b>	<b>1.11</b>
	<b>Y-intercept</b>	<b>0.47</b>	<b>-1.37</b>	<b>-0.20</b>
	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0.86</b>	<b>0.73</b>	<b>0.64</b>
	<b>RMSE</b>	<b>0.51</b>	<b>1.01</b>	<b>0.86</b>
	<b>MBE</b>	<b>0.33</b>	<b>-0.52</b>	<b>0.09</b>
	<b>E</b>	<b>0.73</b>	<b>0.15</b>	<b>0.27</b>

Note. n: number of observation; Y-intercept: the intercept (mm. day<sup>-1</sup>); R<sup>2</sup>: the correlation coefficient (no units); RMSE : Root Mean Square Error (mm. day<sup>-1</sup>); MBE: Mean Bias Error (mm. day<sup>-1</sup>); E: Efficiency (no units).

**Table 3. 2. Comparasion entre l'évapotranspiration réelle cumulée (AET), évaporation du sol cumulée (SE) et la transpiration de la végétation cumulée (CT) estimée par les trois méthodes pour chaque champ de blé.**

	No-Calibration			Local-Calibration			NDVI-Calibration		
	Field 1	Field 2	Field 3	Field 1	Field 2	Field 3	Field 1	Field 2	Field 3
SE (mm)	45.39	25.02	23.46	56.51	38.05	34.15	49.13	39.20	25.99
CT (mm)	307.79	269.75	336.87	274.26	242.22	307.14	289.17	229.45	324.57
AET (mm)	353.18	294.77	360.34	330.77	280.28	341.29	338.30	268.66	350.56

### 3.3 Application du modèle FAO-56 pour estimer les besoins en eau de l'olivier

#### 3.3.1 Évapotranspiration de Référence $ET_0$

L'évapotranspiration de référence  $ET_0$ , est calculée selon l'équation de la FAO-56 développée par Penmann-Monteith (Eq. A.8, Annexe A). La figure 3.4 présente l'évolution de l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  à l'échelle journalière durant les deux saisons agricoles de l'olivier (2003 et 2004). On rappelle que la saison agricole de l'olivier dans la région commence le mois de Mars ( $JJ^8 = 60$ ) et se termine vers Novembre-Décembre. L'évolution de  $ET_0$  est typiquement similaire à celle d'une région semi aride Méditerranéenne. On note de faibles valeurs de  $ET_0$  en hiver avec une moyenne de 1 mm/jour. Les valeurs les plus élevées sont observées durant le mois de Juillet, avec un maximum de 8 mm/jour. La pluviométrie est faible, variable d'une année à l'autre et sa saison commence généralement à partir d'Octobre et se termine en Avril. On constate une absence de la pluviométrie durant Octobre 2004, ce qui montre bien la variabilité interannuelle des précipitations. Durant les deux saisons agricoles, un cumul d'environ 280 mm de pluviométrie a été enregistré. Cette valeur reste très faible par rapport au cumule de  $ET_0$  (1150 mm), ce qui nécessite l'apport de l'irrigation pour stabiliser la production.

<sup>8</sup> JJ signifie le **Jour Julian** qui est le numéro du jour correspondant à partir du 1<sup>er</sup> Janvier (JJ=1)

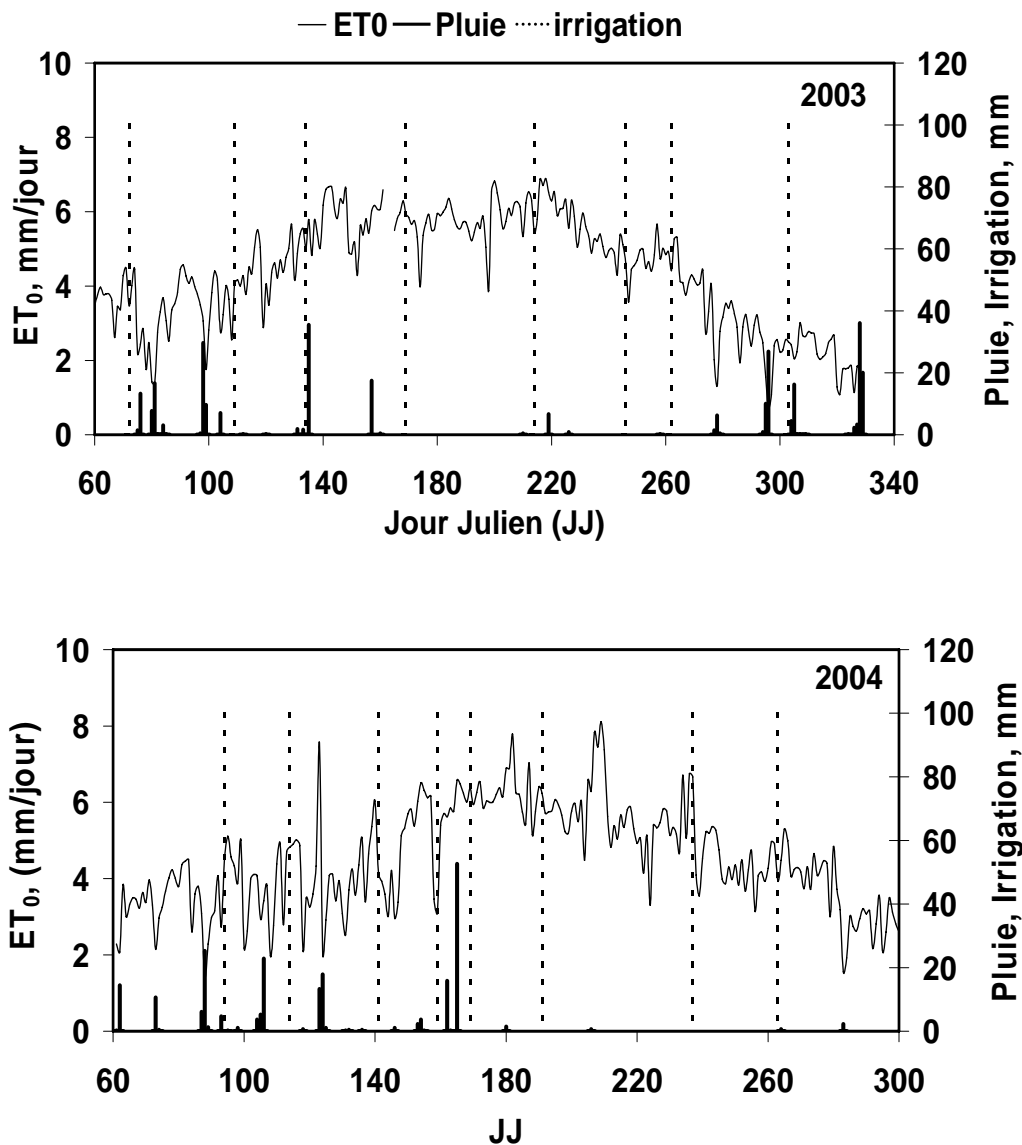


Figure 3. 4. Évolution journalière de l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  calculée par l'équation de la FAO-Penman-Monteith durant les deux saisons agricoles de l'olivier: 2003 et 2004. Les événements de pluie et d'irrigation sont aussi présentés.

### 3.3.2 Évapotranspiration et coefficient cultural

Dans un premier temps, nous avons utilisé directement les valeurs des coefficients culturaux proposés par la FAO dans son bulletin n° 56 (Allen et al., 1998) pour estimer les besoins en eau des oliviers par les deux approches du modèle FAO-56. Le tableau 3.3 présente les différents paramètres utilisés pour simuler le modèle FAO-56. Les procédures de calcul de ces

paramètres sont détaillées dans le chapitre 2. La figure 3.5 montre la comparaison entre l'évapotranspiration réelle (ETR) mesurée par l'eddy covariance et celle simulée par le modèle FAO-56 à coefficient cultural simple, en utilisant les coefficients culturaux donnés dans le document FAO-56, durant les deux saisons agricoles de l'olivier: 2003 et 2004. Nous constatons que l'évolution temporelle de ETR simulée et mesurée suit la même évolution de l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  (Figure 3.4). On note des faibles valeurs de ETR en hiver et des valeurs en été (Juin, Juillet et Août). Nous constatons aussi que l'approche à coefficient cultural simple donne des résultats acceptables pour l'estimation de l'ETR. Les valeurs de RMSE entre ETR mesurée et simulée durant 2003 et 2004 sont respectivement 0.69 et 0.77 mm/jour. Une surestimation de ETR par le modèle est de l'ordre de 12%. De même, nous avons reporté sur la figure 3.6 l'évolution de ETR mesurée et celle simulée par l'approche à coefficient cultural double. Nous constatons que cette approche donne aussi des résultats acceptables pour l'estimation de ETR de l'olivier avec une surestimation de l'ordre de 10%.

Selon les résultats obtenus, il est possible d'utiliser directement les coefficients culturaux donnés dans le document FAO-56 pour estimer les besoins en eau de l'olivier. Mais pour une meilleure estimation de ETR, une calibration des coefficients culturaux  $K_c$  est nécessaire. Pour cela, nous avons calibré les deux approches sur les données de 2003 et les validé sur les données 2004.

Comme les deux modèles surestiment l'évapotranspiration, il est évident de réduire les coefficients culturaux: le coefficient cultural global  $K_c$  pour l'approche simple et le coefficient cultural de base  $K_{cb}$  pour l'approche double (cf. Eqs. 2. 9 et 2.10, chapitre 2). Les valeurs de  $K_c$  et  $K_{cb}$  trouvées après calibration (Tableau 3.3) sont conformes à celles trouvées dans la littérature (Pastor and Orgaz, 1994); Allen et al., 1998; Villalobos et al., 2000; Palomo et al., 2002 ; Testi et al., 2004), dépendamment du taux de recouvrement du couvert  $f_c$ . En effet, Villalobos et al. (2000) ont trouvé, une valeur moyenne annuelle de  $K_c$  de 0.62 pour des oliviers ayant 40% comme taux de couverture. Une autre étude menée par Pastor et Orgaz (1994) montre que les valeurs de  $K_c$ , dans les trois phases de développement, pour des oliviers ayant 60% comme taux de couverture sont :  $K_{cini} = 0.65$ ,  $K_{cmid} = 0.45$  et  $K_{cend} = 0.65$ . Dans notre cas, une valeur moyenne annuelle de  $K_c$  de l'ordre de 0.63 peut être utilisé pour la gestion de l'eau de

l'irrigation de l'olivier dans notre région. Une réduction de  $K_c$  de l'ordre de 8% par rapport à celle donnée dans le document de la FAO-56 (Allen et al., 1998) a été enregistrée.

Après calibration des coefficients cultureux, les deux approches du modèle FAO-56 (approche simple et double) donne une bonne estimation de l'évapotranspiration. Les valeurs du Root Mean Square Error (RMSE) sont réduites de 0.69 et 0.68 mm/jour à 0.58 et 0.54 mm/jour respectivement pour l'approche simple et double. Une amélioration de 16% pour l'approche simple et de 31% du RMSE pour l'approche double a été obtenue après calibration.

**Table 3. 3. Les valeurs des différents paramètres, utilisés par le modèle FAO-56 données par Allen et al. (1998) et celles ajustées dans notre région.**

<b>Paramètre</b>	<b>Valeur donnée dans le document FAO-56 (Allen et al., 1998)</b>	<b>Valeur calibrée dans notre région</b>
$K_{cini}, K_{cmid}, K_{cend}$	0.65/0.7/0.7	0.6/0.62/0.65
$K_{cbini}, K_{cbmid}, K_{cbend}$	0.55/0.65/0.65	0.5/0.52/0.55
$l_{ini}, l_{dev}, l_{mid}, l_{end}$	30/60/90/90	30/60/90/90
<b>TEW (mm)</b>		<b>33.75</b>
<b>REW (mm)</b>		<b>9</b>
<b>TAW (mm)</b>		<b>208</b>
<b>RAW (mm)</b>		<b>135.2</b>
$f_c$		<b>0.63 (olivier) + 0.17 (herbe)</b>
$f_w$		<b>0.95</b>
$f_{ew}$		<b>0.2</b>

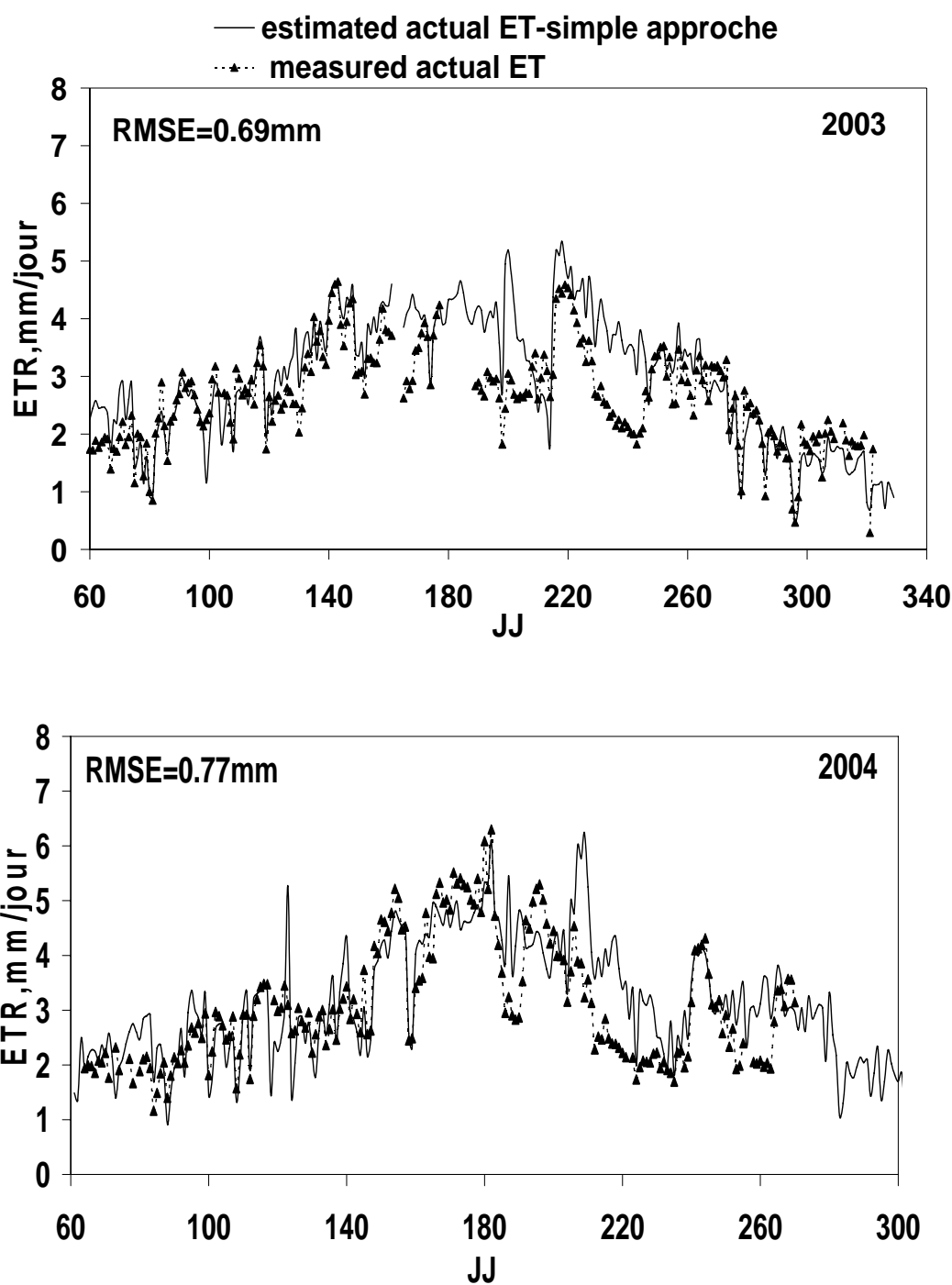


Figure 3. 5. Comparaison entre l'évapotranspiration mesurée par la technique d'eddy covariance et celle simulée par le modèle FAO-56 à coefficient cultural simple durant les deux saisons agricoles de l'olivier: 2003 et 2004.

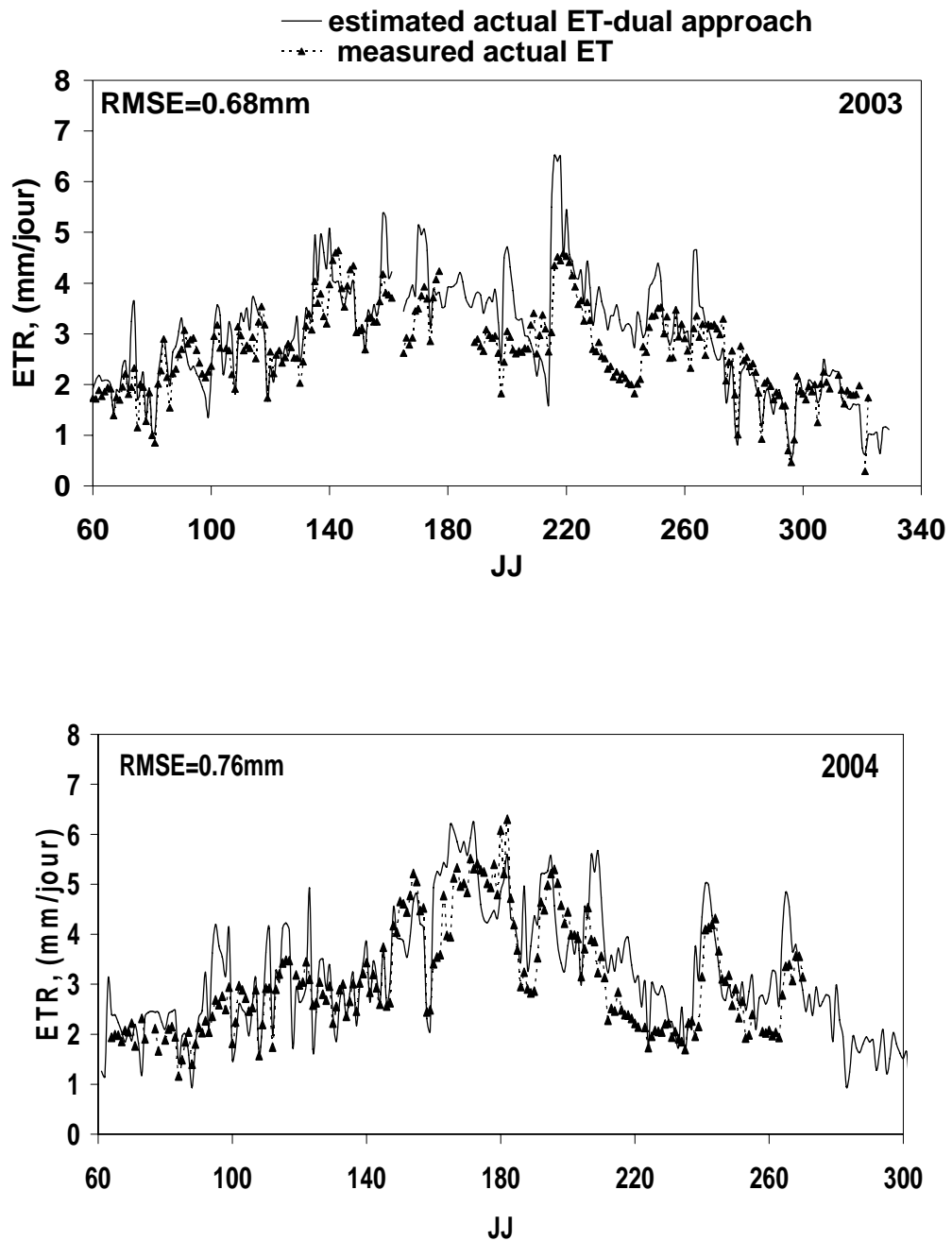


Figure 3. 6. Comparaison entre l'évapotranspiration mesurée par la technique d'eddy covariance et celle simulée par le modèle FAO-56 à coefficient culturel double durant les deux saisons agricoles de l'olivier: 2003 et 2004.

### **3.3.3 Partition de l'évapotranspiration par l'approche à coefficient cultural double**

Comme l'approche à coefficient cultural double du modèle FAO-56 permet de calculer séparément l'évaporation du sol et la transpiration de la végétation, il est plus intéressant de valider cette partition du flux d'évapotranspiration d'une part, et de quantifier les pertes en eau par évaporation du sol liées à la technique d'irrigation (gravitaire) d'autre part.

La figure 3.7 illustre la performance de la partition de l'évapotranspiration durant 2004. D'après cette figure, nous constatons que l'approche double donne de bons résultats pour l'estimation des deux composantes de ETR malgré sa simplicité et la complexité du site étudié. L'évolution de la transpiration (T) mesurée et celle estimée est similaire (Figure 3.7-a). La valeur de RMSE entre la transpiration mesurée par la technique de flux de la sève et la transpiration estimée par l'approche double du modèle FAO-56 est de 0.59 mm par jour. Quant à l'évaporation du sol (Es), le modèle ne simule pas bien ce terme. On constate que dans les conditions sèches (absence de pluie et d'irrigation), l'évaporation simulée et celle mesurée sont presque nulles (du JJ = 210 à JJ=235 et du JJ = 245 à JJ=265, figure 3.7-b). Mais, lorsque la surface du sol est humide, les deux termes augmentent mais différemment. On constate que l'évaporation mesurée est supérieure à celle estimée, ceci s'explique par le fait que les mesures effectuées ne donnent pas uniquement l'évaporation du sol mais aussi la transpiration de l'herbe présente dans le site qui s'ajoute. Globalement le modèle FAO-56 à coefficient cultural double donne des résultats acceptables pour la partition de l'évapotranspiration malgré sa simplicité. Cette partition nous permet aussi d'évaluer les pertes en eau par évaporation du sol qui ne sont pas utiles à la croissance des plantes. La figure 3.8 illustre le rapport entre la transpiration et l'évapotranspiration totale ETR ( $T/ET$ ) (fig. 3.8-a), ainsi que le rapport entre l'évaporation du sol et ETR ( $Es/ET$ ) (fig. 3.8-b). On constate que pendant certaines périodes le rapport ( $T/ET$ ) dépasse la valeur 1. Ceci est dû aux erreurs de mesures. En effet, la méthode de l'extrapolation du flux de la sève d'un arbre à un champ peut surestimer la transpiration (Williams et al., 2004). Nous constatons aussi que dans les conditions sèches, la transpiration (mesurée ou simulée) représente 100% de l'évapotranspiration mais seulement 70% après l'irrigation. Une quantité importante d'eau se perd par évaporation du sol (30% de ETR) et peut être économisée par un choix judicieux de la technique d'irrigation (le goutte à goutte par exemple).

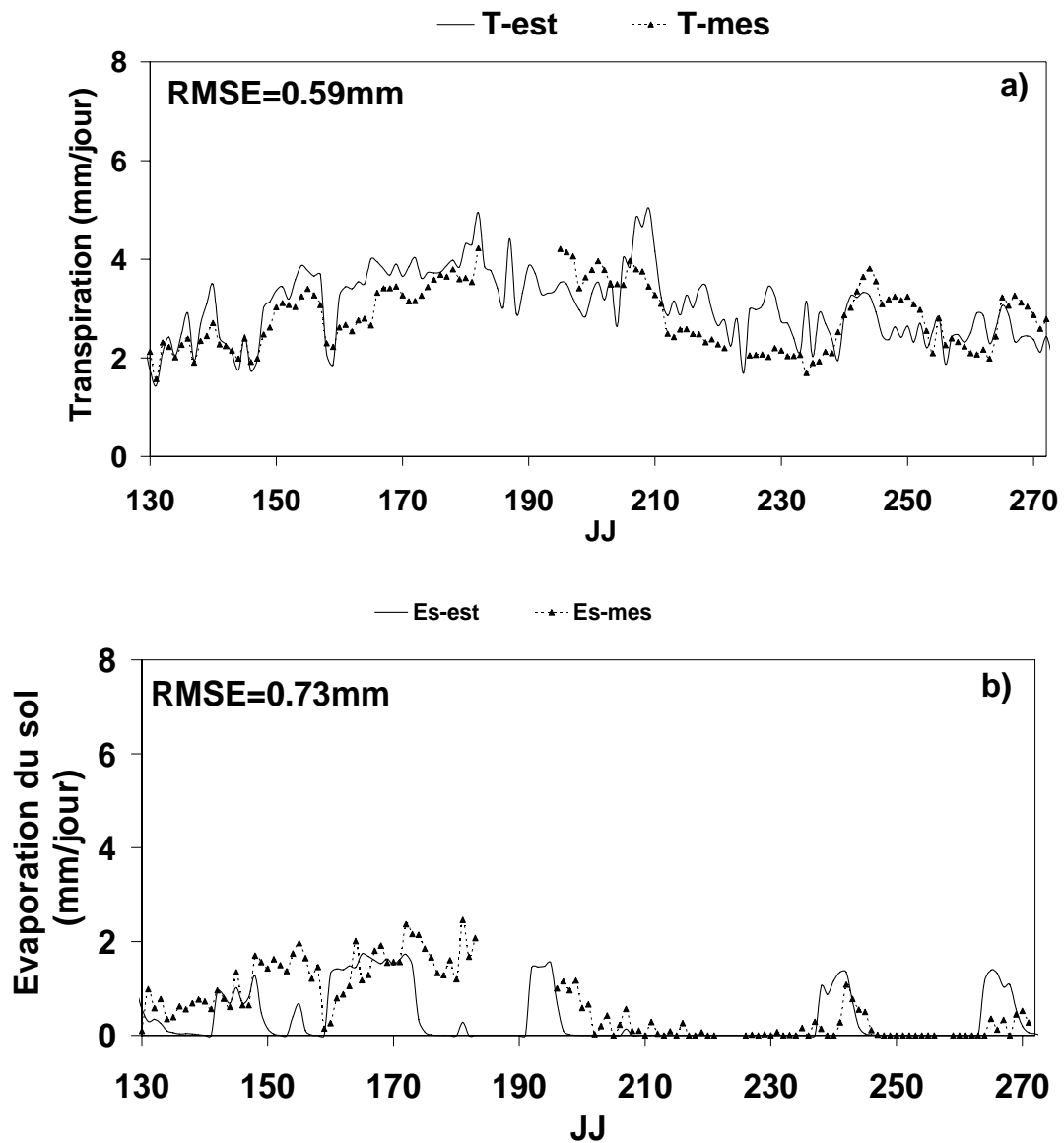


Figure 3. 7. Performance de la partition de l'évapotranspiration.

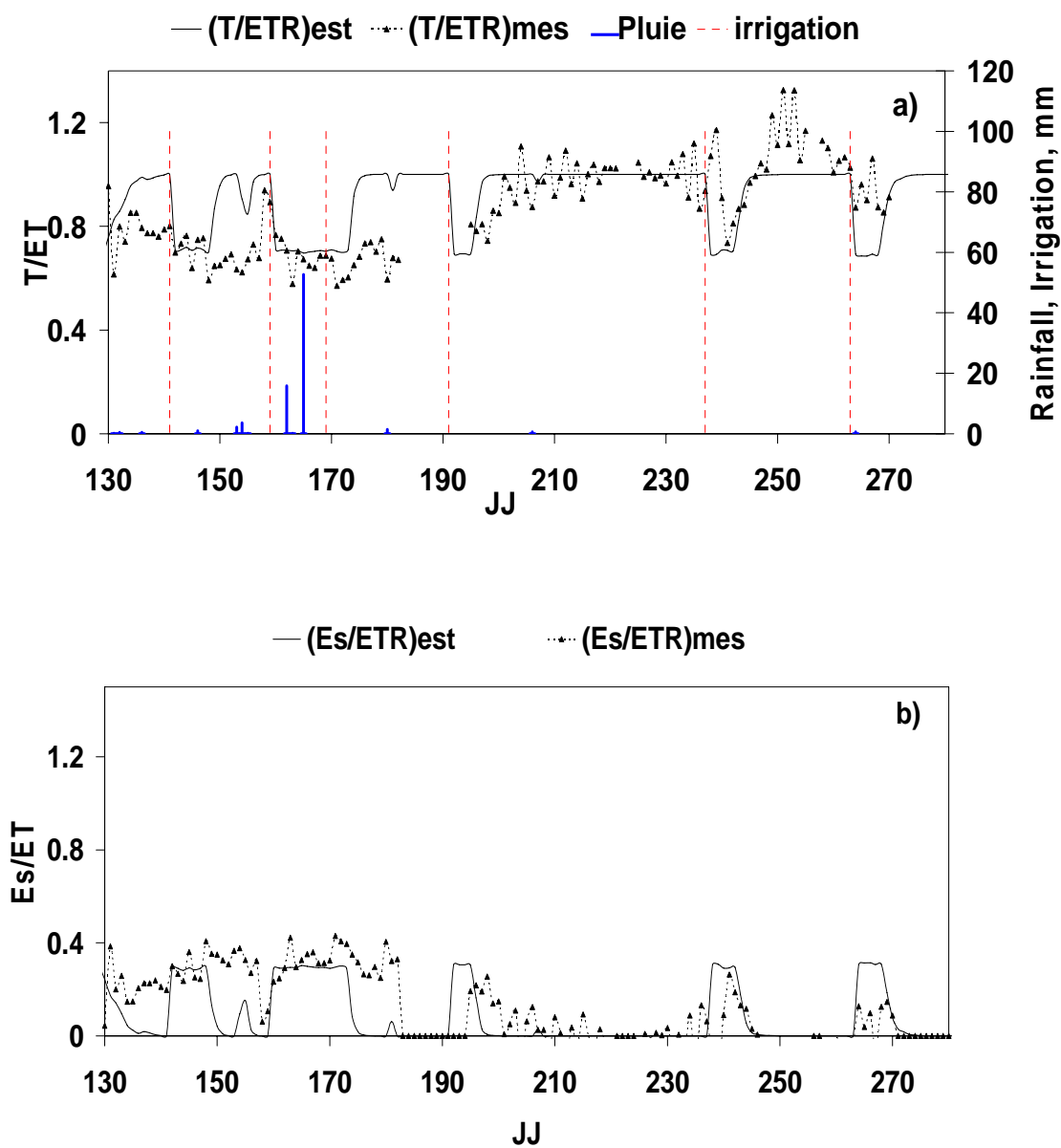


Figure 3. 8. Evaluation des pertes d'eau par évaporation du sol.

### 3.3.4 Efficacité de l'irrigation gravitaire

L'équation simplifiée du bilan hydrique (pluie + irrigation = Evapotranspiration + perte) permet d'évaluer l'efficacité de la technique d'irrigation. Durant la saison agricole 2003 par exemple, l'olivier a été irrigué 8 fois avec une quantité de 100 mm chaque fois (cf. la figure 3.3) soit 800 mm. D'un autre côté, l'apport des précipitations est de l'ordre de 280 mm et le cumul de l'évapotranspiration réelle obtenue est de l'ordre de 830 mm. Une quantité importante de l'ordre

de 250 mm (28% de la quantité irriguée) a été perdue à cause de plusieurs facteurs liés essentiellement au type d'irrigation. Nous pouvons ainsi citer quelques sources de cette perte d'eau :

- l'eau qui parcourt le canal de l'irrigation est perdue par ruissellement ainsi que par évaporation.
- L'eau s'infiltré rapidement via la texture du sol qui est sableux.
- Une mauvaise programmation de l'irrigation, parfois l'irrigation coïncide avec la pluie (cf. la figure 3.4).
- La fréquence de l'irrigation est basée seulement sur des observations à l'oeil nu, ce qui provoque parfois soit un excès d'eau soit un manque d'eau. Ce manque d'eau provoque aussi le stress hydrique de la plante. Ce stress a été identifié entre le 20 Juillet et le 2 Août par le modèle FAO-56 (cf. la figure. 3.9, cercle vert).

Le modèle FAO-56 permet de quantifier la quantité d'eau d'irrigation nécessaire ainsi que les dates correspondantes pour que la végétation ne souffre pas à un stress hydrique. En effet, le modèle propose une irrigation chaque fois que le coefficient du stress hydrique ( $K_s$ ) devient inférieur à la valeur 1. La figure 3.10 illustre les apports d'eau simulés (calendrier d'irrigation) par inversion du modèle FAO-56 ainsi ceux apportés par le gérant. D'après cette figure, on constate que la quantité d'eau d'irrigation nécessaire à la plante (sans souffrir du stress) pour chaque événement est de l'ordre de 63 mm au lieu de 100 mm donnée par le gérant. En plus, la quantité totale d'irrigation simulée par le modèle est de 640 mm, cette quantité est inférieure à celle donnée par le gérant mais elle est supposée bien distribuée. L'excès d'eau donnée par le gérant est du au mauvais pilotage de l'irrigation. Parfois l'irrigation coïncide avec la pluie (cf. la figure 3.4).

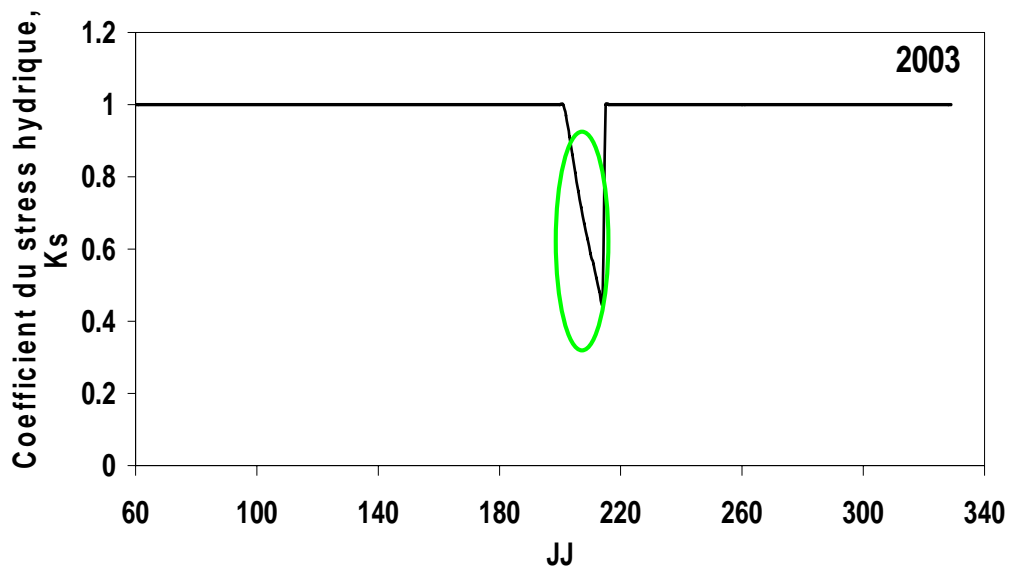


Figure 3. 9. Coefficient du stress hydrique estimé par le modèle FAO-56 durant la saison agricole 2003. L'événement du stress est indiqué par le cercle vert.

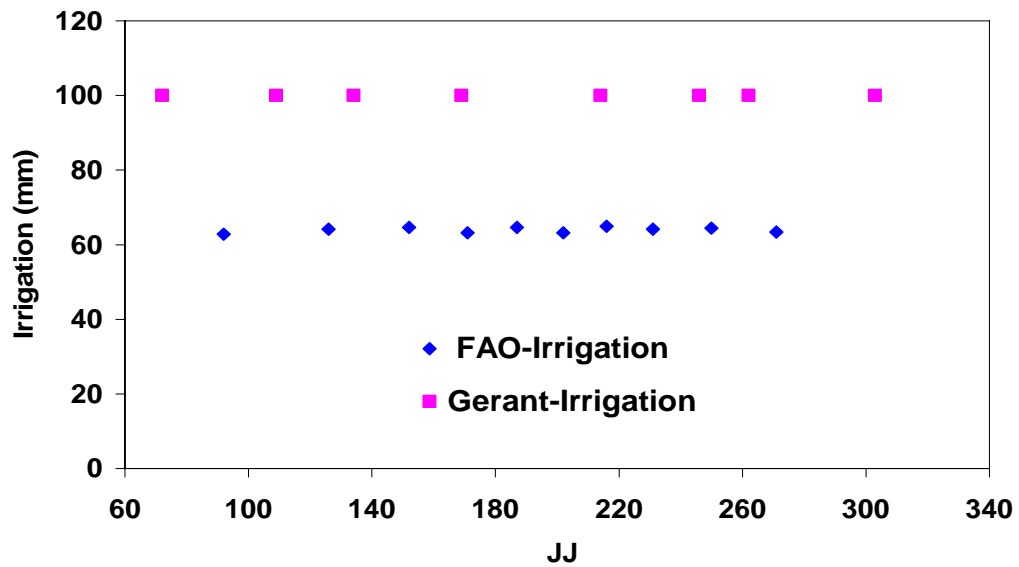


Figure 3. 10. Comparaison de l'irrigation donnée par le gérant et celle estimée par le modèle FAO-56 pour que la plante ne souffre pas du stress hydrique ( $K_s=1$ ).

## 3.4 Application du modèle FAO-56 pour estimer les besoins en eau de l'oranger

### 3.4.1 Évapotranspiration de référence $ET_0$

Comme dans les deux autres sites de notre étude (olivier et blé), une station météorologique a été installée dans le site de l'oranger pour mesurer les paramètres climatiques nécessaires à l'estimation de  $ET_0$  par l'équation de la FAO-Penman-Monteith (Eq. A.8, Annexe.A). La Figure 3.11 présente l'évolution journalière de  $ET_0$  caractérisant le climat de la région de Saada durant l'année 2004 et 2005. L'évolution de  $ET_0$  est typiquement similaire à celle d'une région semi aride Méditerranéenne. On note de faibles valeurs de  $ET_0$  durant l'hiver (Novembre, Décembre et Janvier) et des valeurs élevées durant l'été (Juin et Juillet).

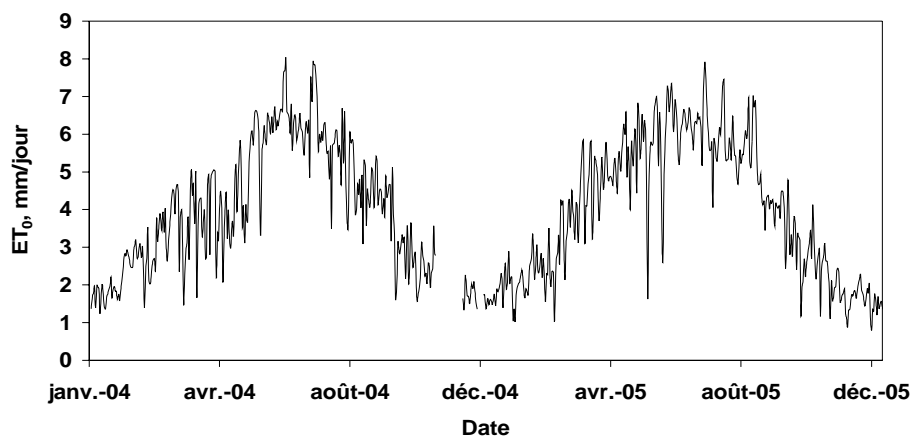


Figure 3. 11. Evolution journalière de l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  calculée par la méthode de FAO-Penman-Monteith, caractérisant le climat de la région de Saada durant l'année 2004 et 2005.

### 3.4.2 Évapotranspiration et coefficient cultural

Nous avons simulé l'évapotranspiration réelle ETR de l'oranger dans deux sites, en utilisant les deux approches du modèle FAO-56. La simulation a été faite durant l'année 2004 pour le site irrigué par goutte à goutte (Saada 1), et durant l'année 2005 pour le site irrigué par gravitaire (Saada 2). Les coefficients culturaux utilisés pour cette simulation ont été calibrés en se basant sur des mesures de l'ETR. La figure 3.12 montre la comparaison entre ETR mesurée par l'eddy covariance et celle simulée par le modèle FAO-56 à coefficient cultural simple pour les

deux sites de l'oranger. Nous constatons que l'approche à coefficient cultural simple donne des résultats acceptables pour l'estimation de l'ETR pour les deux sites, mais moins performants pour le site irrigué par goutte à goutte. Les valeurs de la RMSE entre ETR mesurée et simulée pour Saada 1 et Saada 2 sont respectivement 1.15 et 0.82 mm/jour. Une surestimation de ETR par l'approche simple pour le site Saada 1 peut être due à la surestimation de l'évaporation du sol qui est incluse implicitement dans le coefficient cultural simple et qui est normalement faible pour l'irrigation goutte à goutte. De même, nous avons reporté sur la figure 3.13 la performance de l'approche à coefficient cultural double dans l'estimation de ETR. Nous constatons que cette approche donne aussi des résultats acceptables mais moins performants que l'approche simple pour le site irrigué par la technique gravitaire. Ceci est normal puisque l'approche double simule une évaporation du sol élevée après l'irrigation (les trois points en haut de la figure 3.13 en bas). La fraction du couvert est faible ( $\approx 30\%$ ) ce qui favorise une évaporation du sol élevée (cf. eq. 2.3 du chapitre 2).

Les coefficients culturaux correspondants aux deux sites ainsi ceux donnés dans le document FAO-56 sont présentés sur la figure 3.14. La valeur moyenne du coefficient cultural  $K_C$  correspondante au premier site (Saada 1) durant toute la saison agricole est de l'ordre de 0.55. Une réduction de 20% par rapport à celle donnée dans le document de la FAO-56 (Allen et al., 1998) a été enregistrée. Cette réduction s'explique par le type d'irrigation pratiqué qui est le goutte à goutte. Avec ce type d'irrigation, l'évaporation du sol diminue et par conséquent le coefficient cultural. La réduction de  $K_C$  est remarquable dans la phase initiale pour laquelle l'évaporation du sol est dominante dans le processus d'évapotranspiration. Ce résultat est conforme à ceux reportés par d'autres travaux menés sur d'autres cultures irriguées par la technique localisée (Allen et al., 1998; Amayreh and Al-Abed 2004). Ces travaux ont montré que l'irrigation localisée peut réduire l'évaporation du sol de 20% à 50%. Concernant le site irrigué par le mode gravitaire (Saada 2), les mesures dont nous disposons qui s'étalent du 24 Mars au 7 Novembre 2005 montrent que les valeurs de  $K_C$  sont distribuées autour du  $K_C$  suggéré par Allen et al., (1998). Globalement la valeur moyenne de  $K_C$  durant cette période (0.54) est inférieure à celle donnée dans le document de la FAO-56. Cette différence peut être expliquée par plusieurs facteurs à savoir: la fraction du couvert, les pratiques culturales (itinéraires techniques, fertilisation.....). Le taux de couverture de l'oranger dans ce site est de l'ordre de 30%, alors que

les valeurs de  $K_C$  données par Allen et al., (1998) sont pour des agrumes ayant 70% comme taux de couverture. D'autres études ont montrés que  $K_C$  est fortement lié à ce facteur (ex. Pastor and Orgaz, 1994; Villalobos et al., 2000; Testi et al., 2004; Hanson and May, 2005; Williams and Ayars, 2005; Paço et al., 2006).

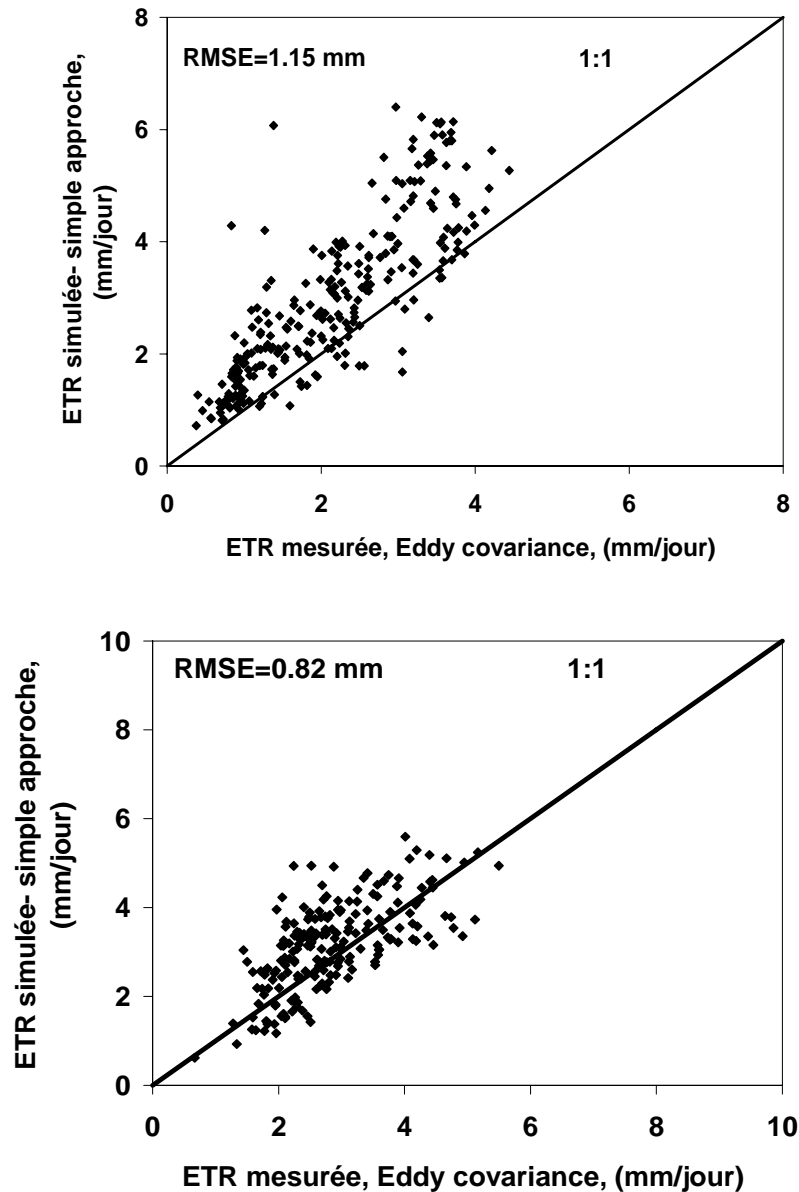


Figure 3. 12. Comparaison entre l'évapotranspiration mesurée par la technique d'Eddy covariance et celle simulée par le modèle FAO-56 à coefficient cultural simple pour les deux sites d'oranger : Saada1 (2004) par goutte à goutte (figure en haut) et Saada 2 (2005) irrigué par gravitaire (figure en bas).

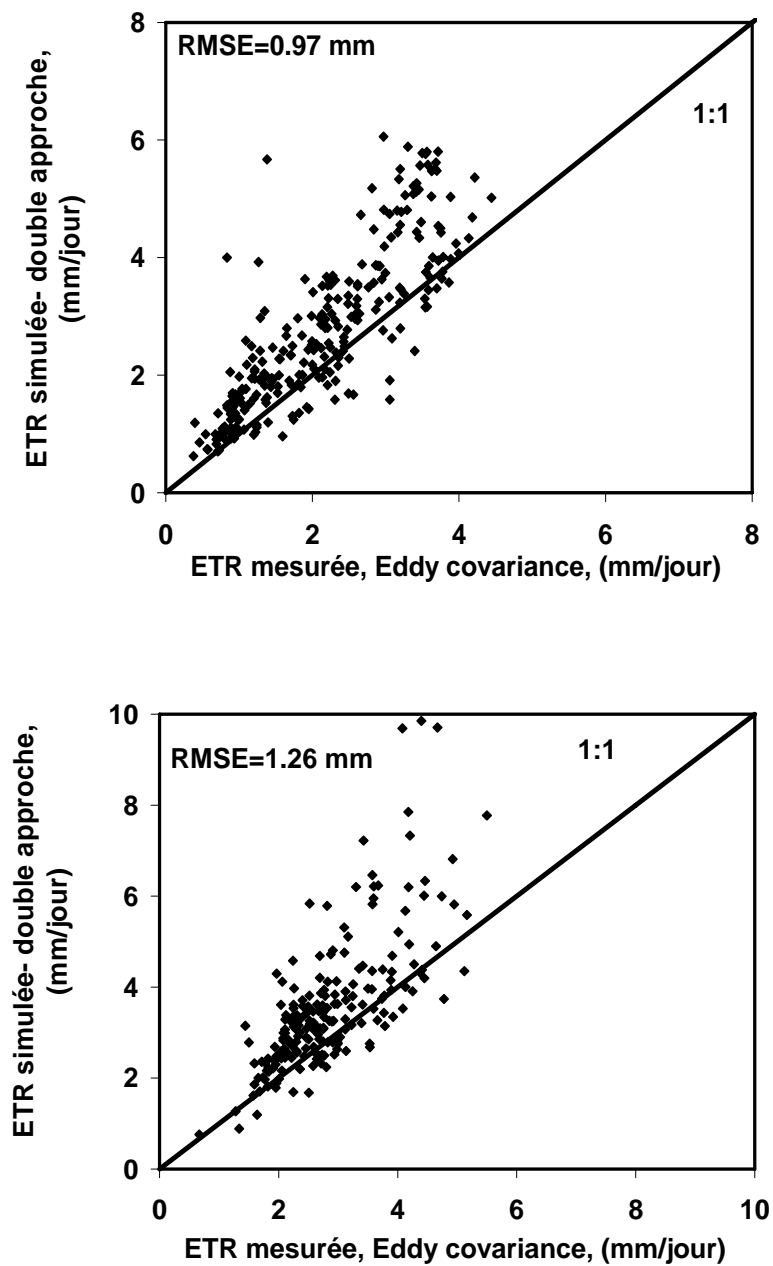


Figure 3. 13. Comparaison entre l'évapotranspiration mesurée par la technique d'Eddy covariance et celle simulée par le modèle FAO-56 à coefficient cultural double pour les deux sites d'orangers : Saada1 (2004) irrigué par goutte à goutte (figure en haut) et Saada 2 (2005) irrigué par gravitaire (figure en bas).

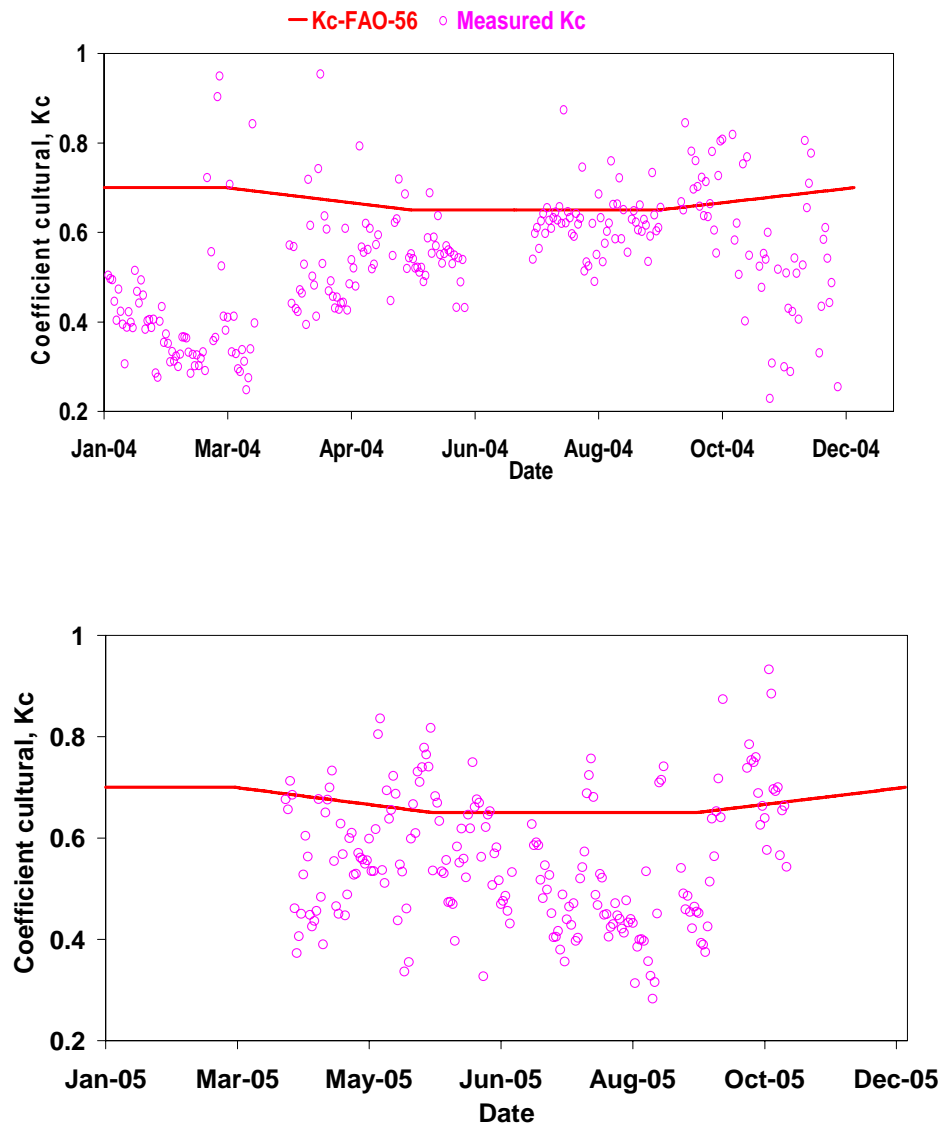


Figure 3. 14. Comparaison entre le coefficient cultural mesuré et celui donné dans le document FAO-56 pour Saada 1 (figure en haut) et Saada 2 (figure en bas).

### **3.4.3 Évaluation des pertes d'eau par évaporation du sol due à l'irrigation gravitaire**

Afin de quantifier les pertes d'eau par évaporation du sol qui ne sont pas utiles à la croissance des plantes, des comparaisons entre le coefficient cultural  $K_C$  de l'oranger irrigué par gravitaire et celui de l'oranger irrigué par goutte à goutte, ont été effectuées dans une période où il y a absence de pluie (du jour julien 116 à 160 de l'année 2005). A noter que cette comparaison est grossière puisque les caractéristiques de deux sites sont différentes. Le taux de couverture  $f_c$  qui est le facteur principal dans la détermination de la transpiration de la plante et de l'évaporation du sol est aussi différent entre les deux sites. La figure 3.15 montre la comparaison entre  $K_C$  de l'oranger irrigué par goutte à goutte (Saada 1) et celui de l'oranger irrigué par gravitaire (Saada 2). Dans la même figure, nous présentons les quantités d'irrigation correspondantes. Nous constatons qu'après l'irrigation gravitaire, le coefficient cultural  $K_C$  du Saada 2 est élevé par rapport à celui du Saada 1. La forte valeur du  $K_C$  de Saada 2 est due essentiellement à l'évaporation du sol puisque le taux de couverture  $f_c$  ou la densité de peuplement du Saada 2 (7m x 7m) est plus faible que celle du Saada 1 (5m x 3m). Pour le  $K_C$  du Saada 1, il est presque constant autour de la valeur 0.55, c'est la valeur moyenne du  $K_C$  qu'on a trouvé durant la saison agricole 2004. Cette valeur représente en grande partie la transpiration de la plante. C'est l'avantage de l'irrigation localisée par rapport à l'irrigation gravitaire puisque l'eau de l'irrigation est presque totalement utilisée par la plante.

En faisant une comparaison grossière entre  $K_C$  du Saada 1 et celui du Saada 2 après l'irrigation (après JJ 124 et JJ 140), nous constatons que  $K_C$  du Saada 2 atteint la valeur 0.80 qui est supérieure à celle du Saada 1 (0.55). Cette surestimation est de l'ordre de 45%, qui présente la perte d'eau par évaporation directe du sol liée à la technique d'irrigation. Ces pertes d'eau qui ne sont pas utiles à la croissance des plantes, peuvent être économisées par un choix judicieux de la technique d'irrigation comme le goutte à goutte pratiqué dans Saada 1.

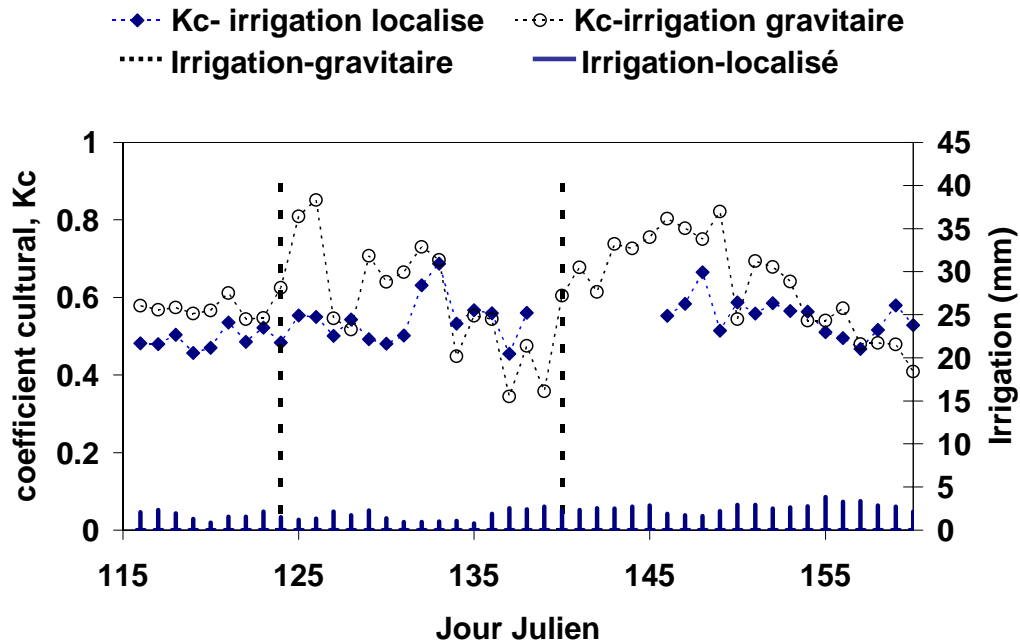


Figure 3. 15. Comparaison entre le coefficient cultural de l'oranger irrigué par goutte à goutte (Saada 1) et celui de l'oranger irrigué par gravitaire (Saada 2) du jour julien 116 à 160 de l'année 2005. A noter que la pluie est absente durant cette période.

### 3.5 Conclusions

L'application directe du modèle FAO-56 en utilisant les coefficients culturaux suggérés dans le document FAO-56 surestime l'évapotranspiration réelle (ETR) de trois cultures étudiées (blé, olivier et oranger). Une surestimation de l'ordre de 12% et 17% par rapport aux mesures d'eddy covariance a été relevée pour la culture de l'olivier et le blé respectivement. Une calibration de ce modèle pour les conditions de notre région est nécessaire. Après la calibration, les résultats ont été améliorés soit pour l'approche simple soit pour l'approche double. Pour le cas de l'olivier par exemple, Les valeurs de RMSE entre l'évapotranspiration (ETR) mesurée et celle simulée après la calibration sont réduites de 0.69 à 0.58 mm pour l'approche simple, et de 0.68 à 0.54 mm pour l'approche double. Les valeurs des coefficients culturaux  $K_C$  trouvées correspondantes aux trois phases de développement (initiale, mi-saison et arrière saison) pour la culture de l'olivier sont respectivement de 0.60, 0.62 et 0.65, qui sont inférieures à celles données dans le document FAO-56 (0.65, 0.7 .et 0.7). Pour la culture du blé, le coefficient de transpiration  $K_{cb}$  pendant la phase mi-saison a été réduit de la valeur 1.1 suggérée par le document FAO-56 à

la valeur 0.9. Pour les orangers, les coefficients culturaux calibrés (une valeur moyenne annuelle de  $K_c$  de l'ordre de 0.55) sont aussi inférieurs à ceux donnés dans le document de la FAO-56. Une réduction de l'ordre de 20% a été observée.

Comme l'approche à coefficient cultural double du modèle FAO-56 permet de calculer séparément l'évaporation du sol et la transpiration de la végétation, il est plus intéressant de valider cette partition du flux d'évapotranspiration. Pour ceci des mesures de flux de la sève de l'olivier ont été faites afin de calculer la transpiration de la plante. La comparaison entre les deux composantes de l'ETR mesurées et simulées montre que l'approche double donne des résultats acceptables pour la partition de l'évapotranspiration malgré sa simplicité (équation simple du bilan hydrique). Cette partition nous a permis aussi de quantifier les pertes en eau par évaporation du sol liées à la technique d'irrigation (gravitaire). Une quantité importante d'eau se perd par évaporation du sol (30% de ETR) et peut être économisée par un choix judicieux de la technique d'irrigation (goutte à goutte par exemple).

Pour les cultures annuelles comme le cas du blé, les coefficients culturaux peuvent être dérivés à partir des indices de végétation (NDVI, SAVI...), à travers des relations établies entre ces deux paramètres (Eqs. 2.13 et 4.1). Ces relations ont été combinées avec le modèle FAO-56 pour estimer les besoins en eau du blé. Comme nous l'avons prédit, cette méthode donne une bonne estimation de l'ETR du blé. L'avantage de cette méthode est qu'elle nous a permis de spatialiser le modèle FAO-56 en utilisant les données de la télédétection. Ce qui fait l'objet du chapitre suivant.

---

**CHAPITRE 4 : SPATIALISATION DU  
MODELE FAO-56 A PARTIR DES DONNEES  
DE LA TELEDETECTION**

---

## 4.1 Introduction

En général, l'estimation des besoins en eau des cultures (évapotranspiration) par les modèles de transfert d'eau et de masse de type SVAT comme le modèle FAO-56 par exemple à l'échelle de parcelle, ne pose pas de problème particulier. Mais si les décideurs veulent gérer leurs ressources en eau à l'échelle d'un secteur irrigué ou d'une région au lieu de l'échelle parcellaire, l'un des problèmes majeurs rencontrés est la variabilité des paramètres du modèle. D'où l'intérêt de la télédétection spatiale qui permette d'extrapoler les informations locales à l'échelle spatiale.

Après la calibration et la validation du modèle FAO-56 (chapitre 3) à partir des données de terrain pour les couverts dominants dans la zone d'intérêt (blé, olivier et oranger), nous avons intéressé dans cette partie à spatialiser l'approche double de ce modèle. Notre étude s'est limitée uniquement à la spatialisation de ce modèle dans une zone irriguée de la culture de blé car les caractéristiques du site de blé sont convenables pour utiliser les données satellites (reliefs absents, grande superficie...). Aussi, une série d'images satellites à haute résolution et des mesures au sol sont disponibles durant toute la saison agricole 2002/2003 du blé.

L'utilisation combinée des données récoltées sur le terrain (chapitre 3) et des mesures satellitaires pour la spatialisation du modèle FAO-56 a fait l'objet de notre étude. Le résultat final est de cartographier les paramètres d'entrée du modèle (les coefficients cultureux et l'évapotranspiration de référence) et d'en déduire les principaux paramètres à savoir l'évapotranspiration, l'apport d'eau par irrigation à l'échelle spatiale et temporelle, que nous pouvons valider à l'aide des mesures de terrain.

## 4.2 Spatialisation du modèle FAO-56 à partir des données satellites

La spatialisation du modèle FAO-56 est opérée sur un site test de  $3 \times 3 \text{ km}^2$  de blé (figure 2.8) à partir de 10 images satellite à haute résolution spatiale (SPOT et Landsat) acquises entre novembre 2002 et juin 2003 (Tableau 2.2). La spatialisation des besoins en eau ou l'évapotranspiration maximale ( $ET_c$ ) par ce modèle nécessite tout d'abord la cartographie de l'évapotranspiration de référence  $ET_0$ , le coefficient cultural de base  $K_{cb}$  et le coefficient d'évaporation du sol  $K_e$ . La spatialisation de  $ET_0$  a été faite en utilisant les données climatiques (Température, Humidité, Vent, Rayonnement global) issues du modèle ALADIN. Pour les

coefficients  $K_{cb}$  et  $K_e$ , les équations établies à partir des données acquises au sol entre  $K_{cb}$  et NDVI (Eq. 2.13, Chapitre 2) d'une part, et entre  $f_c$  et NDVI (Eq. 2.14, Chapitre 2) d'autre part ont été appliquées aux cartes de NDVI. De même une relation linéaire entre  $K_e$  et  $f_c$  a été établie (Simonneux et al., 2006a). Cette relation est donnée par l'équation suivante :

$$K_e = (1 - f_c) * K_{e\max} \quad \text{Equation 4.1}$$

Cette équation est établie d'après le modèle FAO-56 (Allen et al., 1998). Elle donne une valeur maximale du coefficient de l'évaporation du sol  $K_{e\max}$  quand le sol est nu ( $f_c \approx 0$ ) et une évaporation nulle quand la végétation est en plein développement ( $f_c \approx 1$ ). La valeur de  $K_{e\max}$  adoptée pour notre cas est égale à 0.25. Le choix de cette valeur n'est pas au hasard mais il est basé sur la fréquence et la quantité d'apport d'eau ainsi que le taux de l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  (cf. figure 29 en Allen et al., 1998). Dans notre cas, la fréquence d'irrigation est de l'ordre de 10 jours durant la saison agricole et la valeur moyenne de  $ET_0$  est de l'ordre de 4 mm par jour.

#### 4.2.1 Distribution spatiale de l'évapotranspiration de référence : $ET_0$

Un grand nombre de méthodes empiriques ou semi-empiriques a été développé pour estimer l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  à partir de différentes variables climatiques. Ces méthodes peuvent être classées en trois groupes: les méthodes de température (Blaney-Criddle, 1950; Hargreaves and Samani, 1985), les méthodes de radiation (Makkink, 1957; Priestly and Taylor, 1972) et les méthodes combinées (Penman, 1948; Allen et al., 1998). Les méthodes empiriques sont obtenues et ensuite testées dans des conditions climatiques particulières, ce qui fait que leur extrapolation à d'autres conditions climatiques nécessite un contrôle et parfois des ajustements dont le but de les adapter aux conditions locales. Dans ce travail, on a utilisé la méthode de Hargreaves pour spatialiser  $ET_0$ . Cette méthode ne demande pas assez de paramètres climatiques, elle utilise uniquement la température de l'air (Eq. A. 6). Les données climatiques utilisées pour la spatialisation de  $ET_0$  sont issues du modèle ALADIN dans chaque point de la grille (16 km x 16 km) (figure 4.1). Les données climatiques utilisées pour valider cette spatialisation sont issues de 8 stations météorologiques installées dans le cadre du projet SudMed (fig. 4.1). Les cartes du cumul mensuel de  $ET_0$  durant l'année

2004, calculée par la méthode de Hargreaves sont présentées sur la figure 4.2. Cette figure montre bien les variabilité spatiale et temporelle de  $ET_0$ . A l'échelle temporelle, les valeurs de  $ET_0$  sont élevées pendant la période Juin-Août; variant de 45 à 230 mm par mois selon le climat et les régions. Les valeurs minimales ont été observées de Novembre au Janvier. A l'échelle spatiale, les valeurs élevées de  $ET_0$  ont été observées dans les régions de la plaine du Haouz qui se caractérisent par des températures de l'air élevées, alors que les faibles valeurs de  $ET_0$  sont enregistrées en montagne et en mer. Ceci s'explique par le fait que la montagne qui se caractérise par des altitudes élevées est le siège de faibles températures.

Afin de valider les résultats obtenus par le modèle de Hargreaves, nous avons comparé les valeurs de  $ET_0$  estimées par ce modèle avec celles calculées par l'équation de FAO-Penman-Monteith (Eq. A.8) en utilisant les paramètres climatiques mesurés par les stations météorologiques installées dans notre région (fig. 4.3). D'après cette figure, nous constatons que la méthode de Hargreaves estime bien l'évapotranspiration de référence à l'échelle spatiale (Eq. A.6). Le coefficient de détermination  $R^2$  est proche de 1 et la valeur du Root Mean Square Error (RMSE) est faible (16.01 mm/mois); il représente 13% de la valeur moyenne de  $ET_0$  (120 mm/mois).

Nous tenons à signaler que dans cette étude, nous avons utilisé uniquement l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  calculée par l'équation de FAO-Penman-Monteith, utilisant les paramètres climatiques mesurés par une station météorologique installée dans le site test (station R3 dans la fig. 4.1). Comme notre étude de spatialisation est limitée uniquement au carré  $3 \times 3 \text{ km}^2$  du blé, nous avons fait l'hypothèse que le climat dans ce champ est homogène sans utiliser les cartes de  $ET_0$ .

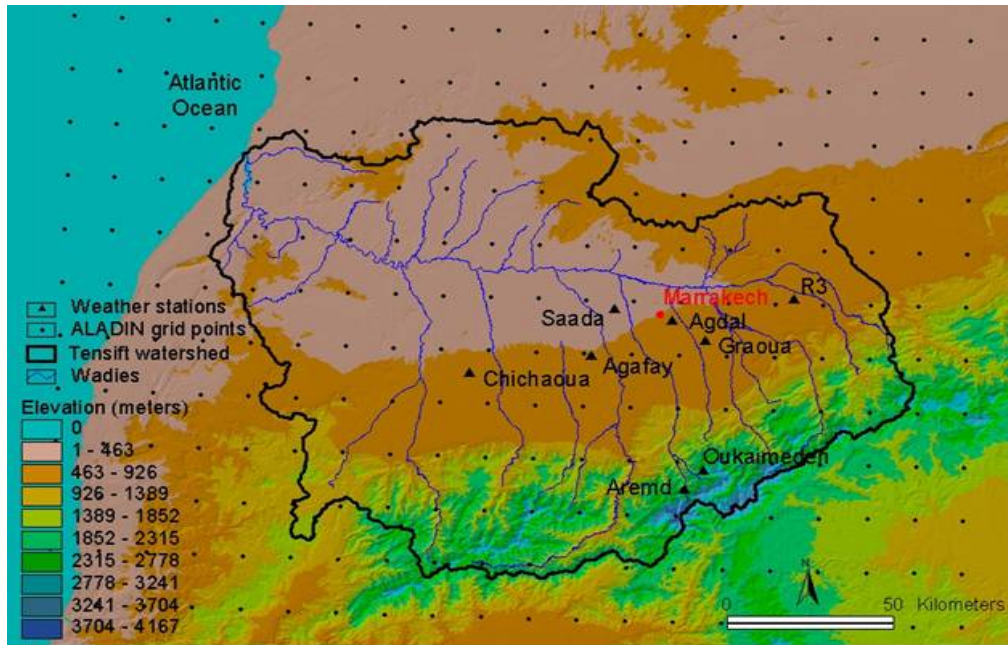


Figure 4. 1. Domaine d'étude avec les points de grille du modèle ALADIN régulièrement répartis sur le bassin versant du Tensift. Le positionnement des stations météorologiques sur le bassin versant du Tensift a été présenté sur la même figure.

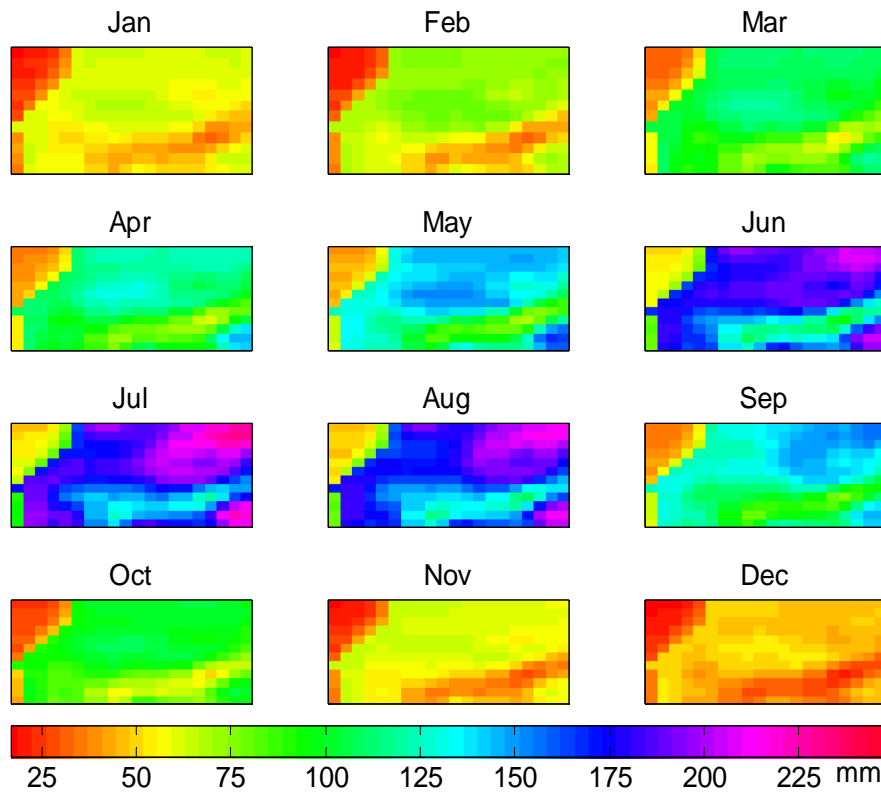


Figure 4. 2. Cartes du cumul mensuel de  $ET_0$  (mm/mois), calculée par la méthode de Hargreaves de Janvier à Décembre 2004.

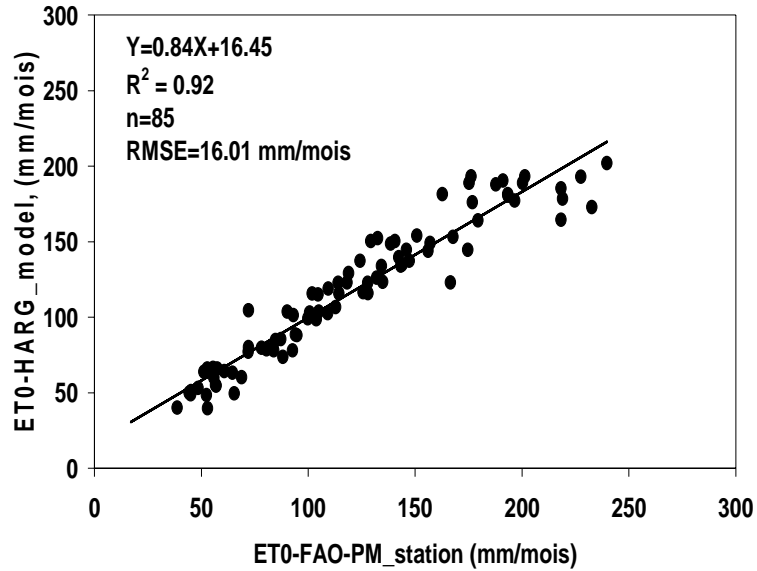


Figure 4. 3. Comparaison entre  $ET_0$  mensuelle estimée par la méthode de Hargreaves en utilisant les données climatiques issues du modèle ALADIN et celle calculée par l'équation de FAO-Penman-Monteith (Equation A. 8) en utilisant les paramètres climatiques mesurés par les stations météorologiques.

#### 4.2.2 Carte des besoins en eau du blé ( $ET_c$ )

Les équations établies à partir des données collectées au sol des caractéristiques de la végétation ( $K_{cb}$ ,  $f_c$  et  $K_e$ ) et le NDVI ont été appliquées sur des cartes de NDVI pour reproduire des cartes de  $ET_c$ . Avant d'appliquer ces relations, nous avons utilisé une méthode de classification. Le principe de cette méthode est de regrouper les pixels qui possèdent des séries temporelles d'indice de végétation comparables, en faisant l'hypothèse que ces pixels sont comparables d'un point de vue agro-climatique (mêmes pratiques agricoles réelles, mêmes conditions environnementales). L'avantage de cette classification est de minimiser le temps de calcul, au lieu de faire le calcul sur 7204 pixels de blé, le calcul se fait seulement sur 50 classes de végétation. La méthode utilisée est la classification non supervisée basée sur l'algorithme des K-means (MacQueen, 1967), qui a été adaptée et appliquée sur des images de NDVI (Ben Hadj, 2004). Le nombre de classes choisi est 50 (fig. 4.4). Ces classes se différencient dans l'évolution de profils de NDVI (fig. 4.5). On constate qu'il y a une grande variabilité intra-classe. Ceci est dû aux pratiques agricoles (date de semis, itinéraires techniques, apport d'eau....) qui sont différents d'une classe à l'autre. Nous constatons aussi qu'il y a principalement deux groupes de classes: un groupe ayant une date de semis précoce (avant le 15 Décembre) et un autre ayant une date de

semis tardive (après le 15 Janvier) (fig. 4.6), ceci a été confirmé par des données statistiques fournies par l'ORMVAH ainsi que par des observations durant la campagne de mesure 2002-2003 (fig. 4.7). La date de semis est déterminée à partir de la fraction du couvert  $f_c$  par une simple équation. En effet, dès que la fraction du couvert atteint la valeur 0.1, la date de semis est obtenue en retranchant 13 jours de la date qui correspond à  $f_c=0.1$ .

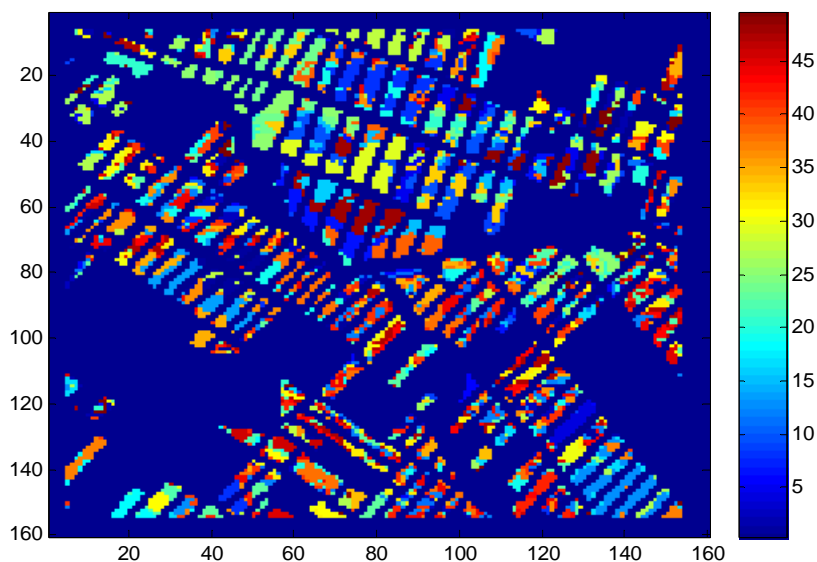


Figure 4. 4. Carte de 50 classes de blé (zone R3).

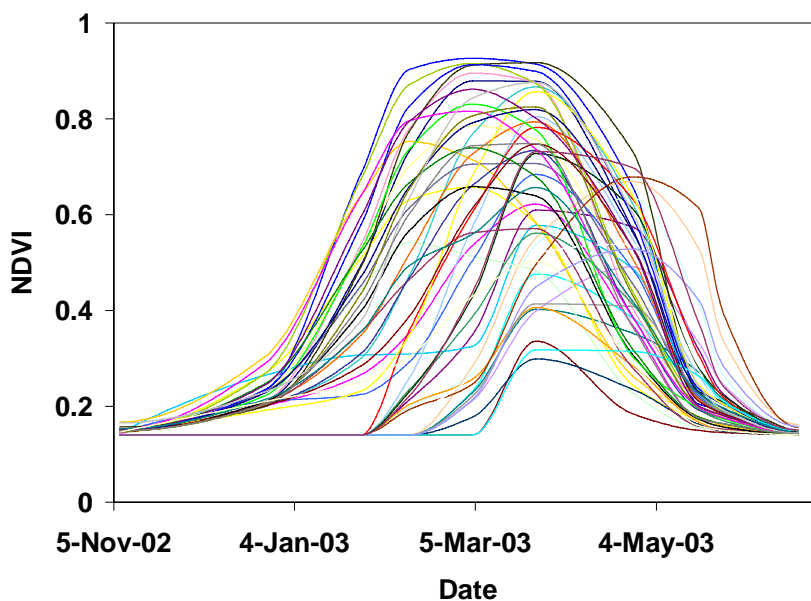


Figure 4. 5. Les profils de NDVI du blé correspondant à 50 classes.

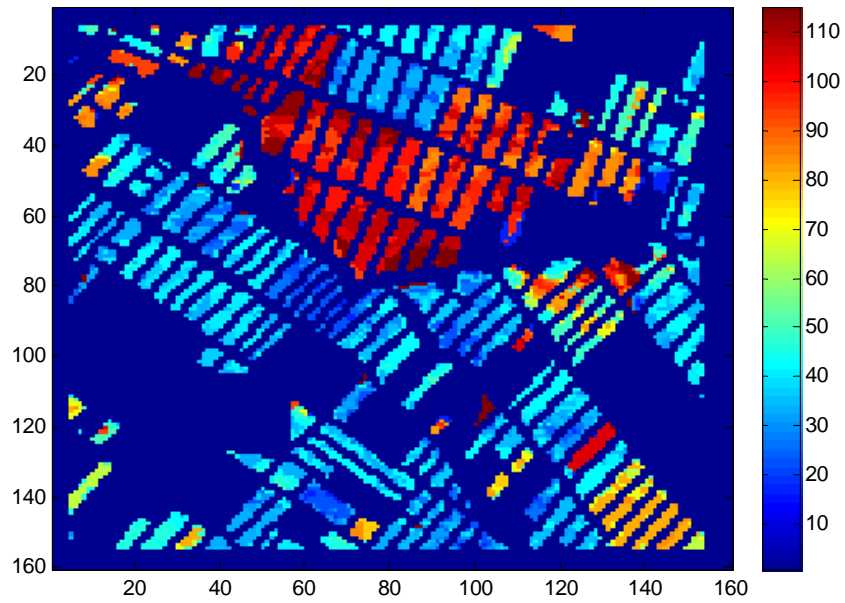


Figure 4. 6. Carte de la date de semis du blé (zone R3). La valeur 1 correspond au 7 Novembre 2002.

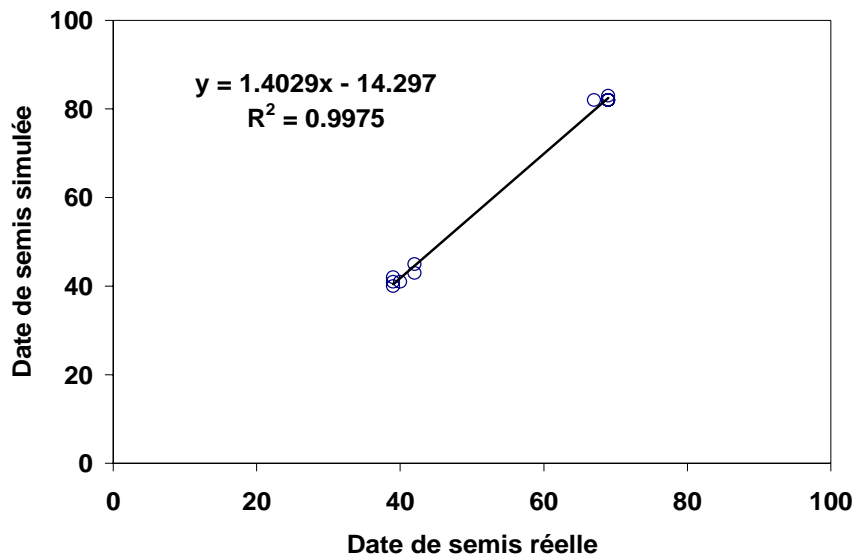
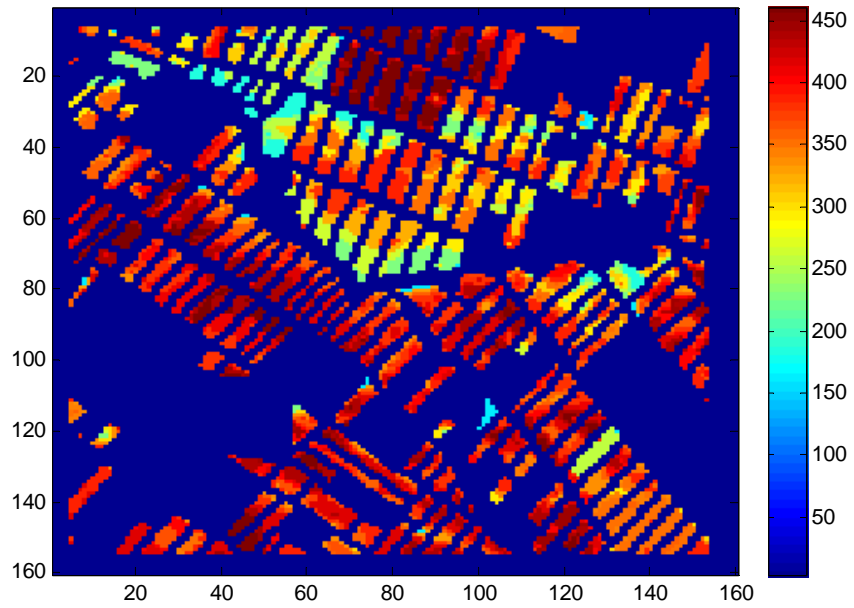


Figure 4. 7. Comparaison entre la date de semis du blé dérivée à partir des données de la télédétection et celle observée pendant la saison 2002/03.

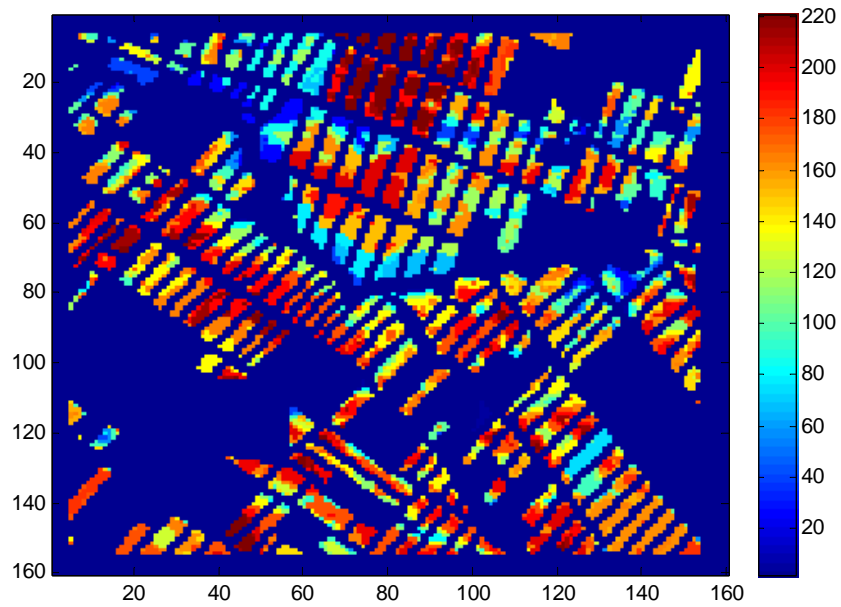
La carte du cumul saisonnier des besoins en eau du blé  $ET_c$  fournie par le modèle FAO-56 à coefficient cultural double est donnée par la figure 4.8. Nous constatons que cette carte est compatible avec la carte de date de semis (fig. 4.6). En effet, les besoins en eau sont légèrement inférieurs (380 mm) pour les classes à semis tardifs et ils sont élevés (420 mm) pour les classes de blé à cycle long (semis précoce). Des études menées dans d'autres régions ayant un climat quasi-similaire à notre région, ont montré que les besoins en eau du blé sont autour de 480 mm, dépendamment de la variété et de la date de semis (Bamouh, 1981; Elqortobi, 1987).

La comparaison des besoins en eau du blé avec la pluviométrie moyenne annuelle dans la région de Tensift Al Haouz (240 mm) donne une première estimation du niveau du déficit moyen qu'il faut combler par l'irrigation. Ainsi, le cumul saisonnier des quantités d'eau d'irrigation nécessaires pour le blé calculé par une équation simple du bilan hydrique (irrigation = Evapotranspiration – pluie) a été présenté sur la figure 4.9. Selon cette figure, nous constatons que la quantité d'eau nécessaire pour la culture du blé varie entre 50 et 220 mm, alors que la dotation en eau par l'ORMVAH a été de 140 mm pour la saison agricole 2002/2003 en moyenne sur le site test. Nous constatons aussi que le cumul d'eau d'irrigation est assez important pour les classes où la date de semis est tardive (après 15 Janvier). Ceci s'explique par le manque de pluie et par la forte demande évaporative ( $ET_0$ ) en fin de la saison agricole (Avril -Mai).

La distribution spatiale et temporelle (cumul mensuel) de la quantité d'irrigation nécessaire pour chaque pixel de blé a été calculée aussi et présentée sur la figure 4.10. Nous constatons que la quantité d'irrigation dépend de la croissance de la végétation et augmente au fur et à mesure que la quantité de végétation (NDVI) augmente. La quantité d'irrigation est maximale pendant le mois Mars et Avril. C'est la période qui correspond au plein développement du blé et le remplissage des grains.



**Figure 4. 8. Carte du cumul saisonnier des besoins en eau du blé estimé par l’approche double du modèle FAO-56 en utilisant les données satellites.**



**Figure 4. 9. Carte du cumul saisonnier d’irrigation de la culture du blé dans le bassin de Tensift Al Haouz.**

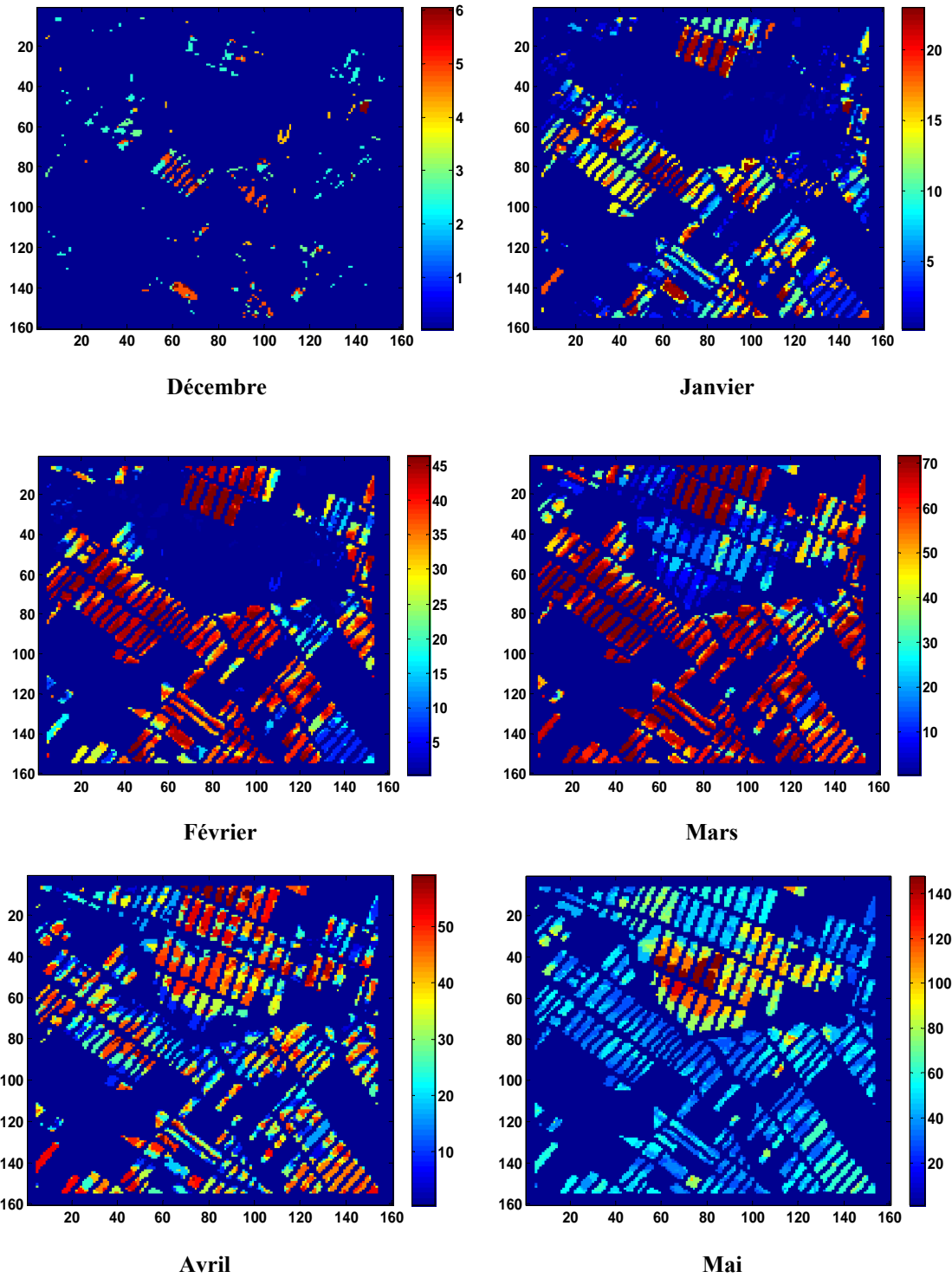


Figure 4. 10. Distribution spatiale et temporelle de la quantité d'irrigation de la culture du blé dans le bassin de Tensift Al Haouz.

### 4.2.3 Validation des résultats de la spatialisation à l'échelle parcellaire

Dans le but de valider les résultats de la spatialisation des besoins en eau du blé, nous avons comparé les valeurs de  $ET_c$  estimées par le modèle à partir des images satellitales avec les observations dont nous disposons sur trois parcelles de blé (cf. Chapitre 3). La figure 4.11 illustre cette comparaison. Globalement nous constatons que l'approche double du modèle FAO-56 donne des résultats acceptables pour la spatialisation des besoins en eau de la culture du blé. La valeur du Root Mean Square error (RMSE) entre l'évapotranspiration mesurée et celle simulée est 0.88 mm par jour. Cette valeur reste acceptable vu la valeur moyenne de l'ET qui est de l'ordre de 3.5 mm par jour. Nous constatons une surestimation du modèle par rapport aux mesures, ceci s'explique par le fait que le modèle simule l'évapotranspiration maximale (absence du stress) et non l'évapotranspiration réelle mesurée par l'eddy covariance, qui tient compte des conditions réelles du champ (présence de stress hydrique et agronomique, présence de maladies.....). Ce stress a été observé dans les champs 2 et 3 (cf. Chapitre 3 et Er-Raki et al., 2007). Une sous estimation du modèle par rapport aux mesures a été observée aussi sur la figure 4.11, qui est due essentiellement à l'évaporation du sol. En effet, le coefficient d'évaporation du sol simulé par le modèle est limité à la valeur 0.25 (Eq. 4.1), alors que nous avons observé des valeurs plus élevées dans le champ 2 (cf. Chapitre 3). La valeur 0.25 donne une estimation raisonnable du cumul saisonnier de l'évaporation du sol, mais elle peut surestimer ou sous estimer l'évaporation du sol à l'échelle journalière.

Pour montrer la performance de l'approche double du modèle FAO-56 dans l'estimation spatiale des besoins en eau du blé  $ET_c$  sous les conditions d'absence du stress hydrique et des faibles valeurs de l'évaporation du sol, nous avons comparé  $ET_c$  simulée par le modèle avec les observations dans un champ de blé non stressé et ayant une faible évaporation du sol (fig. 4.12). Nous constatons que le modèle simule bien l'évapotranspiration avec une valeur de RMSE de l'ordre de 0.40 mm par jour.

Les cumuls saisonniers d'irrigation prédits par le modèle FAO ont aussi été validés sur les mêmes champs de blé. La comparaison entre ces cumuls et ceux appliqués par l'ORMVAH (Tableau 4.1) montre que le modèle donne des résultats acceptables pour l'estimation d'irrigation. Une surestimation a été observée qui s'explique par l'absence du stress dans la simulation de l'évapotranspiration et par conséquence une surestimation de l'irrigation simulée.

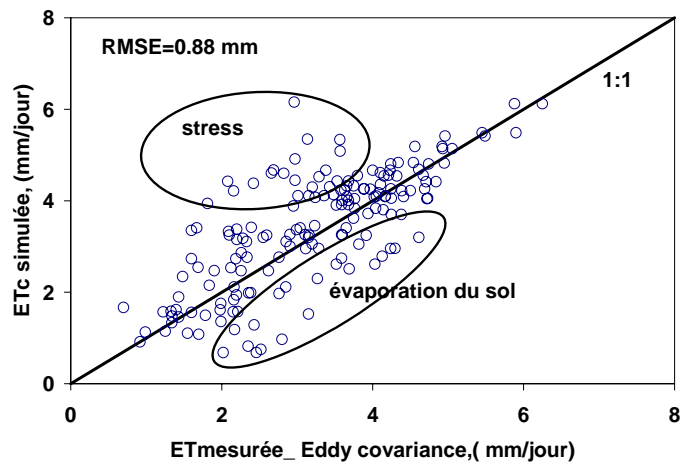


Figure 4. 11. Comparaison entre l'évapotranspiration maximale ETc simulée par l'approche double du modèle FAO-56 en utilisant les données satellites et l'évapotranspiration réelle (ETR) mesurée par la technique d'Eddy covariance sur trois blocs du blé.

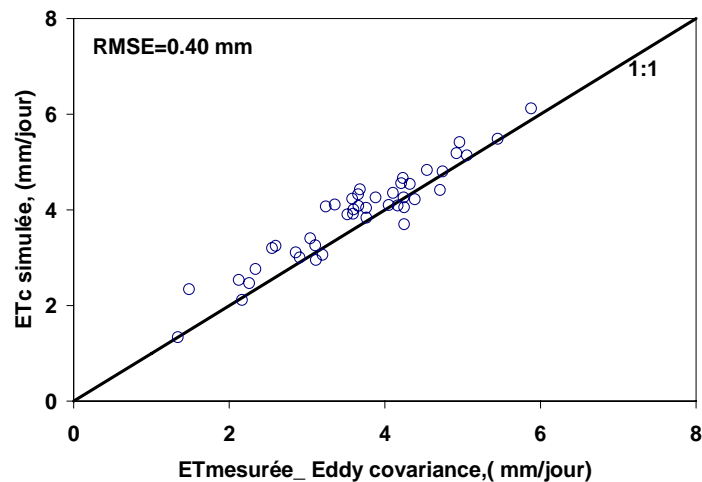


Figure 4. 12. Comparaison entre l'évapotranspiration maximale ETc simulée par l'approche double du modèle FAO-56 en utilisant les données satellites et l'évapotranspiration réelle (ETR) mesurée par la technique d'Eddy covariance sur un champ de blé non stressé et de faible évaporation du sol.

Table 4. 1. Comparaison entre le cumul saisonnier d'irrigation (en mm) observé et celui simulé par le modèle FAO-56 en utilisant les données de la télédétection dans trois champs du blé.

champ	Valeur estimée	Valeur observée
Champ 1	190	180
champ 2	140	120
champ 3	165	120

### 4.3 Conclusion

Notre objectif dans ce chapitre est de spatialiser l'approche double du modèle FAO-56 afin de cartographier le besoin en eau de la culture du blé, qui est une donnée nécessaire pour le pilotage de l'irrigation. L'utilisation combinée de données recueillies sur le terrain (campagne de mesure 2002/2003) et de données satellitales (SPOT et LANDSAT) a permis la spatialisation de l'approche double du modèle FAO-56. Avant d'appliquer ce modèle à l'échelle spatiale, nous avons procédé à la calibration puis à la validation du modèle à l'échelle locale ou parcellaire (cf. chapitre 3).

Selon le modèle FAO-56, deux paramètres sont nécessaires pour spatialiser les cartes des besoins en eau. Il s'agit de l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  et du coefficient cultural  $K_c$ . La spatialisation de  $ET_0$  a été faite en utilisant les données climatiques tels que la température, l'humidité, le vent, le rayonnement global issues du modèle météorologique ALADIN de la Direction de la Météorologie Nationale. Dans cette étude, nous avons utilisé uniquement l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  calculée par l'équation du modèle FAO-Penman-Monteith, en utilisant les paramètres climatiques mesurés par une station météorologique installée dans le site test du blé. Pour le coefficient cultural  $K_c$ , les équations établies à partir des données collectées au sol entre  $K_{cb}$  et  $K_e$  et l'indice de végétation NDVI (Eq. 2.13 du Chapitre 2 et Eq. 4.1 de ce chapitre) ont été appliquées aux images satellitaires.

Les résultats de la spatialisation montrent que les besoins saisonniers en eau du blé dans la région de Tensift Al Haouz durant la saison agricole 2002/2003, varient entre 380 mm et 420 mm selon la durée du cycle (semis tardifs ou précoce). Les résultats montrent aussi que le cumul saisonnier moyen de l'irrigation est de l'ordre de 135 mm, qui est proche de la dotation en eau fournie par l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Haouz (ORMVAH) (140 mm). Nous avons aussi trouvé que la quantité d'irrigation dépend de la croissance de la végétation. Elle augmente avec la quantité de végétation (NDVI) et atteint sa valeur maximale durant les mois de Mars et d'Avril qui correspond à la période de plein développement du blé.

La validation des résultats de la spatialisation des besoins en eau du blé avec les observations dont nous disposons sur trois parcelles du blé (mesure par l'Eddy covariance) montre que l'approche double du modèle FAO-56 donne des résultats acceptables (RMSE = 0.88 mm par jour) pour la spatialisation des besoins en eau de la culture du blé. Cependant, une sur

estimation des besoins en eau par le modèle est due au stress hydrique qui n'est pas pris en compte par le modèle, et une sous estimation liée à l'évaporation du sol. La validation du modèle FAO-56 sous des conditions d'absence du stress hydrique et d'absence d'évaporation du sol montre que le modèle simule bien l'évapotranspiration avec un Root Mean Square Error (RMSE) de l'ordre de 0.40 mm par jour.

## **CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse avaient pour principal objectif **d'estimer les besoins en eau des cultures dominantes (blé, olivier et oranger) dans la région de Tensift Al Haouz**. L'approche climatique basée sur la méthode FAO-56 a été utilisée. Nous avons présenté, dans un premier temps les résultats relatifs à l'application du modèle FAO-56 pour la détermination des besoins en eau de trois cultures à l'échelle parcellaire (chapitre 3). Les coefficients culturaux correspondants à ces trois cultures ont été déterminés. La partition du flux de l'évapotranspiration a été validée pour la culture de l'olivier à l'aide des mesures de flux de la sève. Après, nous avons présenté les résultats liés à la spatialisation du modèle FAO-56 pour cartographier les besoins en eau de la culture du blé à une échelle plus large (chapitre 4).

## **Application du modèle FAO-56 à l'échelle parcellaire**

Les résultats trouvés dans cette étude montrent que l'application directe du modèle FAO-56 en utilisant les coefficients culturaux standards surestime l'évapotranspiration réelle (ETR) de trois cultures étudiées (blé, olivier et oranger). Pour le cas du blé par exemple, une surestimation de l'ordre de 17% par rapport aux mesures d'eddy covariance a été relevée.

Connaissant la rareté de l'eau dans la région et le prix de revient de l'eau d'irrigation, il est déterminant de réduire cette surestimation. A cette fin, la calibration et la validation de ce modèle sont nécessaires. Les valeurs des coefficients culturaux  $K_c$  trouvées après la calibration correspondantes aux trois phases de développement (initiale, mi-saison et arrière saison) pour la culture de l'olivier sont respectivement de 0.60, 0.62 et 0.65, qui sont inférieures à celles données dans le document FAO-56 (0.65, 0.7 et 0.7). Pour la culture du blé, le coefficient de transpiration  $K_{cb}$  pendant la phase mi-saison a été réduit de la valeur 1.1 suggérée par le document FAO-56 à la valeur 0.9. Pour les orangers, les coefficients culturaux calibrés (une valeur moyenne annuelle de  $K_c$  de l'ordre de 0.55) sont aussi inférieurs à ceux donnés dans le document de la FAO-56. Une réduction de l'ordre de 20% a été observée.

Comme l'approche à coefficient cultural double du modèle FAO-56 permet de calculer séparément l'évaporation du sol et la transpiration de la végétation, il est plus intéressant de valider cette partition du flux d'évapotranspiration. Pour ceci des mesures de flux de la sève de l'olivier ont été faites afin de calculer la transpiration de la plante. La comparaison entre les deux

composantes de l'ETR mesurées et simulées montre que l'approche double donne des résultats acceptables pour la partition de l'évapotranspiration malgré sa simplicité (équation simple du bilan hydrique). Cette partition nous permet aussi de quantifier les pertes en eau par évaporation du sol liées à la technique d'irrigation (gravitaire). Une quantité importante d'eau se perd par évaporation du sol (30% de ETR) et peut être économisée par un choix judicieux de la technique d'irrigation (goutte à goutte par exemple).

Pour les cultures annuelles comme le cas du blé, les coefficients cultureux peuvent être dérivés à partir des indices de végétation (NDVI, SAVI...), à travers des relations établies entre ces deux paramètres (Eqs. 3.2 et 4.1). Ces relations ont été combinées avec le modèle FAO-56 pour estimer les besoins en eau du blé. Comme nous l'avons prédit, cette méthode donne une bonne estimation de l'ETR du blé. L'avantage de cette méthode est qu'elle nous a permis de spatialiser le modèle FAO-56 en utilisant les données de la télédétection.

## **Spatialisation du modèle FAO-56**

La cartographie des besoins en eau de la culture ou évapotranspiration est essentielle pour le pilotage de l'irrigation à l'échelle spatiale. L'utilisation combinée de données recueillies sur le terrain (campagne de mesure 2002/2003) et de données satellitaires (SPOT et LANDSAT) a permis la spatialisation de l'approche double du modèle FAO-56.

Selon le modèle FAO-56, deux paramètres sont nécessaires à spatialiser afin de produire des cartes des besoins en eau. Il s'agit de l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  et du coefficient cultural  $K_c$ . La spatialisation de  $ET_0$  a été faite en utilisant les données climatiques issus du modèle météorologique ALADIN de la Direction de la Météorologie Nationale. Pour le coefficient cultural  $K_c$ , les équations établies à partir des données acquises au sol entre le coefficient de transpiration  $K_{cb}$  et NDVI (Eq. 3.2) d'une part, et entre le coefficient d'évaporation du sol  $K_e$  et NDVI (Eq. 4.1) d'autre part, ont été appliquées aux images satellitaires. Les résultats de la spatialisation montrent que les besoins saisonniers en eau du blé d'hiver dans la région de Tensift Al Haouz durant la saison agricole 2002/2003, varient entre 380 mm et 420 selon la durée du cycle (semis tardifs ou précoce). Les résultats montrent aussi que le cumul saisonnier moyen de l'irrigation est de l'ordre de 135 mm, qui est proche de la dotation en

eau fournie par l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Haouz (ORMVAH) (140 mm). Nous avons aussi trouvé que la quantité d'irrigation dépend du stade de croissance de la végétation. Elle augmente avec la quantité de végétation (NDVI) et atteint sa valeur maximale durant les mois de mars et d'avril qui correspondent à la période de remplissage des grains.

La validation des résultats de la spatialisation des besoins en eau du blé avec les observations dont nous disposons sur trois parcelles du blé (mesure par l'eddy covariance) montre que l'approche double du modèle FAO-56 donne des résultats acceptables (RMSE = 0.88 mm par jour) pour la spatialisation des besoins en eau de la culture du blé. Cependant, une sur estimation des besoins en eau par le modèle est due au stress hydrique qui n'est pas pris en compte par le modèle, et une sous estimation reliée à l'évaporation du sol qui est calculée par une équation simple. La validation du modèle FAO-56 sous des conditions d'absence du stress hydrique et d'absence d'évaporation du sol montre que le modèle simule bien l'évapotranspiration avec un Root Mean Square Error (RMSE) de 0.40 mm par jour.

## Perspectives

Notre étude, a été basée sur une approche combinant la modélisation, l'expérimentation et la télédétection pour estimer les besoins en eau des cultures. Nous dégagons deux types de perspectives: des perspectives concernant la modélisation à l'échelle locale et d'autres concernant l'application de la télédétection pour la spatialisation du modèle FAO-56.

Pour les perspectives de la modélisation à l'échelle parcellaire, nous avons vu que le modèle FAO-56 (approche simple et double) donne des résultats acceptables dans l'estimation des besoins en eau des cultures (évapotranspiration). Cependant, nous avons trouvé que l'approche double du modèle FAO-56 ne simule pas bien l'évaporation du sol après les événements de pluie ou d'irrigation (gravitaire). Elle surestime l'évaporation du sol comme d'autres modèles plus compliqués (STICS par exemple). L'estimation de l'évaporation du sol selon le type d'irrigation et selon le type de la culture (annuelle ou pérenne) reste une question posée quand on utilise des modèles simples. La validation de la partition du flux de l'évapotranspiration a été faite uniquement pour la culture de l'olivier à l'aide des mesures de flux de la sève. Cette partition nous a permis de quantifier les pertes en eau par évaporation directe du sol. Ceci sera utile aussi pour le cas de l'oranger pour lequel nous avons évalué ces pertes par une comparaison générale entre  $K_c$  du site irrigué par goutte à goutte et celui du site

irrigué par gravitaire. Une bonne évaluation de ces pertes peut être faite par la mesure séparée (partition) de la transpiration de la plante et l'évaporation du sol. Ceci a été fait pour le cas de l'olivier où la technique de flux de la sève a été utilisée pour mesurer directement la transpiration de la plante, la technique isotopique pour mesurer l'évaporation du sol et l'eddy covariance pour la mesure globale de l'évapotranspiration (Williams et al., 2004).

Concernant les perspectives d'application de la télédétection, nous nous sommes limités à la spatialisation du modèle FAO-56 uniquement pour la culture du blé. L'extension à d'autres cultures présentes dans le bassin de Tensift Al Haouz sera nécessaire afin d'estimer les besoins en eau des cultures à l'échelle du bassin. D'autre part, nous avons déterminé uniquement des cartes de la quantité d'eau qu'il faut appliquer et non la date de son application, qui est importante pour les décideurs. Pour cela, nous envisageons d'utiliser l'information issue de la télédétection infrarouge thermique (IRT) dans une optique d'estimer l'état hydrique de la culture (stress hydrique), et les images radar pour bien estimer l'évaporation du sol. Une telle amélioration sera utilisée pour affiner un outil d'aide à la décision pour la gestion de l'eau agricole dans la plaine du Haouz. Cet outil est nommé SAMIR « **S**atellites **M**onitoring **I**rrigation», il est principalement basé sur la méthode FAO-56 et il est en cours de développement (Simonneux et al., 2006b).

Aussi, nous aurons l'occasion de travailler avec d'autres données de télédétection à haute résolution (8 m) et une grande répétitivité temporelle (4 jours) pour améliorer nos travaux de spatialisation du modèle. Ce sont les images FORMOSAT-2 (<http://www.nspo.org.tw/>), qui couvrent le même site test de notre étude durant la saison agricole 2005/2006 du blé.

Enfin, l'application du modèle FAO-56 aura lieu sur d'autres données acquises dans la vallée de Yaqui (état de Sonora, située au Nord West du Mexique), une zone semi aride dont les conditions climatiques sont similaires à celles de la région de Tensift Al Haouz. Durant mon séjour au Mexique (Août à Janvier), des résultats préliminaires sur l'application de ce modèle sur deux cultures dominantes (la vigne et l'amande) dans la région de Sonora ont été obtenus. De même des campagnes de mesures de flux de la sève ont été faites (et en cours) sur ces deux types de cultures afin de valider la partition du flux d'évapotranspiration simulée par l'approche double du modèle FAO-56.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration—Guidelines for Computing Crop Water Requirements, Irrigation and Drain, Paper No. 56. FAO, Rome, Italy, 300 pp.
- 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.
- Allen, R.G., Tasumi, M., 2003. Application of SEBAL for western US water rights regulation and planning. International Workshop Use of Remote Sensing of Crop Evapotranspiration for Large Regions.
- Amayreh, J., Al-Abed, N., 2004. Developing crop coefficients for field-grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under drip irrigation with black plastic mulch. *Agricultural Water Management*. doi:10.1016/j.agwat.2004.10.008.
- Amrhar, H., 2004. Synergie modèle de prévision météorologique et données stationnelles pour spatialiser les paramètres climatiques sur le bassin versant du Tensift. Mémoire de Fin d'Etudes du diplôme d'Ingénieur de l'Ecole Hassania des Travaux Publics (EHTP), Maroc, p 62.
- Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E.T., Hatfield, J.L., 1984. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agron. J.*, 76: 300-306.
- Asrar, G., E.T., Kanemasu, R.D., Jackson, et P.J., Pinter, 1985. Estimating of total above ground phytomass production using remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 17: 211-220.
- Baker, J.M.; Van Bavel, C.H.M, 1987. Measurements of mass flow of water in the stems of herbaceous plants. *Plant Cell Environ.*, 10 :777-782.
- Bamouh, A., 1981. Effets d'une sécheresse en début de cycle sur l'élaboration du rendement du ble tendre "Nesma 149". Mémoire de Troisième Cycle, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc.
- Bandyopadhyay, P. K., Mallick S., 2003. Actual evapotranspiration and crop coefficients of wheat (*Triticum aestivum*) under varying moisture levels of humid tropical canal command area. *Agricultural Water Management*, 59: 33-47.

- Barret, DJ., Hatton, TJ., Ash, JE., Ball., MC., 1995. Evaluation of the heat pulse velocity technique for measurement of sap flow in rainforest and eucalypt forest species of south-eastern Australia. *Plant Cell Environ*, 18: 463-469.
- Bausch, W. C., Neale, C.M.U., 1987. Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept. *Trans ASAE* 30 (3): 703-709
- Bausch, W. C., Neale, C.M.U., 1989. Spectral Inputs Improve Corn Crop Coefficients and Irrigation Scheduling. *Trans. ASAE*, 32(6): 1901-1908.
- Bausch, W.C., 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sens. Environ*, 46: 213-222.
- Bausch, W. C., 1995. Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. *Agricultural Water Management.*, 27: 55-68.
- Baxter, E.V., Nadim, S., Farajalla, Nalneesh, G., 1996. Integrated GIS and distributed storm water runoff modeling. In: Goodchild, et al. (Eds.), *GIS and Environmental Modeling Progress and WRN Research Issues*. Donald F. Hemenway Jr., Fort Collins, pp. 199–204.
- Becker P., and Edwards., 1999. Corrected heat capacity of wood for sap flow calculations. *Tree Physiol*, 19: 767-768.
- Ben Hadj, I. 2004. Calibration spatialisée d'un modèle de bilan hydrique en région semi aride à partir d'images satellites optiques haute résolution. Mémoire du diplôme d'Ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg (ENSPS), France, p69.
- Berliner, P., Oosterhuis, D. M., and Green, G. C., 1984. Evaluation of the infrared thermometer as a crop stress detector. *Agric. Forest Meteorol*, 31: 219-230.
- Blaney, H.F., Criddle, W.D., 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatologically and irrigation data. *USDA (SCS) TP 96 48*.
- Boubker, J., 2004. La certification des agrumes au Maroc. CIHEAM-IAMB, Options Méditerranéennes, Série B/021-Proceedings of the Mediterranean Network on Certification of Citrus.
- Boulet, G., Chehbouni, A., Braud, I., Vauclin, M., Haverkamp, R., Zammit, C., 2000. A simple water and energy balance model designed for regionalization and remote sensing data utilization. *Agric. Forest Meteorol.*, 105 : 117–132.
- Brasa, A., Martí'n de Santa Olalla, F., Caselles, V., & Jochum, M., 1998. Comparison of evapotranspiration estimates by NOAA-AVHRR images and aircraft flux measurement in

- a semiarid region of Spain, *Journal of the Agricultural Engineering Resources*, 70: 285–294.
- Burgess, S.S.O., Adams, M.A., Turner, N.C., Ong, C.K. 1998. The redistribution of soil water by tree root systems. *Oecologia*, 115: 306-311.
- Burgess, S.S.O., Adams, M.A., Turner, N.C., Beverly, C.R., Ong, C.K., Khan, A.A.H., Bleby, T.M. 2001. An improved heat pulse method to measure slow and reverse flow in woody plants. *Tree Physiology*. 21:589-598.
- Braud, I., Dantas-Antonino, A.C., Vauclin, M., Thony, J.L., Ruelle, P., 1995. A simple soil-plant-atmosphere transfer model (SiSPAT) development and field verification. *J. Hydrol.* 166: 213–250.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne-Baret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Delécolle R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn, *Agronomy journal* 18: 311-346.
- Brisson N., 1999. Documentation de STICS version 4.0, Copyright INRA.
- Carlson, T.N., et M.J., Buffum, 1989. On estimating total daily evapotranspiration from remote surface temperature measurements. *Remote Sensing of Environment*, 29, 197-207.
- Caselles, V., & Delegido, J., 1987. A simple model to estimate the daily value of the regional maximum evapotranspiration from satellite temperature and albedo images, *International Journal of Remote Sensing*, 8: 1151– 1152.
- Caselles, V., Artigao, M.M., Hurtado, E., Coll, C., Brasa, A., 1998. Mapping actual evapotranspiration by combining landsat TM and NOAA-AVHRR images: application to the Barrax Area, Albacete, Spain. *Remote Sensing of Environment* 63, 1–10.
- Chanzy, A., 1991. Modelisation simplifiée de l'évaporation d'un sol nu utilisant l'humidité et la température de surface accessibles par télédétection. Thèse de docteur ingénieur agronome de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, France, p221.
- Chaudhury, B.J., 1997. Estimating land surface evaporation using multispectral satellite and ancillary data. In: Kite, G.W., Pietronir, A., Pultz, T. (Eds.), *Applications of Remote Sensing in Hydrology*. Proceedings of the Symposium No. 17 NHRI, Saskatoon, Canada National Hydrology Research Institute (NHRI).

- Chehbouni, A., D.C. Goodrich, M.S. Moran, C.J. Watts, Y.H. Kerr, G. Dedieu, W.G. Kepner, W.J. Shuttleworth et S. Sorooshian, 2000. A Preliminary Synthesis of Major Scientific Results during the Salsa Program, *Agricultural and Forest Meteorology*, 105, 311-323.
- Chehbouni A., Escadafal R., Dedieu G., Errouane S., Boulet G., Duchemin B., Mougenot B., Sminonneaux V., Seghieri J., Timouk F., 2003. A multidisciplinary program for assessing the sustainability of water resources in semi-arid basin in Morocco: SUDMED. EGS - AGU - EUG Joint Assembly, Nice, France, 6-11 April 2003.
- Chehbouni A., Escadafal R., Boulet G., Duchemin B., Dedieu G., Hannich L., et al. 2004. Integrated modelling and remote sensing approach for sustainable management of water resources in Tensift region (SudMed) : preliminary results, current status and new challenges. *Integrated Water Resources Research and Development in southeastern Morocco*, International Conference, 1st- 2nd April 2004, Ouarzazate, Morocco.
- Chehbouni, A., Escadafal, R., Boulet, G., Duchemin, B., Simonneaux, V., Dedieu, G., Mougenot, B., Khabba, S., Kharrou, H., Merlin, O., Chaponnière, A., Ezzahar, J., Er-Raki, S., Hoedjes, J., Hadria, R., Abourida, H., Cheggour, A., Raibi, F., Hanich, L., Guemouria, N., Chehbouni, Ah., Oliosio, A., Jacob, F., Sobrino, J., 2007. The Use of Remotely Sensed data for Integrated Hydrological Modeling in Arid and Semi-Arid Regions: the SUDMED Program. *Int. J. Remote Sens.* accepted.
- Choudhury, B.J., Ahmed, N.U., Idso, S.B., Reginato, R.J., and Daughtry, C.S.T., 1994. Relations Between evaporation coefficients and vegetation indices studies by model simulations. *Remote Sens. Environ.*, 50: 1-17.
- Chuanyana, Z., Zhongrena, N., Zhaodonga, F., 2004. GIS-assisted spatially distributed modeling of the potential evapotranspiration in semi-arid climate of the Chinese Loess Plateau. *Journal of arid environment*, 58: 387-403.
- Civantos, L., 1997. La olivicultura en el mundo y en España. In: Barranco, D., Fernandez-Escobar, R., Rallo, L. (Eds.), *El cultivo del olivo*. Mundi-Prensa, Madrid, pp. 15–31.
- Damagnez, J. 1968. les bilans hydriques et énergétiques et l'étude des facteurs du milieu. *Agroclimatological method. Proc. Of the Redding Sym.* UNESCO, Paris.
- Droogers, P., Allen, R.G., 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrig. Drain. Syst.*, 16: 33–45.

- Duchemin, B., Hadria, R., Er-Raki, S., Boulet, G., Maisongrande, P., Chehbouni, A., Escadafal, R., Ezzahar, J., Hoedjes, J.C.B., Karrou, H., Khabba, S., Mougnot, B., Olioso, A., Rodriguez, J-C., Simonneaux, V., 2006. Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: on the use of relationship between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management*. 79 1- 27.
- Ducrocq, M., 1987. Les bases de l'irrigation. Editions scientifiques universitaires, Mkalles- Mar Roukoz , BP 1514-Beyrouth (Liban).
- Edwards WRN. , Becker, P., Cermak, J. 1996. A unified nomenclature for sap measurements. *Tree Physiol*, 17: 65-67.
- El Guezar, F., Lahmadi, L. 2003. Installation d'une station d'intercalibration d'instruments de mesures micrometeorologiques. Mémoire de fin d'étude, Faculté des sciences et techniques Gueliz , Marrakech, p 65.
- El Hari, A. 1992. Besoins en eau des agrumes dans le Haouz- Effet du stress hydrique sur le rendement et le calibre du clémentinier. Diplôme d'Etudes Supérieures (DEA), Université Cadi Ayyad de Marrakech. Faculté des Sciences.
- El karouni, K., Koraichi, Y. 2005. Estimation et Spatialisation de l'évapotranspiration de référence sur le bassin versant de Tensift. Mémoire de Fin d'Etudes du diplôme d'Ingénieur de l'Ecole Hassania des Travaux Publics (EHTP), Maroc, p 84.
- Elqortobi A., 1987. Simulation du déficit hydrique et prédiction des rendements des céréales d'automne, mémoire de 3ème cycle Agronomie, Département d'agronomie, IAV Hassan II, Rabat.
- Er-Raki, S., Chehbouni, G., Guemouria,N., Duchemin, B., Ezzahar, J., Hadria, R. 2007. Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. *Agricultural Water Management journal.*, 87: 41-54.
- Fernandez, J.E., Moreno, F., 1999. Water use by the olive tree. *Journal of Crop Production*. 2 (2): 101–162.
- Fernández, J. E., M. J. Palomo, A. Díaz-Espejo, B. E. Clothier, S. R. Green, I. F. Girón, F. Moreno. 2001. Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation:

- tests, root flow and diagnostics of water stress. *Agricultural Water Management*, 51: 99-123.
- Garatuza, J. P. and Watts, C. J. 2005. The use of remote sensing for estimating ET of irrigated wheat and cotton in Northwest Mexico. *Irrigation and Drainage Systems*, 19: 301-320.
- Goodrich, D.C., A. Chehbouni, B. Goff, B. MacNish, T. Maddock, S. Moran, W.J. Shuttleworth, D.G. Williams, C. Watts, et al. 2000. Preface Paper to the Semi-Arid Land-Surface-Atmosphere (SALSA) Program Special Issue, *Agricultural and Forest Meteorology*, 105: 3-20.
- Goutorbe, J.P., T. Lebel, A.J. Dolman, P. Kabat, Y.H. Kerr, B. Monteny, S. D. Prince, J.N.M. Stricker, A. Tinga et et J.S Wallace, 1997a. An overview of HAPEX-Sahel: a study in climate and desertification, *Journal of Hydrology*, 188-189, 4-17.
- Granger, R.J., 1997. Comparison of surface and satellite derived estimates of evapotranspiration using a feedback algorithm. In: Kite, G.W., Pietroniro, A., Pultz, T. (Eds.), *Applications of Remote Sensing in Hydrology*. Proceedings of the Symposium No. 17 NHRI, Saskatoon, Canada. National Hydrology Research Institute (NHRI), pp. 21–81.
- Granier, A. 1985. A new method of sap flow measurements in tree stems. *Annales des Sciences Forestiers*, 42:193-200.
- Granier, A. 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiol.* 3: 309-320.
- Green, A.E., S.R., Astill, M.S. and Caspari, H.W. 2000, ‘ Estimating latent heat flux from a vineyard using scintillometry’, *J. Terres. Atmos. Ocean. Sci.* 11(2), 525-542.
- Hanson, B.R., and May, D. M. 2005. Crop coefficients for drip-irrigated processing tomato. *Agricultural Water Management*. doi:10.1016/j.agwat.2005.04.007.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric.* 1 (2), 96–99.
- Heilman, J.L., Heilman, W.E. and Moore, D.G., 1982. Evaluating the Crop Coefficient Using Spectrales Reflectance, *Agronomy Journal*, 74: 967-971.
- Helson, D., 2003. Estimation de l'évapotranspiration des cultures annuelles dans la plaine du haouz (Marrakech) par télédétection et la méthode FAO. Rapport de stage de DESS télédétection. CESBIO, France. p42.

- Huete, A.R. 1988. A Soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.*, 25: 295-309.
- Hunsaker, DJ., Pinter, PJ Jr, Barnes, EM. Kimball BA., 2003. Estimating cotton evapotranspiration crop coefficients with a multispectral vegetation index. *Irrig Sci* 22: 95-104.
- Hunsaker, DJ., Pinter, PJ Jr, Kimball, BA., 2005. Wheat basal crop coefficients determined by normalized difference vegetation index. *Irrig Sci.*, 24: 1-14.
- Idso, S. B., Jackson, R. D., and Pinter, P. J., 1977. Remote sensing of crop yields. *Science*, 196: 19-25.
- Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., and Pinter, Jr., P. J., 1980. Remotely sensed crop temperatures and reflectances as inputs to irrigation scheduling. In: *Irrigation and Drainage special conference proceedings, 23-25 July, Boise, Idaho*. ASCE, New York, pp 390-397.
- Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., and Pinter, P. J., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resource Research*, 17: 1133-1138.
- Jackson, R.D., 1983. Spectral indices in N-space, *Remote Sensing of Environment*, 14: 409- 421.
- Jackson, R. D., 1985: Evaluating evapotranspiration at local and regional scales. *Proc. IEEE*, 73: 1086-1095.
- Jackson R. D., and Schmugge, T. J, 1989. Passive microwave remote sensing for soil moisture: Some supporting research. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 27: 225-235.
- Jackson, R. D., Schmugge, T. J. and O'Neill, P., 1984. Passive microwave remote sensing of soil moisture from an aircraft platform. *Remote Sens. Environ.*, 14: 135-151.
- Jensen, M.E., Burman, R.D., Allen, R.G., 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70*, p. 332.
- Karrou, M., 2003, *Conduite du blé au Maroc*. Institut National de la recherche agronomique, pp. 1-57 (Rabat: INRA éditions).
- Kashyap, P.S., Panda, R.K., 2001. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of cropcoefficients for potato crop in a sub-humid region. *Agric. Water Manage.*, 50 (1): 9–25.

- Katerji, N., and Hallaire, M. 1984: Explicative model of water transfert in the plant and daily evolution of leaf potential. Les besoins en eau des cultures, Conférence internationale, Paris, 11/14 Septembre.
- Kerr, Y.H., and Njoky, E.G., 1988. Model for interpreting microwave from land and surfaces as seen from space. IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing.
- Krieg, D. R., Hatfield, J. L., Gertsis, A. C., and Staggenborg, S. A., 1993. Plant monitoring: water stress and water management. In "Beltwide cotton," 3, pp. 1191-1193.
- Lagouarde, J.P., Choisnel, E., 1989. A new agrometeorological model for evaporation and surface temperature.
- Loussert. R. 1987. Les agrumes. Techniques Agricoles Mediteraneennes.
- Luquet, D. 2002. Suivi de l'état hydrique des plantes par infrarouge- analyse expérimentale et modélisation 3D de la variabilité des températures au sein d'une culture en rang de cotonniers. Thèse de doctorat de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, France, p167.
- MacQueen J. B. 1967. Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations, Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability", Berkeley, University of California Press, 1: 281-297.
- MADREF, 2000. Investir en agriculture, partie II- le secteur agricole. [http://agriculture.ovh.org/invest\\_2.pdf](http://agriculture.ovh.org/invest_2.pdf).
- Makkink, G. F., 1957 Testing the Penman formula by means of lysimeters, J. Institute of Water Engineering, 11: 277-288.
- Marek, T.H., A.D. Schneider, T.A. Howell, and L.L. Ebeling. 1988. Design and construction of large weighing monolithic lysimeters. Trans. ASAE, 31:477-484.
- Marshall DC., 1958. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. Plant Physiol 33: 385-396.
- Monteith, J. L., 1965. Evaporation and Environment. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology, University Press, Cambridge, 19: 205-234.
- Moore, I.D., 1996. Hydrologic modeling and GIS. In: Goodchild, et al. (Eds.), GIS and Environmental Modeling Progress and Research Issues. Donald F. Hemenway Jr., Fort Collins, pp. 143-149.

- Moran, M. S., 1994. Irrigation management in Arizona using satellites and airplanes. *Irrigation Science*, 15:35-44.
- Moran, M. S., Inoue, Y., and Barnes, E. M., 1997. Opportunities and limitations for image based remote sensing in precision crop management. *Remote Sensing Environment*, 61: 319-346.
- Moran, M. S., 2001. Thermal infrared measurements as an indicator of plant ecosystem health. In Press.
- Neale, C.M.U., Bausch W.C., and Heerman D.F., 1989. Development of reflectance-based crop coefficients for corn. *Trans. ASAE*, 32(6): 1891-1899.
- Olioso, A., Chauki, H., Courault, D., and Wigneron, J.-P., 1999, Estimation of evapotranspiration and photosynthesis by assimilation of remote sensing data into SVAT models, *Remote Sensing of Environment*, 68: 341–356.
- Paço, T. A., Ferreira, M. I., Conceição, N. 2006 Peach orchard evapotranspiration in a sandy soil: Comparison between eddy covariance measurements and estimates by the FAO 56 approach. *Agricultural Water Management*, 85: 305-313.
- Palomo, M.J., Moreno F., Fernandez, J.E., Diaz- Espejo A., Giron I.F., 2002. Determining water consumption in olive orchards using the water balance approach. *Agricultural Water Management*, 55: 15-35.
- Pastor, M. and Orgaz, F. 1994. Riego deficitario del olivar: los programas de recorte de riego en olivar. *Agricultura no 746*: 768-776 (in spanish).
- Penman, H.L., 1948, Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil, and Grass, *Proc. R. Soc. London*, A193, pp. 116-140.
- Praloran, J. C. 1971. Les agrumes. *Techniques Agricoles et production tropicale*.
- Priestley, C.H.B. and R.J. Taylor, 1972, On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large Scale Parameters, *Monthly Weather Review*, 100, pp. 81-92.
- Purevdorj, T.S., R. Tateishi, T. Ishiyama et Y. Honda, 1998. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices, *International Journal of Remote Sensing*, 19: 3519- 3535.
- Reginato, R. J., Jackson, R. D., & Pinter, J. P., 1985. Evapotranspiration calculated from remote multispectral and ground station meteorological data, *Remote Sensing of Environment*, 18: 75– 89.

- Ritchie J.T., 1986. The CERES-Maize model In: CERES-Maize: Simulation model of maize growth and development. Ed by Jones C.A., and Kiniry J.R., Texas A M University press, college station, Tx: 3-6.
- Rivas, R. and Caselles, V., 2004. A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing-based surface temperature and local meteorological data. *Remote Sensing of Environment*, 93: 68–76.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., Harlan J.C., 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final report, Greenbelt MD: 1-371.
- Running, S.W., Baldoocchi, D.D., Turner, D.P., Gower, S.T., Bakwin, P.S., K..A., 1999. A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling ecosystem modelling and EOS data. *Remote Sens. Environ.*, 70: 108-127.
- Saeed, M., 1986. The estimation of evapotranspiration by some equations under hot and arid conditions. *Trans. ASAE*, 29 (2) : 434–438.
- Sakuratani, A., 1981. A heat balance method for measuring sap flow in the stem of an intact plant. *Agricultural Meteorology*, 37: 9-17.
- Schmugge, T. J., and Kustas, W. P., 1999. Radiometry at infrared wavelengths for agricultural applications. *Agronomie*, 19:83-96.
- Simonneux, V., Duchemin, B., Helson, D., Er-Raki, S., Oliosio, A., Chehbouni, G. 2006a. Using high resolution image time series for crop classification and evapotranspiration estimate over an irrigated area in south Morocco. *International Journal of Remote Sensing*. accepted.
- Simonneaux, V., Helson, D., Metral, J., Kharrou, H., Cherkaoui, M., Duchemin, B. and Chehbouni, G. 2006b. Samir, a tool for irrigation monitoring using remote sensing for land cover mapping and evapotranspiration estimation. The 2nd International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing: RAQRS'II, 25-29 September 2006, Valencia, Spain.
- Sinclair, T.R., and Seligman, N.G., 1996, Crop modeling: from infancy to maturity, *Agronomy Journal*, 88: 698-704.

- Spitters, C.J.T., Van Keulen, H., and Van Kraalingen, D.W.G., 1989, a simple and universal crop growth simulator: SUCROS87, Simulation and systems management in crop protection, Pudoc Wageningen, 1989: 147-181.
- Srinivasan, R., Arnold, J., Rosenthal, W., Muttiah, R.S., 1996. Hydrologic Modeling of Texas Gulf Basin using GIS. In: Goodchild, et al. (Eds.), GIS and Environmental Modeling Progress and Research Issues. Donald F. Hemenway Jr., Fort Collins, pp. 213–219.
- Stefano, C.D., Ferro, V., 1997. Estimation of evapotranspiration by Hargreaves formula and remotely sensed data in semi-arid Mediterranean areas. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 68: 189–199.
- Stewart, J.B., Watts, C.J., Rodriguez, J.C., De Bruin, H.A.R., van den Berg, A.R., Garatuza-Payan, J., 1999. Use of satellite data to estimate radiation and evaporation for Northwest Mexico. *Agricultural Water Management*, 38 : 181–193.
- Taconet O., 1986: Analyse de la thermographie infrarouge satellitaire pour la modélisation de l'évaporation sur une région agricole. Thèse d'état, PARIS-SUD.
- Testi, L., Villalobos, F.J., Orgaz, F., 2004. Evapotranspiration of a young irrigated olive orchard in southern Spain. *Agric. For. Meteorol* 121: 1-18.
- Thuinissen, H.A.M., et G.J.A. Nieuwenhuis, 1990. A simplified method to estimate regional 24-h evapotranspiration from thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment*, 31: 211-225.
- Tucker, J.C., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sens. Environ.*, 8 : 127-150.
- Turc, L., 1961. Estimation of irrigation water requirement, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. *Ann. Agron.*, 12: 13-49.
- Villalobos, F.J., Orgaz, F., Testi, L., Fereres, E., 2000. Measurements and modeling of evapotranspiration of olive (*Olea europaea* L.) orchards. *Eur. J. Agron.* 13:155-163.
- Walid, L.D, Skirdej, A., Elattir, H. 2003. Transfert de technologie en agriculture. Bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA.
- Wanjura, D. F., Kelly, C. A., Wendt, C. W., and Hatfield, J. L., 1984. Canopy temperature and water stress of cotton crops with complete and partial ground cover. *Irrigation Science*, 5: 37-46.

- Wanjura, D. F., and Mahan, J. R., 1994. Thermal environment of cotton irrigated using canopy temperature. *Irrigation Science*, 14: 199-205.
- Williams, D.G. W. Cable, K. Hultine, J.C.B. Hoedjes, E.A. Yopez, V. Simonneaux, S. Er-Raki, G. Boulet, H.A.R. de Bruin, A. Chehbouni, O.K. Hartogensis, and F. Timouk., 2004. Evapotranspiration components determined by stable isotope, sap flow and eddy covariance techniques. *Agric. For. Meteorol.* 125: 241-258.
- Williams, L.E., Ayars, J.E. 2005. Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy. *Agric. For. Meteorol.* 132: 201-211.
- Wright, J.L. 1982. New evapotranspiration crop coefficient. *J. Irrig. Drain. Div. ASCE* 108: 57-74.

**ANNEXE A : METHODES UTILISEES POUR  
L'ESTIMATION DE  
L'EVAPOTRANSPIRATION DE REFERENCE:  
ET<sub>0</sub>**

Un grand nombre de méthodes empiriques ou semi-empiriques ont été développées pour estimer l'évapotranspiration de référence à partir de différentes variables climatiques. Ces formules empiriques peuvent être classées en trois groupes : les méthodes de température, les méthodes de radiation et les méthodes combinées.

### **A.1. Les méthodes de radiation :**

#### **❖ La méthode de Priestley Taylor (1972)**

Quand la surface évaporative est bien approvisionnée en eau, Priestley-Taylor a montré que l'évapotranspiration dépend essentiellement du rayonnement solaire et par conséquent le terme aérodynamique est négligeable devant le terme énergétique. Dans ce cas l'évapotranspiration de référence est donnée par :

$$ET_0 = \frac{1.26.\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma} \quad \text{Equation A. 1}$$

Avec :

$R_n$  : est le rayonnement net à la surface de la culture

$G$  : est le flux conductif

$\Delta$  : est la pente de la courbe de la pression de vapeur saturante à la température de l'air.

$\gamma$  : est la constante psychrométrique

#### **❖ La méthode de Turc (1961)**

La formule de Turc est une relation qui peut être appliquée dans les régions tempérées pour estimer l'évapotranspiration de référence. Elle s'écrit dans son expression mensuelle ou décadaire :

$$ET_0 = 0,4.(R_G + 50).\frac{T}{T + 50} \quad \text{Pas de temps mensuel} \quad \text{Equation A. 2}$$

$$ET_0 = 0,13.(R_G + 50).\frac{T}{T + 15} \quad \text{Pas du temps décadaire} \quad \text{Equation A. 3}$$

Avec :

$T$  : est la température moyenne de la période considérée  $T$  en °C.

$R_G$  : est le rayonnement global mensuel ou décadaire en cal/cm<sup>2</sup>/jour.

#### **❖ La méthode de Makkink (1950)**

Makkink a donné l'évapotranspiration de référence sous la forme suivante :

$$ET_0 = Cm. \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_G \quad \text{Equation A. 4}$$

Avec :

$R_G$  : est la radiation à courte longueur d'onde et Cm est un facteur dépend de la région.

## A.2. Les méthodes de température :

### ❖ La méthode de Blaney-Criddle (1951)

C'est une méthode basée sur une formule climatique recommandée lorsque toutes les données relatives au bilan énergétique ne sont pas disponibles. L'évapotranspiration de référence en (mm/jour) est donnée par :

$$ET_0 = a + b.p(0.46.T + 8) \quad \text{Equation A. 5}$$

Avec :

T : est la température moyenne journalière (°C),

P : est le pourcentage d'heures de lumière du jour,

a : est une fonction de l'insolation et de l'humidité de l'air donnée par :

$$a = 0.043.Rh_{\min} - \frac{n}{N} - 1.41$$

b est une fonction des conditions climatiques :

$$b = b\left(\frac{n}{N}, Rh_{\min}, u_2\right)$$

Avec :

$n/N$  : est le rapport entre la durée réelle d'insolation journalière (n) et la durée maximale d'insolation (N),

$Rh_{\min}$  : est l'humidité relative minimale pendant le jour (%),

$u_2$  : est la vitesse moyenne du vent, mesurée à 2 m de hauteur pendant le jour (m/s).

### ❖ La méthode de Hargreaves and Samani (1985)

C'est une formule empirique nécessite uniquement la température dans le calcul de l'  $ET_0$

:

$$ET_0 = a (T + 17.8)(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} R_a \quad \text{Equation A. 6}$$

Avec :

$R_a$  : est le rayonnement extraterrestre

$T_{\max}$  : est la température journalière maximale (°C)

$T_{\min}$  : est la température journalière minimale (°C)

$a$  : est un paramètre empirique.

### A.3. Les méthodes combinées à base physique :

Parmi les formules théoriques proposées pour le calcul de l'évapotranspiration de référence, on trouve celle proposée par Penman (1948) pour le calcul de l'évaporation d'une surface d'eau. Cette méthode a une signification physique bien définie puisqu'elle résulte de la combinaison du bilan d'énergie avec le transfert aérodynamique. Elle a été développée par la suite par plusieurs chercheurs et a été étendue aux surfaces végétatives en introduisant des résistances aérodynamiques et de surface (Penman, 1963; Monteith, 1965). L'équation combinée de Penman-Monteith est donnée par :

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\rho_a c_p}{r_a}(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \quad \text{Equation A. 7}$$

Avec :

$\lambda$  : Chaleur latente de vaporisation,

$\lambda ET$  : flux de chaleur latente,

$R_n$  : rayonnement net à la surface de la culture,

$G$  : flux conductif,

$e_s - e_a$  : déficit de pression de vapeur d'air,

$\rho_a$  : densité moyenne de l'air,

$c_p$  : capacité calorifique de l'air,

$\Delta$  : pente de la courbe de la pression de vapeur saturante à la température de l'air,

$\gamma$  : constante psychrométrique,

$r_s$  : résistance de surface,

$r_a$  : résistance aérodynamique.

L'équation de Penman-Monteith a été formulée de façon à inclure tous les paramètres qui gouvernent l'échange d'énergie d'une végétation étendue et uniforme. La plupart de ces

paramètres sont mesurés ou peuvent être rapidement calculés à partir de données météorologiques. Cette équation peut être utilisée pour un calcul direct de l'évapotranspiration une fois que les résistances aérodynamiques et de surface sont spécifiées.

Dans un souci de normalisation, la FAO à travers son groupe d'experts, opérant dans différents contextes climatiques, a adapté la formule de Penman-Monteith (A.7) aux conditions d'un couvert de gazon<sup>9</sup> et propose la formule dérivée comme la nouvelle définition de l'évapotranspiration de référence (Allen et al. 1998) :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{Equation A. 8}$$

Avec :

$ET_0$  : Évapotranspiration de référence [mm/jour],

$T$  : Température moyenne journalière à la hauteur 2m [°C],

$u_2$  : Vitesse du vent à 2m de hauteur [m/s],

$e_s$  : Pression de vapeur saturante de l'air [kPa],

$e_a$  : Pression de vapeur réelle [kPa],

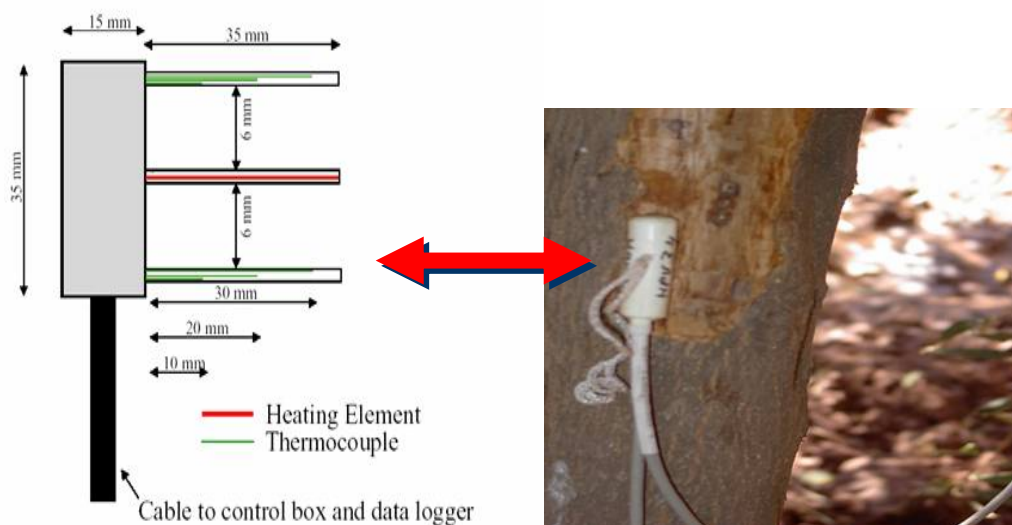
Les équations qui permettent de calculer les paramètres figurant dans l'équation (A.8) sont citées dans le document FAO-56 (Allen et al., 1998).

---

<sup>9</sup> Une végétation hypothétique ayant une hauteur de 0.12m et une résistance de surface égale à 70s/m et un albédo égal à 0.23

**ANNEXE B : DESCRIPTION DE LA  
METHODE DE MESURE DE FLUX DE LA  
SEVE: HRM (HEAT RATIO METHOD)**

La méthode HRM est une modification de la méthode Heat Pulse velocity (HPV) (Marshall 1958; Edwards et al., 1996). L'avantage de HRM par rapport à HPV méthode est qu'elle permet de mesurer les faibles flux de la sève (Burgess et al., 2001; Fernández et al., 2001). Le principe de cette méthode est d'insérer une sonde composée de 3 aiguilles : une au milieu contient un chauffeur, une en bas et une en haut du chauffeur contient des thermocouple (figure. B.1). Cette méthode permet de mesurer le flux de la sève dans trois profondeurs du tronc : 30, 20 et 10 mm.



**Figure B. 1. Schéma de la sonde de mesure du flux de sève par la méthode Heat Ratio Method (HRM).**

L'impulsion de la chaleur est produite par le chauffeur. La vitesse  $V_h$  correspondante au flux de la chaleur est donnée par l'équation suivante (Burgess et al., 1998) :

$$V_h = \frac{k}{x} \ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right) \quad \text{Equation B. 1}$$

Où :

$x$  : la distance entre le chauffeur et le thermocouple (6 mm).

$v_1$  et  $v_2$  sont les accroissements des températures de deux thermocouples (supérieure et inférieure).

$k$  : est la diffusivité thermique du bois humide donnée par :  $k = \frac{k_{gw}}{\rho c} 10000$  avec  $k_{gw}$  est la conductivité thermique ( en  $J m^{-1} s^{-1} ^\circ C^{-1}$ ),  $\rho$  est la densité ( $kg m^{-3}$ ) et  $c$  est la chaleur spécifique ( $J kg^{-1} ^\circ C^{-1}$ ) de la surface conductive du sève (sapwood area).  $k_{gw}$  est calculé par :

$$k_{gw} = k_w m_c \frac{\rho_b}{\rho_w} + k_{dw} (1 - m_c \frac{\rho_b}{\rho_w}) \quad \text{Equation B. 2}$$

Avec:

$k_w$  et  $k_{dw}$  sont les conductivités thermiques de l'eau ( $6.025 \times 10^{-1} \text{ J m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) et le bois sec respectivement,  $m_c$  est la fraction mouillée du bois ( $\text{kg kg}^{-1}$ ),  $\rho_b$  est la densité du sapwood (masse sèche/volume), et  $\rho_w$  est la densité de l'eau. Le protocole adopté pour déterminer ces paramètres est de couper des échantillons de quelques branches, puis les mettre à l'étuve sous une température de  $70^\circ\text{C}$ .

Des erreurs correspondantes aux positions des sondes auront lieu, ces erreurs sont corrigées par un flux nul de la sève, et déterminées d'après Burgess et al., (2001b) par :

$$4kt \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = (x_1^2) - (x_2^2) + 2V_h t(x_1 - x_2) \quad \text{Equation B. 3}$$

Où  $x_1$  et  $x_2$  sont les distances entre les thermocouples supérieure et inférieure et le chauffeur,  $t$  est le temps moyen de mesure (dans notre cas 60s) correspondant au flux de chaleur

$$\text{A } V_h = 0, \text{ l'équation donne : } x_2 = \sqrt{4kt \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) + x_1^2} \quad \text{Equation B. 4}$$

Où  $x_2$  désigne la distance incorrecte et  $x_1$  désigne la distance correcte (6 mm)

Vu que les deux sondes sont incorrectement espacées, l'équation (B.4) est résolue pour  $x_1$  et  $x_2$  et les deux solutions sont moyennées pour générer une solution intermédiaire pour les deux thermocouples (Burgess et al., 1998).

L'insertion des sondes et la percée des trous causent des blessures mécaniques dans les tissus du xylème. Pour corriger ces blessures, on a utilisé un modèle numérique basé sur les éléments finis, ce modèle est généré par Burgess et al., (2001b) et permet de corriger la vitesse de flux de la chaleur par l'équation suivante :

$$V_c = aV_h + bV_h^2 + cV_h^3 \quad \text{Equation B. 5}$$

Avec  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont des coefficients dérivés à partir de l'analyse numérique de l'effet des blessures sur la vitesse du flux de la chaleur  $V_h$  en variant la largeur des blessures. Noter que pour des valeurs négatives de  $V_h$  on utilise  $V_c = aV_h - bV_h^2 - cV_h^3$ . Dans notre cas,  $b$  et  $c$  sont nuls et  $a$  est égal à 1.9864.

La vitesse corrigée  $V_c$  est convertie en vitesse de la sève par l'équation suivant (Barrett et al., 1995):

$$V_s = \frac{V_c \rho_b (c_w + m_e c_s)}{\rho_s c_s}$$

**Equation B. 6**

Où:

$c_w$  et  $c_s$  sont les chaleurs spécifiques du bois sec ( $1200 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  at  $20^\circ\text{C}$ , Becker and Edwards 1999), et de la sève (supposé égale à celle de l'eau,  $4182 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  at  $20^\circ\text{C}$ ), et  $\rho_s$  est la densité de la sève (supposée égale à celle de l'eau,  $1.0 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ ). Le flux de la sève ( $\text{kg jour}^{-1}$ ) est calculé en multipliant la vitesse de la sève  $V_s$  par la surface conductive de la sève (sapwood area) en bas de l'écorce ( $\pi r^2$ ).