



HAL
open science

Observation spatiale de l'irrigation d'agrosystèmes semi-arides et Gestion durable de la ressource en eau en plaine de Marrakech.

Iskander Benhadj

► **To cite this version:**

Iskander Benhadj. Observation spatiale de l'irrigation d'agrosystèmes semi-arides et Gestion durable de la ressource en eau en plaine de Marrakech.. Océan, Atmosphère. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2008. Français. NNT: . tel-00431127

HAL Id: tel-00431127

<https://theses.hal.science/tel-00431127>

Submitted on 10 Nov 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *l'Université Toulouse III - Paul Sabatier*
Discipline ou spécialité : *Océan et atmosphère des surfaces continentales*

Présentée et soutenue par *Iskander Benhadj*
Le *20/10/2008*

Titre : *Observation spatiale de l'irrigation d'agrosystèmes semi-arides et Gestion durable de la ressource en eau en plaine de Marrakech.*

JURY

Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry, Professeur à l'Université Paul Sabatier, Toulouse, Président
Catherine Mering, Professeur à l'Université Paris-Diderot Paris 7, Rapportrice
Dominique Courault, Chargé de Recherche INRA, Avignon, Rapportrice
Said Khabba, Professeur à l'Université Cadi Ayyad, Marrakech, Examineur
Alain Vidal, Ingénieur en Chef CEMAGREF, Examineur
Benoit Duchemin, Chargé de Recherche IRD, Toulouse, Directeur de Thèse

Ecole doctorale : *Sciences de l'Univers de l'Environnement et de l'Espace*

Unité de recherche : *Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère*

Directeur(s) de Thèse : *Benoît Duchemin*

Rapporteurs : *Dominique Courault*
Catherine Mering

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Jean-Claude Menaut et Yann Kerr, Directeur du CESBIO, qui m'ont accueilli dans leur laboratoire et ont permis à cette thèse de se dérouler dans les meilleures conditions.

Bien entendu, mes plus vifs remerciements s'adressent à mon directeur de thèse, Benoit Duchemin, qui a su me lancer dans un domaine passionnant. Il n'a jamais ménagé son temps ni ses efforts pour m'accompagner tout au long de ce travail. Ses enseignements et sa confiance m'ont permis de m'épanouir scientifiquement pendant ces années.

J'exprime naturellement ma gratitude à toutes les personnes qui ont suivi et considéré ces travaux de recherches. Je voudrais en premier lieu remercier Said Khabba, qui m'a accompagné et conseillé durant ces 3 années de thèse, à Marrakech comme à Toulouse. Je suis particulièrement redevable à Philippe Maisongrande et Vincent Simmonneaux de leur expérience en télédétection, qui m'a été communiquée dans la bonne humeur tout au long de ce travail. J'ai eu beaucoup de plaisir à discuter avec eux de sciences et de tout autre sujet. Je voudrais également témoigner ma reconnaissance à Dominique Courault et Catherine Mering, mes « rapportrices » de thèse, Alain Vidal et Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry, qui ont participé au jury de soutenance, ainsi qu'Albert Oliosio, Abdelghani Chehbouni et Hervé Cardot, qui m'ont prodigué recommandations et critiques de « pilotage ».

Cette thèse a été organisée dans le cadre du programme franco-marocain SUDMED avec un soutien spécifique de l'IRD (Financement du Département « Soutien et Formation »). Je tiens donc à exprimer ma reconnaissance aux « IRDiens » du laboratoire (Gilles Boulet, Richard Escadafal, Michel Lepage, Bernard Mougenot et Lionel Jarlan) pour leur aide et surtout leur sympathie au quotidien. Plus généralement, un grand merci à tous mes collègues du CESBIO, avec une mention spéciale au personnel administratif et informatique qui ont toujours répondu à mes (nombreuses !) sollicitations, à Olivier Hagolle pour son implication dans l'expérience Formosat-2/Tensift, ainsi qu'à Laurent Kergoat et Philippe Richaume pour leurs conseils.

J'adresse également mes plus vifs remerciements à nos collègues marocains, de l'Université Cadi Ayyad de Marrakech (UCAM), de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Haouz (ORMVAH) et de l'Agence Hydraulique du Bassin du Tensift (ABHT), qui m'ont invité à plusieurs reprises au cours de ces trois années de recherche. Ce travail n'aurait pu être réalisé sans leur appui scientifique et logistique. Que Said Khabba et Lahoucine Hanich soient chaudement remerciés pour leur accueil à l'UCAM au sein de la « jeune

équipe » CREMAS, ainsi que le personnel des centres ORMVAH de Marrakech et de Ras El Ain (Mrs Ouzzine, Kharrou et Cherkaoui, Mrs Ramadi, Kabbaj et Mbarki). Mes pensées vont aussi à mes camarades marocains étudiants et techniciens avec qui j'ai passé de bons moments sur le terrain en plaine du Haouz et au laboratoire SudMed de la Faculté des Sciences Semlalia. Merci donc à Salah, Jamal, Kamil, Mohamed, Awatif, Aahd, Sanae et Fatima,

Un grand merci à mes compagnons de route durant ces trois années: Sylvia, Claire, Maria-Carmen, Nico, Arnaud, Olivier, Vincent, Ahmad, Frédéric, Alexandre, Stephane, Elsa et Beatrice. Merci pour l'ambiance et les bonnes soirées.

Je remercie tous mes amis « toulousains » qui m'ont permis de tenir le coup dans les moments difficiles et plus particulièrement à Manu, Olivier, Laurent, Jérôme, Sophie, Marina, Dorian, Jérôme et Tristan.

Enfin, un grand merci à tous les membres de ma famille qui m'ont guidé et soutenu moralement tout au long de ma thèse, et tout particulièrement à mon amour Laurianne pour les grandes choses qu'elle m'apporte au quotidien.

Table des matières

ACRONYMES.....	9
INTRODUCTION GENERALE.....	11
CHAPITRE I. TELEDETECTION DANS LE DOMAINE SOLAIRE : NOTIONS ELEMENTAIRES, CAPTEURS ET IMAGES, APPLICATIONS EN OCCUPATION DU SOL ET MODELISATION AGROMETEOROLOGIQUE	19
I-1 Principe de la teledetection et notion de réflectance.....	23
I-2 L'observation spatiale	27
I-3 Les principales missions d'observation de la terre.....	38
I-4 Applications de la télédétection pour l'étude des surfaces continentales.....	46
I-5 Objectifs de la thèse et démarche méthodologique	68
CHAPITRE II. REGION D'ETUDE, DONNEES EXPERIMENTALES ET SATELLITAIRES.....	79
II-1 Caractéristiques hydro-climatiques du bassin du Tensift.....	84
II-2 La plaine du Tensift	88
II-3 Données expérimentales	99
II-4 Données satellites.....	131
CHAPITRE III. METHODES DE DESAGREGATION ET OCCUPATION DU SOL EN PLAINE DU TENSIFT	145
III-1 Occupation du sol à haute resolution spatiale.....	149
III-2 Occupation du sol à basse resolution spatiale : Evaluation des méthodes de désagregation (saison agricole 2002-2003).....	163
III-3 Occupation du sol a basse resolution spatiale: application de la méthode non supervisée (periode 2000-2006).....	188
III-4 Conclusion.....	199
CHAPITRE IV. SPATIALISATION DU BILAN HYDRIQUE ET DE L'IRRIGATION EN PLAINE DU TENSIFT	203
IV-1 Principes de modélisation et evaluation a l'échelle de la parcelle.....	207
IV-2 Spatialisation à partir de données à haute résolution spatiale (formosat-2 saison agricole 2005-2006)	231
IV-3 Spatialisation à partir de données à basse résolution spatiale (MODIS, période 2000-2006)	254
IV-4 Conclusion.....	270

CONCLUSION GENERALE	277
ANNEXE 1: RESEAU DE STATIONS PLUVIOMETRIQUES EN PLAINE DU HAOUZ.....	286
ANNEXE 2: UNITES PEDOLOGIQUES	287
ANNEXE 3: VARIABLES STATISTIQUES UTILISEES	288
ANNEXE 4: CALCUL DU TAUX DE COUVERTURE VEGETALE ET DES COEFFICIENTS CULTURAUX	289
ANNEXE 5: IRRIGATION (ESTIMEE ET OBSERVEE) ET OCCUPATION DU SOL PAR SOUS SECTEURS (NFIS, HAOUZ CENTRAL ET TESSAOUT AMONT)	291

Acronymes

ABHT	Agence du B assin H ydraulique du T ensift
ASAR	A dvanced S ynthetic A perture R adar
ASTER	A dvanced S paceborne T hermal E mission and R eflection R adiometer
AVHRR	A dvanced V ery H igh R esolution R adiometer
BR	B asse R ésolution
CESBIO	C entre d'Etudes Spatiales de la B IOsphère
CNES	C entre N ational d'Etudes Spatiales
CTIV	C entre de T raitement des I mages V EGETATION
DMN	D irection de la M étéorologie N ationale
DREF	D irection R égionale des E aux et F orêts
ELUE	E ffective L ight- U se E fficiency
ESA	E uropean S pace A gency
FAO	F ood and A griculture O rganization
GFOV	G round F ield O f V iew
GLCF	G lobal L and C over F acility
GLC2000	G lobal L and C over 2000
GLAI	G reen L eaf A rea I ndex
HR	H aute R ésolution
HRV	H aute R ésolution dans le V isible
HRVIR	H aute R ésolution dans le V isible et le proche infra R ouge
IDW	I nverse D istance W eighted
IFOV	I ntantaneneous F ield O f V iew
JRC	J oint R esearch C enter
MODIS	M ODerate resolution I maging S pectroradiometer
MVC	M aximum V alue C omposite
NASA	N ational A eronautics and S pace A dmistration
NDVI	N ormalized D ifference V egetation I ndex
NSPO	N ational S pace O rganization of T aiwan
ORMVAH	O ffice R égional de M ise en V aleur A gricole du H aouz
PCS	P oints de C ontrôle au S ol
PERSIANN	P recipitation E stimation from R emotely S ensed I nformation using A rtificial N eural N etworks
RMSE	R oot M ean S quare E rror
SCEM	S chuffled C omplex E volution M etropolis
SMAC	S implified M ethod for A tmospheric C orrection
SPOT	S ystème P our l' O bservation de la T erre
SLA	S pecific L eaf A rea
STICS	S imulateur mul T idisciplinaire pour les C ultures S tandard
TDR	T ime- D omain- R eflectancy
TOA	T op O f A tmospher
TOC	T op O f C anopy
TLAI	T otal L eaf A rea I ndex
TRMM	T ropical R ainfall M easuring M ission
UCAM	U niversité C adi A yyad de M arrakech

Introduction générale

Les régions semi-arides comme l'Afrique du nord présentent un déficit hydrique croissant sous l'effet conjugué de la croissance des besoins (démographie galopante et extension des zones irriguées), et de la réduction des ressources (sécheresse passagère et/ou liée aux changements climatiques). Le Maroc est un des pays qui est désormais confronté au problème de pénurie d'eau. En particulier, sa partie centrale, au climat semi-aride (forte demande évaporative de l'ordre de 1500 mm/an, pluviométrie faible et irrégulière de 200 à 400 mm/an), est confrontée à des sécheresses répétées. Pour la dernière décennie, leur fréquence est d'une année sur deux alors qu'elle n'était que d'une année sur cinq pour les décennies précédentes (MADRPM 1999). La politique adoptée tend à aggraver la situation en valorisant l'agriculture d'exportation et le tourisme, deux secteurs à forte consommation d'eau. Ce constat, critique dès à présent pour le Maroc, est cependant à relativiser. En effet, plus de 85 % des eaux mobilisées aujourd'hui vont vers l'agriculture, et 65 % des eaux « agricoles » sont gaspillées par des méthodes d'irrigation peu efficaces et des réseaux de distribution déficients (Lahlou 2004).

Si l'agriculture de ces régions, et en particulier la production de céréales, a l'ambition d'être maintenue ou améliorée, il est nécessaire de procéder à une gestion méticuleuse des ressources en eau. Pour faire face au déficit hydrique croissant, le secteur agricole est appelé à améliorer la productivité de l'eau en irrigation (produire davantage avec moins d'eau). Le Maroc est ainsi confronté à un double défi : étendre les superficies irriguées et, en même temps, améliorer les performances des systèmes d'irrigation. Des progrès significatifs doivent être enregistrés pour économiser l'eau en s'attaquant à trois principaux leviers: 1) lutter contre le gaspillage ; 2) réorienter les secteurs de production vers des cultures plus économes en eau ; 3) mettre en œuvre des techniques qui permettent de contrôler l'usage et de suivre l'évolution des ressources en eau. Il apparaît ainsi essentiel d'appréhender le rôle de l'homme et du climat sur l'évolution de cette ressource. Ceci demande une compréhension de l'ensemble des composantes du cycle

de l'eau et nécessite, en particulier, le développement d'outils qui apportent une vision synoptique des agro-écosystèmes (occupation du sol, besoin en eau et consommation réelle).

La gestion des ressources en eaux à l'échelle régionale nécessite la réalisation d'inventaires régionaux des surfaces des cultures irriguées, le recensement des différentes ressources hydriques et enfin le suivi des pratiques agricoles par les gestionnaires. La réalisation de ces travaux sans faire appel aux technologies modernes de collecte et de gestion de l'information demanderait un effort humain considérable, un coût financier exorbitant et des délais prohibitifs. Il est donc primordial de disposer de systèmes d'information spatialisés pour appréhender le fonctionnement hydrique et végétal aux échelles permettant la prise de décision par les gestionnaires (exploitations, secteurs irrigués, sous-bassins versants).

Dans ce contexte de gestion régionale, la télédétection est un outil privilégié. Elle permet l'acquisition de données régulièrement distribuées dans l'espace et le temps pour caractériser les surfaces continentales en termes d'occupation du sol, de fonctionnement des plantes et de transferts d'énergie et de masse dans continuum sol-plante-atmosphère (Bastiaanssen et al. 2000; Bastiaanssen and Perry 2000; Bastiaanssen and Makin 2003; Courault et al. 2003; Scotford and Miller 2005). Ces caractéristiques peuvent être utilisées dans un schéma de modélisation spatialisée pour appréhender le fonctionnement et la dynamique des agro-écosystèmes. D'un point de vue économique, l'utilisation de la télédétection offre la possibilité de réduire les coûts d'obtention de l'information à l'échelle d'une région ou d'un pays.

L'imagerie satellitale apporte une vision régionale exhaustive et objective, qui doit contribuer à renforcer les outils d'aide à la décision conçus à destination des gestionnaires de la ressource. Cependant, les variables ou paramètres estimés par télédétection ne sont en général qu'une composante de ces outils, qui doivent intégrer d'autres sources d'informations ainsi que des modèles explicatifs et/ou prédictifs. Pour la gestion de la ressource hydro-agricole en plaine, on utilisera la télédétection en complément de modèles que nous qualifierons de modèles « agrométéorologiques ».

Ces modèles reproduisent les différents processus élémentaires qui permettent de simuler la dynamique des couverts végétaux (photosynthèse, production de biomasse, répartition des assimilats, phénologie...) et d'établir le bilan hydrique dans le sol et à l'interface sol-plante-atmosphère (évapotranspiration, infiltration, ruissellement...). L'utilisation conjointe de modèles agrométéorologiques et de données de télédétection, régulièrement distribuées dans l'espace et le temps, est une voie de recherche particulièrement dynamique pour la mise en place d'observatoires de la ressource en eau et des systèmes de production agricole à l'échelle régionale (Jackson et al. 1977, Boote et al. 1996; Moulin et al. 1998; Oliso et al. 1999; Guérif et al. 2001; Faivre et al. 2004; Duchemin et al. 2006; Duchemin et al. 2008).

Dans le domaine solaire, on disposait, jusqu'à une période récente, de deux moyens d'observation différents. Les capteurs à large champ (e.g. TERRA-MODIS ou SPOT-VEGETATION) permettent l'observation quotidienne de l'ensemble du globe, mais à une résolution (~1 km) généralement bien supérieure à la taille d'une parcelle agricole. Les capteurs à résolution spatiale décamétrique n'autorisent qu'une à deux observations par mois en mode nominal (cycle orbital) sur des scènes de taille relativement réduite (60 km pour SPOT et 180 km pour Landsat). Depuis 2004, le satellite taïwanais baptisé FORMOSAT-2 permet d'observer tous les jours de petites régions (500 km² environ) à une résolution spatiale de l'ordre de 8 mètres, sans autoriser toutefois une couverture exhaustive des continents.

Pour étudier des bassins versants de taille moyenne comme celui du Tensift au centre du Maroc (~20000 km²), il est difficile d'obtenir des séries d'images à haute résolution spatiale. De plus, le coût de ces données peut devenir prohibitif si l'on procède à la programmation systématique d'images rapprochées sur de longues périodes. Dans un contexte de gestion opérationnelle, l'utilisation des données issues des capteurs à basse résolution spatiale, gratuitement accessibles sur internet, apparaît ainsi plus adaptée. Cependant, la résolution spatiale des capteurs à large champ pose problème, car un pixel peut contenir plusieurs types de surfaces ayant des comportements spectraux différents (pixel mixte). Pour exploiter ces données, le recours à des méthodes de désagrégation est généralement nécessaire. Ces méthodes ont pour but de décomposer le signal issu

d'un pixel mixte en composantes spectrales spécifiques aux types de surfaces contenues dans le pixel (Adams et al. 1986; Smith et al. 1990; Roberts et al. 1998; Elmore et al. 2000; Lobell and Asner 2004; Song 2005). Ce processus permet d'estimer la contribution de chacune des surfaces au signal « mixte » et/ou la surface qu'elles occupent au sein du pixel « mixte ».

Ce travail de thèse s'inscrit dans un contexte général d'une modélisation des flux d'eau à l'échelle régionale menée dans le cadre du projet de recherche franco-marocain SudMed (Chehbouni et al. 2008). Ce projet a été lancé en 2002 en collaboration avec le CESBIO¹ et l'UCAM² avec l'appui des organismes régionaux chargés de la gestion des ressources hydro-agricoles (ORMVAH³ et ABHT⁴). Le projet SudMed a pour vocation de développer les méthodologies permettant d'intégrer les informations de terrain, les modèles de processus et les mesures satellitaires pour documenter, comprendre et prévoir l'évolution d'une région semi-aride hétérogène en vue d'une gestion durable. La région d'étude principale du projet est le bassin versant du Tensift caractérisé par un climat semi-aride et une forte pression sur les ressources en eau.

La problématique de cette thèse est le contrôle de modèles agrométéorologiques par des données satellites issues de capteurs optiques à large champ. Il s'agit de décrire, dans l'espace (à la résolution « kilométrique ») et sur de longues périodes temporelles (une « décennie »), le fonctionnement hydrique des éco-agrosystèmes de la plaine semi-aride de Tensift/Al Haouz, qui couvre environ 3000 km² autour de la ville de Marrakech. Dans cet objectif, deux grands axes de recherche ont été explorés:

1) Développer **des méthodes de désagrégation** qui utilisent de manière opérationnelle les données à basse résolution spatiale pour déterminer l'occupation du sol et étudier la dynamique saisonnière des cultures dominantes en plaine du Tensift/Al Haouz.

¹ Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère, France

² Université Cadi Ayyad de Marrakech, Maroc

³ Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Haouz, Maroc

⁴ Agence du Bassin Hydraulique du Tensift, Maroc

2) Déterminer dans quelle mesure cette information est utile pour spatialiser certaines variables clefs du **bilan hydrique en milieu semi-aride** : besoin en eau, évapotranspiration réelle (ET) et irrigation?

La démarche générale adoptée au cours de ce travail s'appuie sur l'utilisation conjointe de modèles agrométéorologiques et de données de télédétection à haute et basse résolution spatiale. Les séries d'images à basse résolution spatiale (MODIS et VEGETATION) sont utilisées pour étudier l'occupation du sol et la dynamique de la végétation en mettant en œuvre des méthodes de désagrégation. Cette information est ensuite intégrée dans des modèles agrométéorologiques pour dresser le bilan hydrique de la plaine durant six saisons agricoles successives (période 2000-2006). Les variables estimées (occupation du sol, évapotranspiration et irrigation) sont évaluées à partir de mesures de terrain, d'une base de données sur l'eau des barrages, et par confrontation à l'information de même nature (occupation du sol et bilan hydrique) dérivée des images à haute résolution spatiale. Les séries d'images à haute résolution spatiale (Landsat7, SPOT4/5 et FORMOSAT-2) sont disponibles pour deux saisons agricoles (2002-2003 et 2005-2006).

Le manuscrit comprend cinq chapitres distincts :

- Le **premier chapitre** introduit les concepts relatifs à la télédétection dans le domaine solaire, les principales missions d'observation de la terre, leurs applications dans notre contexte d'étude. A l'issue de cette introduction, le sujet de cette thèse et la démarche méthodologique sont approfondis.
- Le **deuxième chapitre** est consacré à la description de la région d'étude, du matériel expérimental et des jeux de données satellites utilisés.
- Le **troisième chapitre** présente les recherches effectuées pour la désagrégation des données à basse résolution spatiale, la cartographie de l'occupation du sol et le suivi de la dynamique des couverts végétaux.
- Le **quatrième chapitre** discute des possibilités d'utiliser cette information dans un schéma de modélisation agrométéorologique afin d'établir le bilan hydrique de la région à l'échelle d'un secteur irrigué test (saison 2005-2006) et de la plaine agricole dans son ensemble (période 2000-2006).

- Dans le **dernier chapitre**, nous présentons les conclusions de ce travail et dressons les perspectives de recherches.

Références

- ADAMS, J. B., SMITH, M. O. and JOHNSON, P. E., 1986, Spectral mixture modelling: A new analysis of rock and soil types at the Viking Lander Site. *Journal of Geophysical Research*, **91**, pp. 8098-8112.
- BASTIAANSEN, W. G. M. and MAKIN, I. W., 2003, Special issue: Remote sensing for agricultural water management - Introduction. *Agricultural Water Management*, **58**, pp. 87-88.
- BASTIAANSEN, W. G. M., MOLDEN, D. J. and MAKIN, I. W., 2000, Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management*, **46**, pp. 137-155.
- BASTIAANSEN, W. G. M. and PERRY, C. J., 2000, Earth observation demands for improved water resources management. *Observing Land from Space: Science, Customers and Technology*, **4**, pp. 105-117.
- BOOTE, K. J., JONES, J. W. and PICKERING, N. B., 1996, Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal*, **88**, pp. 704-716.
- CHEHBOUNI, A., ESCADAFAL, R., DUCHEMIN, B., BOULET, G., SIMONNEAUX, V., DEDIEU, G., MOUGENOT, B., KHABBA, S., KHARROU, H., MAISONGRANDE, P., MERLIN, O., CHAPONNIÈRE, A., EZZAHAR, J., ER-RAKI, S., HOEDJES, J., HADRIA, R., ABOURIDA, A., CHEGGOUR, A., RAIBI, F., BOUDHAR, A., BENHADJ, I., HANICH, L., BANKADDOUR, A., GUEMOURIA, N., CHEHBOUNI, A., OLIOSO, A., JACOB, F. and SOBRINO, J., 2008, An integrated modelling and remote sensing approach for hydrological study in arid and semi-arid regions: the SUDMED Program. *International Journal of Remote Sensing*. *Accepted*.
- COURAULT, D., LACARRERE, P., CLASTRE, P., LECHARPENTIER, P., JACOB, F., MARLOIE, O., PREVOT, L. and OLIOSO, A., 2003, Estimation of surface fluxes in a small agricultural area using the three-dimensional atmospheric model meso-NH and remote sensing data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, **29**, pp. 741-754.
- DUCHEMIN, B., HADRIA, R., ERRAKI, S., BOULET, G., MAISONGRANDE, P., CHEHBOUNI, A., ESCADAFAL, R., EZZAHAR, J., HOEDJES, J. C. B., KHARROU, M. H., KHABBA, S., MOUGENOT, B., OLIOSO, A., RODRIGUEZ, J. C. and SIMONNEAUX, V., 2006, Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management*, **79**, pp. 1-27.
- DUCHEMIN, B., HAGOLLE, O., MOUGENOT, B., SIMONNEAUX, V., BENHADJ, I., HADRIA, R., EZZAHAR, J., HOEDGES, J., KHABBA, S., KHARROU, M. H., BOULET, G., DEDIEU, G., ER-RAKI, S., ESCADAFAL, R., OLIOSO, A. and CHEHBOUNI, A. G., 2008, Agrometeorological study of semi-arid areas: an experiment for analysing the potential of FORMOSAT-2 time series of images in the Marrakech plain. *International Journal of Remote Sensing*. *Accepted*.
- ELMORE, A. J., MUSTRARD, J. F., MANNING, S. and LOBELL, D. B., 2000, Quantifying vegetation change in semiarid environments: Precision and accuracy of spectral mixture analysis and the Normalized Difference Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*, **73**, pp. 87-102.
- FAIVRE, R., LEENHARDT, D., VOLTZ, M., BENOIT, M., PAPY, F., DEDIEU, G. and WALLACH, D., 2004, Spatialising crop models. *Agronomie*, **24**, pp. 205-217.
- GUERIF, M. F., BARET, F., MOULIN, S. and BEGUE, A., 2001, Télédétection, hétérogénéité parcellaire et gestion spatialisée des interventions techniques. In : Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision. Collection Repères, édition CIRAD-INRA. pp. 303-326.
- LAHLOU, M., 2004, Les Enjeux stratégiques de l'eau, 2ème Forum Social Marocain, 2004.
- LOBELL, D. B. and ASNER, G. P., 2004, Cropland distributions from temporal unmixing of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, **93**, pp. 412-422.
- MADRPM, 1999, Programme de sécurisation de la production céréalière, 1999-2002 (Rapport). Ministère de l'agriculture, du développement rural et des pêches maritimes, Rabat, Maroc.
- MOULIN, S., BONDEAU, A. and DELECOLLE, R., 1998, Combining agricultural crop models and satellite observations: from field to regional scales. *International Journal of Remote Sensing*, **19**, pp. 1021-1036.
- 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**, pp. 341-356.

- ROBERTS, D. A., GARDNER, M., CHURCH, R., USTIN, S., SCHEER, G. and GREEN, R. O., 1998, Mapping chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models. *Remote Sensing of Environment*, **65**, pp. 267-279.
- SCOTFORD, I. M. and MILLER, P. C. H., 2005, Applications of spectral reflectance techniques in Northern European cereal production: A review. *Biosystems Engineering*, **90**, pp. 235-250.
- SMITH, M. O., USTIN, S. L., ADAMS, J. B. and GILLESPIE, A. R., 1990, Vegetation in Deserts .1. a Regional Measure of Abundance from Multispectral Images. *Remote Sensing of Environment*, **31**, pp. 1-26.
- SONG, C. H., 2005, Spectral mixture analysis for subpixel vegetation fractions in the urban environment: How to incorporate endmember variability? *Remote Sensing of Environment*, **95**, pp. 248-263.

**CHAPITRE I. Télédétection dans le
domaine solaire : notions élémentaires,
capteurs et images, applications en
occupation du sol et modélisation
agrométéorologique**

CHAPITRE I. TELEDETECTION DANS LE DOMAINE SOLAIRE : NOTIONS ELEMENTAIRES, CAPTEURS ET IMAGES, APPLICATIONS EN OCCUPATION DU SOL ET MODELISATION AGROMETEOROLOGIQUE 19

I-1	Principe de la teledetection et notion de réflectance.....	23
I-2	L'observation spatiale	27
I-2.1	<i>Fonctionnement d'un capteur.....</i>	27
I-2.2	<i>Caractéristiques spectrales.....</i>	29
I-2.3	<i>Caractéristiques spatiale et temporelle.....</i>	30
I-2.4	<i>Prétraitement des images satellites.....</i>	34
I-2.4.1	Correction géométrique	34
I-2.4.2	Corrections radiométriques	36
I-3	Les principales missions d'observation de la terre.....	38
I-3.1	<i>Principales caractéristiques des capteurs à basse résolution spatiale (VEGETATION et MODIS).....</i>	38
I-3.1.1	Les Produits VEGETATION	41
I-3.1.2	Les produits MODIS	42
I-3.2	<i>Les capteurs a haute résolution spatiale.....</i>	43
I-4	Applications de la télédétection pour l'étude des surfaces continentales.....	46
I-4.1	<i>Occupation du Sol</i>	47
I-4.1.1	Méthodes de classification	47
I-4.1.2	Classification des images à basse résolution spatiale.....	50
I-4.1.3	Approche linéaire de désagrégation.....	51
I-4.1.4	Evaluation des résultats d'une classification	54
I-4.2	<i>Variables biophysiques sol-plante.....</i>	55
I-4.3	<i>Utilisation conjointe de modèle de cultures et de données de télédétection pour l'évaluation du bilan hydrique.....</i>	57
I-4.3.1	Modélisation Agro-Météorologique.....	57
I-4.3.2	Equation du bilan hydrique	59
I-4.3.3	Calcul de l'évapotranspiration.....	61
I-4.3.4	Télédétection et modélisation.....	66
I-5	Objectifs de la thèse et démarche méthodologique	68

Dans ce chapitre, on présente les principaux aspects utiles à la compréhension du principe de télédétection, puis, on introduit la notion de réflectance et le principe de mesure. Dans un deuxième temps, on décrit les principaux satellites d'observation de la terre à basse et haute résolution spatiale. Dans un troisième temps, nous discutons des exemples d'application de la télédétection ayant pour objet la description des surfaces continentales en variables biophysiques, la caractérisation de l'occupation du sol et la spatialisation de modèle agro-météorologique. Cette présentation nous permet d'approfondir le sujet et la démarche de la thèse.

I-1 PRINCIPE DE LA TELEDETECTION ET NOTION DE REFLECTANCE

La télédétection est définie comme « l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci ». (Journal Officiel du 11 décembre 1980). Ces caractéristiques sont déterminées après mesure d'un signal électromagnétique émis ou réfléchi par l'objet et son environnement dans un certain domaine de fréquence/longueur d'onde, (Figure I.1). Les capteurs embarqués sur des missions d'observation de la terre ont pour rôle de mesurer le signal émis ou réfléchi par les surfaces terrestres et de le transmettre à des stations de contrôle au sol. En raison de contraintes technologiques ou physiques, et notamment des propriétés de transparence de l'atmosphère (Figure I.1), la télédétection spatiale n'utilise qu'une partie du spectre électromagnétique, on distingue les domaines solaire ($\lambda=0.38$ à $3 \mu\text{m}$), infrarouge thermique ($\lambda=3$ à $1000 \mu\text{m}$), et micro-onde ($\lambda = 10^{-3}$ m à 0.3 m). Le rayonnement est réfléchi par la surface dans le domaine solaire, émis dans l'infrarouge thermique; il peut être émis ou réfléchi dans le domaine des micro-ondes en fonction du caractère passif ou actif du système d'observation.

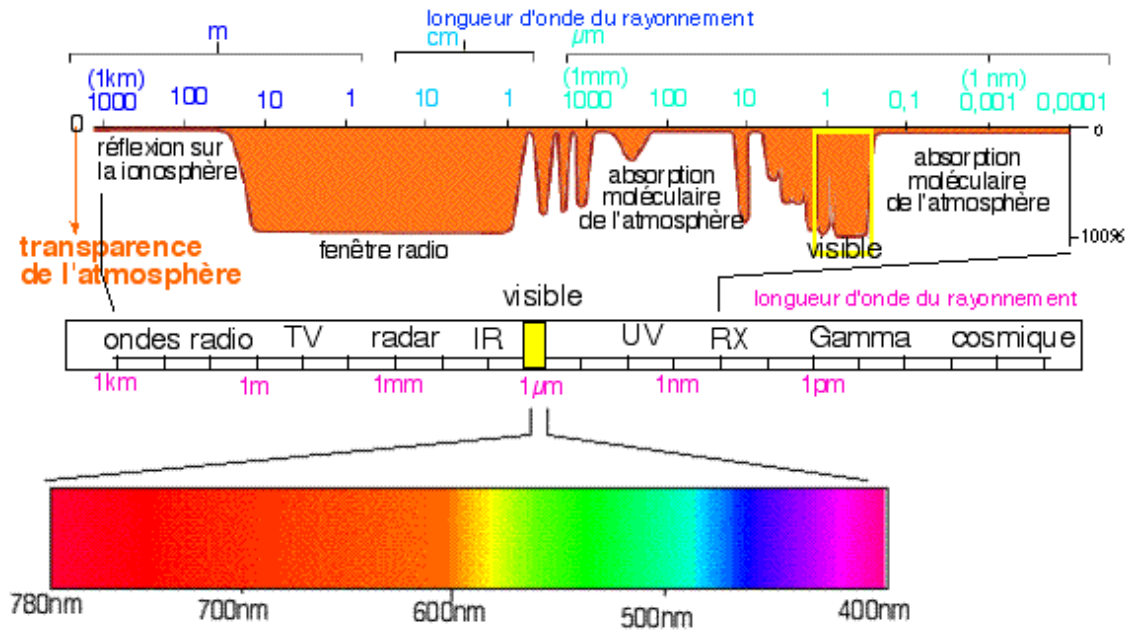


Figure I.1: Spectre du rayonnement et transparence de l'atmosphère.

La télédétection optique permet la mesure du rayonnement d'origine solaire réfléchi par les surfaces et par l'atmosphère (Figure I.2). Cette mesure est fonction des caractéristiques de la scène observée et des conditions d'observation. Les caractéristiques de la scène décrivent la nature, l'état, la structure géométrique et l'agencement des éléments qui la constituent. Ces caractéristiques vont conditionner les propriétés de réflexion, d'absorption ou de transmission du rayonnement à l'interface sol-végétation-atmosphère. La géométrie d'illumination et d'observation, ainsi que l'atmosphère (absorption et diffusion du rayonnement), vont également fortement influencer la mesure. Les conditions d'éclairement de la scène, en particulier la proportion de rayonnement diffus et direct, dépendent à la fois des propriétés de l'atmosphère (composition et turbidité) et du trajet du rayonnement incident (position du soleil). L'atmosphère perturbe également le rayonnement émis par la surface et réfléchit elle-même une partie du rayonnement observé. Tous ces processus d'interaction rayonnement/matière dépendent bien évidemment de la longueur d'onde d'observation. Une observation est ainsi fonction:

- de la nature de la surface observée;
- de la longueur d'onde du rayonnement;

- de l'énergie incidente au niveau de la surface (intensité et distribution);
- de la géométrie soleil-cible-capteur (Figure I.3).

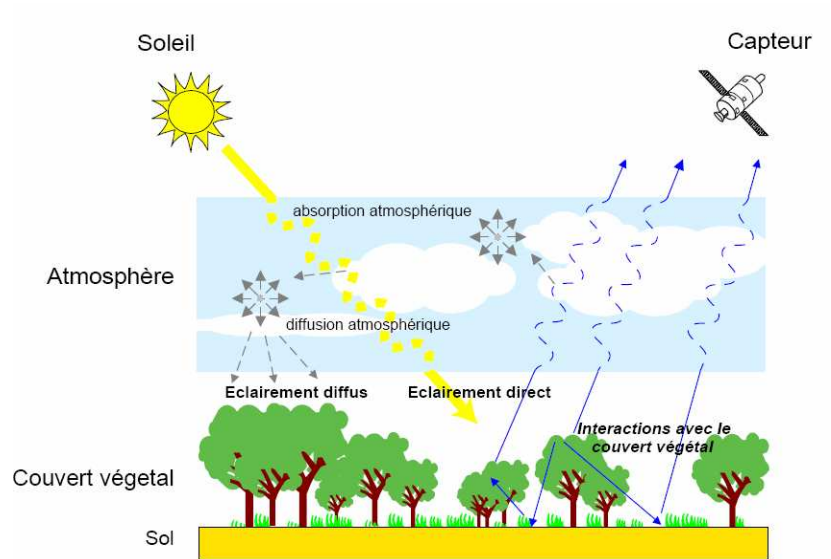


Figure I.2: Mesure de télédétection dans le domaine solaire (Bacour 2001).

On introduit ainsi la notion de facteur de réflectance bidirectionnelle, que l'on nomme souvent réflectance par souci de simplification qui décrit la capacité d'une surface à réfléchir le rayonnement. Elle est définie pour une certaine gamme de longueur d'onde λ par la formule suivante (Eq. I.1):

$$R_{\lambda}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \pi L_{\lambda}(\theta_r, \varphi_r) / E_{i\lambda}(\theta_i, \varphi_i) \quad (\text{Eq. I.1})$$

avec :

$E_{i\lambda}(\theta_i, \varphi_i)$: éclairement incident du soleil suivant la direction (θ_i, φ_i) ;

$L_{\lambda}(\theta_r, \varphi_r)$: luminance mesurée dans la direction d'observation (θ_r, φ_r) ;

θ_i et φ_i , θ_r et φ_r : angles zénithaux et azimutaux solaire et de visée.

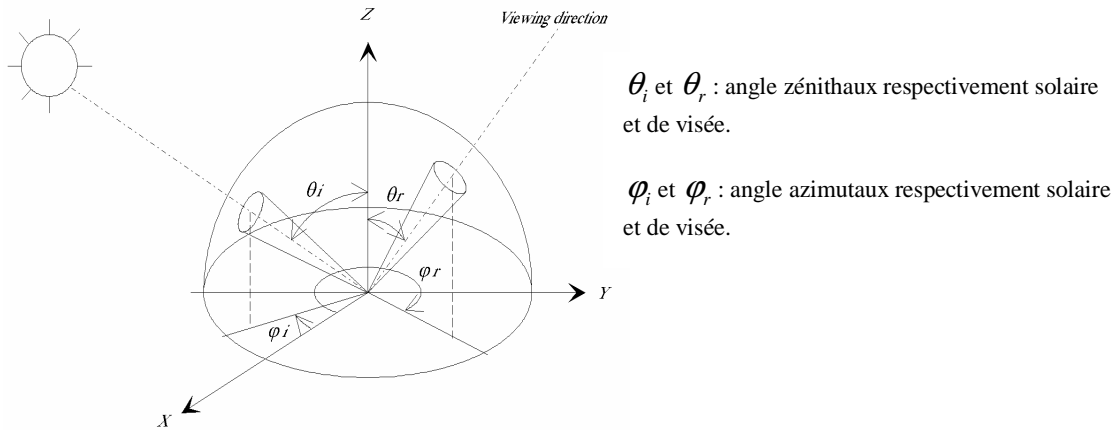


Figure I.3: Géométrie de mesure de la réflectance (GDTA 1991).

Les différents éléments constitutifs de la surface terrestre réfléchissent différemment le rayonnement d'origine solaire. Ces différences proviennent des propriétés de réflexion, d'absorption et de transmission des éléments présents à la surface (particules des sols, organes de la végétation, cristaux de neige, molécule d'eau...), ainsi que de leurs agencements (densité, structure et géométrie). On donne en Figure I.4 quatre exemples de spectres de réflectance très contrastés:

- La réflectance de la neige est très élevée dans le visible et le proche infrarouge ($> 90\%$). Elle diminue à partir de $1\ \mu\text{m}$ pour atteindre des valeurs très faibles dans le moyen infrarouge à $1.55\ \mu\text{m}$;
- L'eau absorbe la majorité du rayonnement reçu quelle que soit la longueur d'onde (reflectance $< \sim 10\%$). La réflectance diminue progressivement avec la longueur d'onde pour atteindre des valeurs quasi-nulles dans le proche infrarouge après $0.9\ \mu\text{m}$;
- La réflectance du sable, et plus généralement celle des sols nus, est faible aux courtes longueurs d'ondes, puis augmente quasi-linéairement (valeurs inférieures à 5% dans le bleu et autour de 20% dans le proche infrarouge);
- Le comportement de la végétation « verte » est typique, avec une forte absorption dans le visible, et en particulier dans le rouge et le bleu, pour la photosynthèse, et une très forte réflectance dans le proche infrarouge (jusqu'à 50%).

Les spectres présentés en Figure I.4 sont des cas typiques. Dans la réalité les réflectances des surfaces varient en fonction d'un grand nombre de facteur, par exemple l'état de la surface manteau neigeux, et notamment la proportion de neige fraîche et humide, où la turbidité de l'eau, sa « couleur » et son état de surface (vague, ondelettes, écumes...). Les propriétés des sols et de la végétation seront discutées ultérieurement.

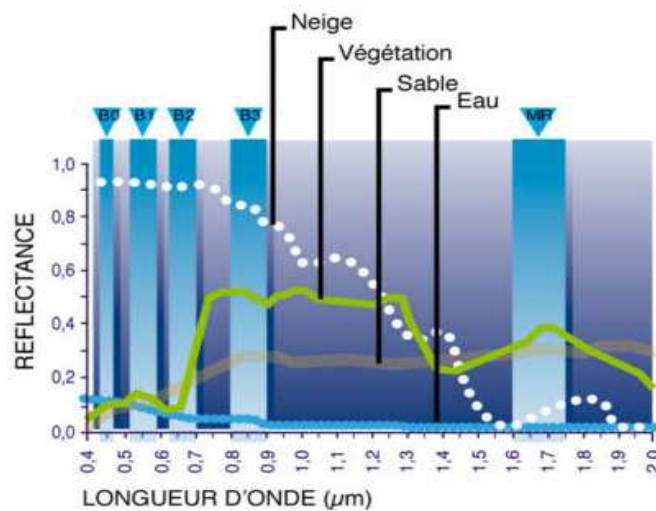


Figure I.4: Spectres typiques de réflectances de la neige, de l'eau, du sable et de la végétation. Les bandes spectrales correspondent aux capteurs embarqués sur SPOT : B1=Bleu, B2=rouge, B3=Proche Infrarouge, MIR=Moyen Infrarouge. (<http://vegetation.cnes.fr>).

I-2 L'OBSERVATION SPATIALE

I-2.1 Fonctionnement d'un capteur

Dans le domaine solaire, le capteur mesure le rayonnement électromagnétique émis par le soleil et réfléchi par une surface quelconque et son environnement. Ce signal est recueilli par un détecteur, sur des éléments de surface dont les dimensions dépendent de l'angle solide d'observation (θ_r , Figure I.3). Cet angle est défini par les caractéristiques du capteur, son altitude et la géométrie soleil-cible-capteur (Bonn and Rochon 1992).

Entre la phase de réception du rayonnement et le stockage, on distingue quatre systèmes (Figure I.5):

- Un système de réception comportant un télescope servant d'objectif;
- Une source de calibration et un spectromètre comprenant différents détecteurs;
- Un amplificateur pour accroître le signal;
- Un système d'enregistrement qui transforme le signal reçu en signal numérique.

Il existe actuellement deux grands types de systèmes de détection très différents, ceux à balayage (miroir rotatif devant l'optique) et ceux à barrettes (capteurs comportant plusieurs cellules, chacune observant une zone spécifique).

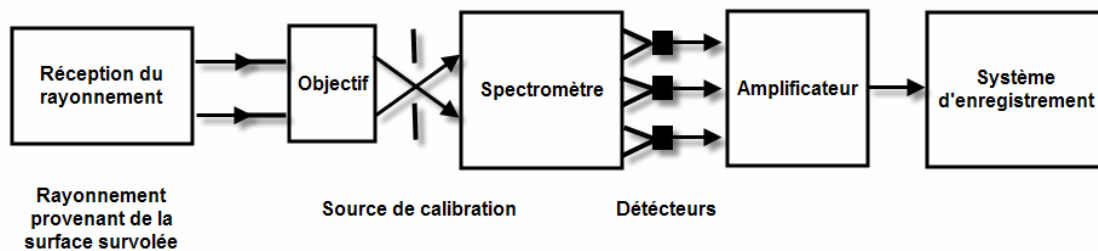


Figure I.5: Schéma général d'un capteur (Girard and Girard 1999).

Le processus d'acquisition se fait selon deux directions (Figure I.6): la première est celle de l'avancement de la plateforme et définit les lignes de l'image (direction parallèle à la trace du satellite ou *in-track*), la deuxième est la direction perpendiculaire à la première et définit les colonnes de l'image (direction *cross-track*). Précisément, le capteur observe la scène sous un angle appelé champ de vue (*FOV: Field Of View*), qui intervient dans la définition de la largeur du champ d'observation (*GFOV: Ground Field Of View*), autrement appelée fauchée. Ce processus entraîne la formation d'une image, qui possède des caractéristiques de nature spatiale, temporelle, directionnelle et spectrale. Ces caractéristiques dépendent de l'orbite sur laquelle évolue la plateforme spatiale, des propriétés des capteurs et des conditions d'observations. La majorité des capteurs opèrent sur des orbites héliosynchrones polaires, c'est-à-dire avec des

inclinaisons (angle entre le plan équatorial et le plan d'orbite du satellite) proches de 90°.

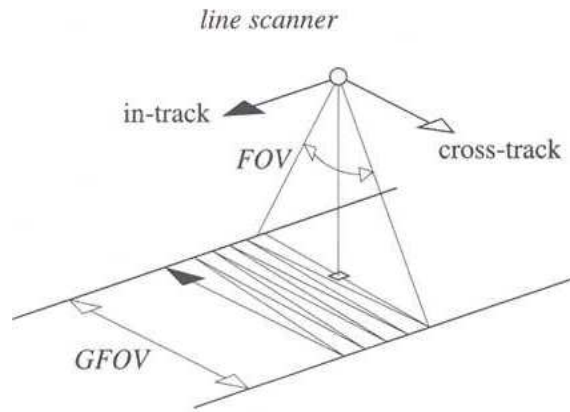


Figure I.6: Mesure dans le plan d'avancement du capteur (Garrigues 2004).

I-2.2 Caractéristiques spectrales

La résolution spectrale décrit la capacité d'un capteur à utiliser des plages de longueurs d'onde spécifiques appelées bandes spectrales. Ces bandes sont définies par leur nombre, leur position et leur largeur. La luminance spectrale $L(\lambda)$ est discrétisée en luminance équivalente apparente \hat{L}_b par bande spectrale b (observée par le capteur) par un système de filtres multi-spectraux (Eq. I.2):

$$\hat{L}_b = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} L(\lambda) \times S_b(b) \times d\lambda \quad (\text{Eq. I.2})$$

$S_b(\lambda)$ étant la réponse spectrale dans la bande $b = [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$.

On peut distinguer les systèmes d'observations selon le nombre de bandes et l'étendue du domaine spectral qu'ils couvrent. Ils peuvent délivrer:

- Une image panchromatique, qui n'a qu'une seule bande spectrale et ne renseigne que sur l'intensité « moyenne » du rayonnement visible (λ entre 0.5 et 0.7 μm);
- Une image multi-spectrale, obtenue par des enregistrements simultanés ou consécutifs dans un petit nombre de bandes spectrales (3 à quelques dizaines, dans les domaines visible et/ou infrarouge thermique), celles-ci n'étant pas nécessairement contiguës;
- Une image hyper-spectrale, collectée dans une multitude (souvent plus de 200) de bandes spectrales étroites (de l'ordre de quelques nm) et généralement contiguës, dans les portions visible, proche et moyen infrarouge du spectre électromagnétique.

Il existe un compromis entre résolution spectrale et résolution spatiale. En règle générale, plus on augmente la résolution spectrale, plus on a tendance à diminuer la résolution spatiale. Ceci s'explique par le fait que les détecteurs ont besoin de suffisamment de flux d'énergie lumineuse pour augmenter le rapport signal/bruit et qu'une augmentation de la résolution va dans le sens de la diminution de ce flux. Les résolutions spatiales les plus fines sont ainsi obtenues pour les capteurs à très haute résolution spatiale en mode panchromatique (par exemple ~1 m IKONOS et ~60 cm pour Quickbird).

I-2.3 Caractéristiques spatiale et temporelle

La résolution spatiale d'un capteur peut être au premier ordre assimilée à la taille des éléments de surface élémentaires observés, éléments constitutifs de l'image appelés pixels (Figure I.7). La mesure est effectuée le long de l'axe focal sous un angle appelé IFOV (*Instantaneous Field Of View*). Projetée au sol, elle forme un pseudo-carré de taille GIFOV (*Ground Instantaneous Field Of View*). Dans le cas d'une visée au nadir, c'est-à-dire à la verticale du satellite (angle zénithal de visée θ_v égal à 0°), la résolution spatiale est obtenue en multipliant le terme IFOV par l'altitude de la plateforme. Le « carré » ainsi défini forme le pixel de l'image dont la taille est très

variable d'un capteur à l'autre, de moins d'un mètre pour les capteurs à très haute résolution spatiale en mode panchromatique sur orbite polaire à plusieurs kilomètres pour les observations des satellites météorologiques sur orbite géostationnaire⁵. En cas de visée oblique, la forme du pixel est altérée et la résolution du pixel tend à diminuer; de plus, des déformations géométriques sont observées du fait de la courbure de la terre (Figure I.8).

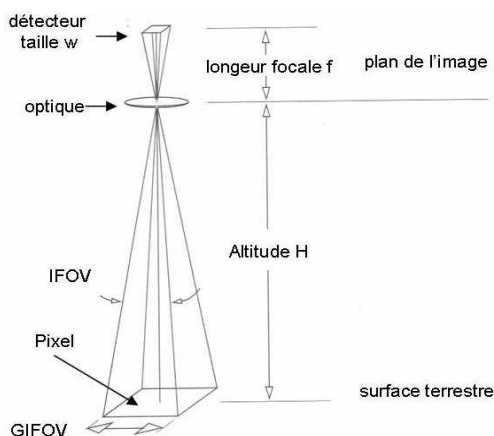


Figure I.7: Mesure d'un détecteur (Garrigues 2004).

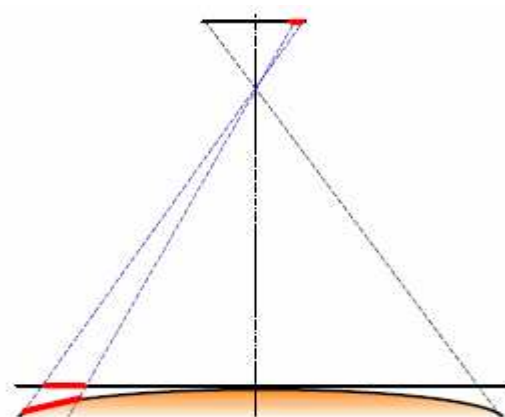


Figure I.8: Déformations géométriques dues à la courbure de la terre (Baret et al. 2006).

Les observations issues de la télédétection spatiale sont également caractérisées par leur résolution temporelle ou encore la répétitivité des observations, notion qu'il est plus difficile d'appréhender car plusieurs composantes interviennent dans sa définition. Tout d'abord, la résolution temporelle dépend du cycle orbital d'un capteur. Ce cycle définit la période de revisite, à savoir le temps que met un capteur pour observer un même point de la surface de la terre dans les mêmes conditions de visée. Pour les satellites polaires sur orbite héliosynchrone, ce cycle est généralement d'une durée de 15 jours à

⁵ L'orbite géostationnaire est une orbite située à 35786 km d'altitude au-dessus de l'équateur de la Terre, dans le plan équatorial. Cette orbite possède une période de révolution égale à la période de rotation de la Terre sur elle-même.

un mois; il est par exemple de 16 jours pour Landsat et de 26 jours pour SPOT⁶. La largeur de la fauchée (Figure I.9) du capteur et la position de la cible jouent également un rôle important dans la définition de la résolution temporelle. Les capteurs à large champ comme SPOT-VEGETATION ou TERRA-MODIS ont des fauchées de plus de 2000 km, ce qui leur permet d'observer quasi-quotidiennement l'ensemble de la terre. De plus, les régions proches des pôles sont observées plus fréquemment que celles situées à proximité de l'équateur, du fait du chevauchement entre fauchées adjacentes (Figure I.10). Les capacités de dépointage (visée latérale ou *off-nadir*) de certains capteurs comme SPOT offrent la possibilité d'observer plus fréquemment certaines régions, au détriment toutefois de la couverture systématique de la terre. La période de revisite d'un même point peut également être augmentée en embarquant un même capteur sur plusieurs missions spatiales (par exemple MODIS sur les plateformes AQUA et TERRA), ou en choisissant une orbite particulière, comme par exemple celle de FORMOSAT-2 qui ne permet d'observer qu'une partie de la terre mais avec des possibilités de revisite quotidienne pour une même direction de visée. Enfin, certains phénomènes comme les nuages, les brumes et brouillards, la fumée ou les aérosols, empêchent ou limitent fortement l'observation des surfaces. La répétitivité effective des observations est par conséquent dépendante des conditions atmosphériques du milieu observé.

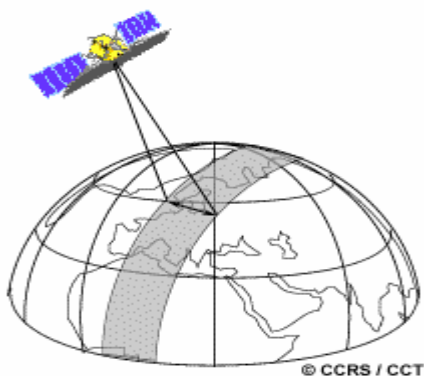


Figure I.9: Fauchée d'un satellite (<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/>).

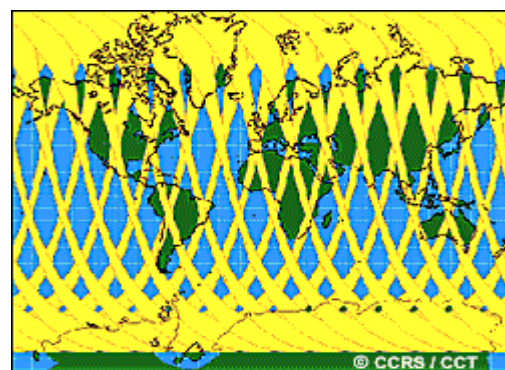


Figure I.10: Chevauchement entre les fauchées d'un satellite (<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/>).

⁶ Système Pour l'Observation de la Terre

Cette présentation montre que les caractéristiques spatiales et temporelles des missions spatiales ne sont pas indépendantes. Pour les missions dont le but est d'observer l'ensemble des surfaces continentales, il existe une relation directe entre la largeur de la fauchée et la résolution spatiale, et un compromis entre résolution spatiale et répétition des observations. La Figure I.11 illustre ce compromis: la répétitivité des observations à résolution décimétrique est de l'ordre de 15 jours à 1 mois pour des fauchées de quelques dizaines à moins de 200 km, tandis que celle des capteurs à résolution kilométrique est quasi-quotidienne. Les satellites météorologiques sur orbite géostationnaire sont un cas particulier: ils observent toutes les 15 ou 30 minutes l'ensemble d'un hémisphère avec des résolutions grossières (quelques kilomètres). C'est aussi le cas des capteurs à très haute résolution spatiale dont les acquisitions systématiques ne peuvent être effectuées que par des opérations de programmation spécifique.

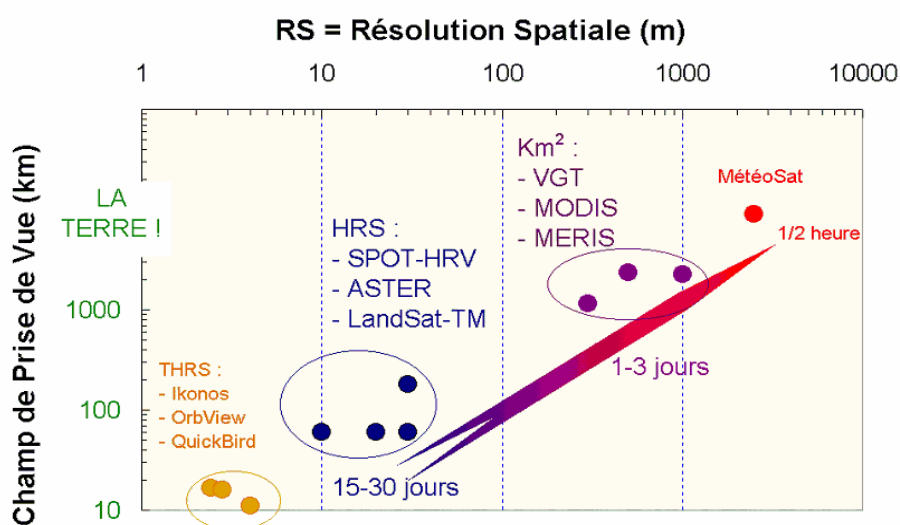


Figure I.11: Champ de prise de vue des capteurs, résolution spatiale des images et répétition des observations.

I-2.4 Prétraitement des images satellites

L'image « brute » en sortie du capteur ne peut être directement utilisée car elle est entachée d'erreurs liées à la sensibilité des capteurs, la géométrie d'observation et la présence de l'atmosphère autour de la terre. Ces images doivent être prétraitées en appliquant des transformations géométriques et radiométriques (étalonnage et correction atmosphérique).

I-2.4.1 Correction géométrique

Les distorsions géométriques (Figure I.12) sont dues au mouvement relatif du capteur, de la plateforme qui l'embarque et de la terre (rotation), ainsi qu'à la géométrie du terrain (courbure de la terre et relief). Les corrections géométriques sont appliquées pour compenser ces distorsions afin que la représentation de l'image soit aussi fidèle que possible et que les observations soient présentées dans un système de projection cartographique. Certaines de ces variations sont systématiques ou prévisibles, et on peut en tenir compte par une modélisation précise du mouvement de la plateforme et de la configuration géométrique cible-capteur. D'autres erreurs non systématiques, ou aléatoires, ne peuvent pas être modélisées de cette manière et on doit effectuer la correspondance géométrique entre certains pixels de l'image et des points de coordonnées connus.

A : image non corrigée
B : image corrigée
B1..B4 points de contrôle

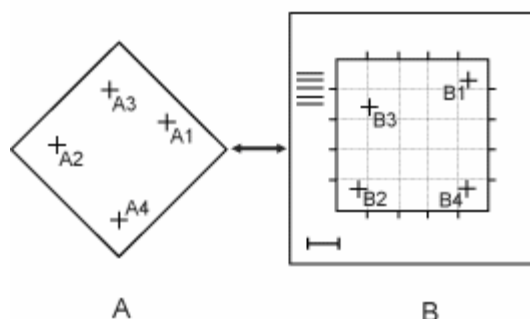


Figure I.12: Exemple de distorsions géométriques (<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/>).

Le processus de correction géométrique (Figure I.12) consiste à identifier les coordonnées de l'image (ligne et colonne) de plusieurs points clairement distincts, appelés points de contrôle au sol (PCS), sur l'image à corriger et à les faire correspondre à leur véritable position en coordonnées au sol (par exemple en latitude et longitude). On peut également utiliser une image déjà corrigée géométriquement (image de référence) en lieu et place des points de contrôle au sol. On sélectionne, sur cette image, des points remarquables et facilement détectables (croisement de routes, de rivières, *etc*) et on les fait correspondre avec des points de l'image à corriger. Cette méthode est une rectification « image à image ».

Le nombre de points de contrôle dont on a besoin dépend de l'ampleur des déformations de l'image à corriger et de la complexité du modèle de transformation que l'on désire appliquer. Les transformations polynomiales sont les plus couramment utilisées. On donne en Figure I.13 un exemple de transformation affine où les nouvelles coordonnées (x' et y') sont définies à partir des anciennes (x et y) par deux polynômes au 1er degré possédant chacun 3 paramètres. Lorsque l'image à corriger souffre d'autres types de distorsions que celles pouvant se caractériser par des transformations de base (translation, rotation et homothétie), l'utilisation de polynômes de degré supérieur à 1 est requise.

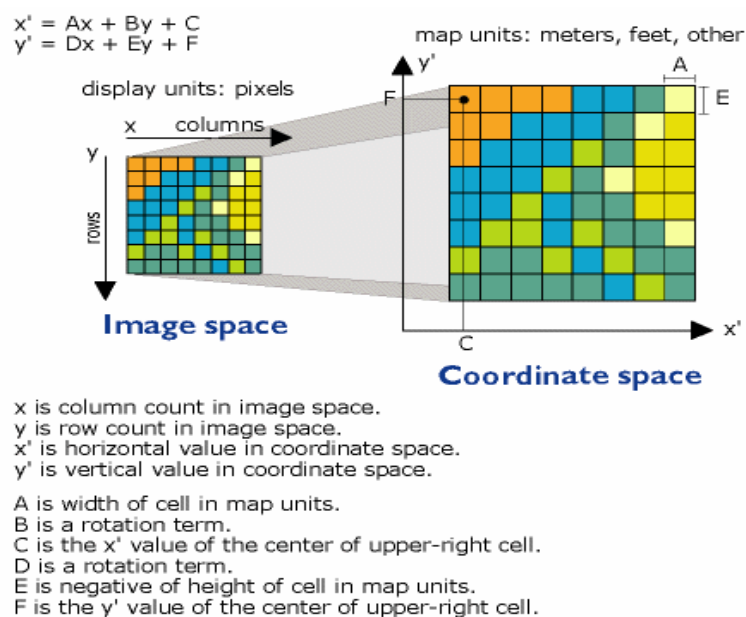


Figure I.13: Exemple de transformation affine pour la rectification géométrique des images
 (<http://webhelp.esri.com/>).

I-2.4.2 Corrections radiométriques

Trois étapes sont nécessaires pour pouvoir disposer de données de réflectance au sol: étalonnage, calcul de la réflectance au sommet de l'atmosphère (*TOA: Top of Atmosphere*) et correction atmosphériques.

L'étalonnage permet de convertir les valeurs numériques (*DN*) enregistrées en valeurs physiques de la luminance \hat{L}_b (Eq. I.3). Les coefficients d'étalonnage *gain*, *offset* sont déterminés avant le lancement du satellite. Ils sont mis à jour régulièrement en comparant les observations sur des surfaces dont les propriétés spectrales sont invariantes au cours du temps (*e.g* désert..) pour compenser la perte de sensibilité des capteurs.

$$\hat{L}_b = gain \times DN + offset \quad \text{(Eq. I.3)}$$

La luminance dépend des conditions d'éclairement. La réflectance au sommet de l'atmosphère (ρ_b^{TOA}) (Eq. I.4) permet de normaliser celle-ci. Elle est calculée à partir de l'éclairement solaire moyen⁷ au sommet de l'atmosphère (E_b^{TOA}), de l'angle solaire zénithal (θ_s) et d'un facteur correctif $u(t)$ de la variation de la distance entre la terre et le soleil.

$$\rho_b^{TOA} = \frac{L_b \times \pi}{\cos(\theta_s) \times E_b^{TOA} \times u(t)} \quad \text{(Eq. I.4)}$$

L'énergie reçue par un capteur est altérée par l'atmosphère lors de son double trajet, incident (soleil-cible) et réfléchi (cible-capteur) (cf. Figure I.2). On distingue principalement deux effets atmosphériques:

⁷ Eclairement arrivant verticalement sur 1 m² de surface au sommet de l'atmosphère dans la bande b.

- absorption atmosphérique: Plusieurs gaz dans l'atmosphère absorbent ou "piègent" l'énergie dans certaines longueurs d'ondes appelées bandes d'absorption (cf. Figure I.1), en particulier, l'ozone diminue sensiblement l'énergie dans le rouge et la vapeur d'eau de façon plus conséquente dans le proche infrarouge.
- diffusion atmosphérique: La diffusion est la réflexion de l'énergie par des particules de l'atmosphère. On distingue deux types de diffusion selon la taille des particules: la diffusion de Rayleigh (molécules atmosphériques) et la diffusion de Mie (poussière ou aérosols). Ces diffusions affectent l'ensemble du domaine visible du spectre électromagnétique.

Les phénomènes d'absorption et de diffusion sont à la base de l'équation du transfert radiatif qui permet de calculer la réflectance de surface ρ_b^{TOC} (*TOC : Top Of Canopy*):

$$\rho_b^{TOC} = \frac{\rho_b^{TOA} - T_g \times \rho_{atm}}{T_g \times T_{\downarrow} \times T_{\uparrow} - s \times (\rho_b^{TOA} - T_g \times \rho_{atm})} \quad (\text{Eq. I.5})$$

Avec :

- ρ_b^{TOA} réflectance au sommet de l'atmosphère;
- ρ_{atm} réflectance atmosphérique (Molécules + aérosol) ;
- T_g transmission gazeuse ;
- T_{\uparrow} transmission montante (Molécules + aérosol) ;
- T_{\downarrow} transmission descendante (Molécules + aérosol) ;
- s albédo (Molécules + aérosol).

Pour corriger ces effets et obtenir une réflectance de surface, on utilise des modèles mathématiques (Rahman and Dedieu 1994; Vermote et al. 2002) qui décrivent les interactions principales du signal avec l'atmosphère. La principale difficulté pour appréhender ces modèles est la méconnaissance de la composition de l'atmosphère et en particulier son contenu en aérosols, très variable dans le temps et l'espace.

I-3 LES PRINCIPALES MISSIONS D'OBSERVATION DE LA TERRE

I-3.1 Principales caractéristiques des capteurs à basse résolution spatiale (VEGETATION et MODIS)

Les instruments VEGETATION (Arnaud and Leroy 1991; Achard et al. 1994; Saint 1994) et MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer, Justice et al. 1987; Justice et al. 1998 ; Running et al. 1994; Justice and Townshend 2002) sont des capteurs à large champ embarqués respectivement sur les missions d'observations SPOT (depuis SPOT 4) lancées en 1998 et TERRA en 1999 (Tableau I.1 et I.2). Ils observent la totalité de la surface terrestre tous les un à deux jours depuis des orbites quasi-polaires héliosynchrones (10h30 à l'équateur). Ces capteurs ont des fauchées de plus de 2200 km et des champs de vue de l'ordre de 110° (angle zénithal de visée θ , compris entre -55° et $+55^\circ$). Un pixel d'une scène est ainsi observé selon plusieurs configurations géométriques, ces configurations étant rythmées par le cycle orbital du satellite (16 jours pour TERRA et 26 jours pour SPOT) et le cycle annuel associé à l'évolution de la position du soleil.

Le capteur MODIS utilise un miroir à balayage double-face qui tourne de façon continue (Xiong et al. 2005). Le capteur VEGETATION utilise un système à barrettes dont l'optique compense en partie la perte de résolution spatiale en visée latérale. Cette différence, ajoutée à la capacité de navigation des plateformes SPOT explique l'excellente qualité géométrique des images VEGETATION. En revanche, la résolution de VEGETATION au nadir est inférieure à celle de MODIS (1 km contre 250 m pour les bandes rouge et proche infrarouge).

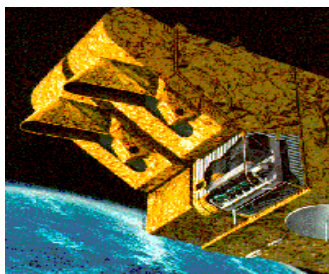
Le capteur VEGETATION opère dans quatre bandes du spectre électromagnétique: bleu, rouge, proche infrarouge et moyen infrarouge (Tableau I.3), Le capteur MODIS observe la terre dans 36 bandes spectrales de 0.4 à 14.4 μm ; on présente dans le Tableau I.4 les sept premières bandes dans les domaines visible et proche infrarouge.

Tableau I.1: Caractéristiques du capteur MODIS TERRA (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>).



Lancement	1999
Altitude	705 km
Orbite	Héliosynchrone descendante
Heure de passage à l'équateur	10:30 a.m.
Champ de vue	2330 km
Résolution spatiale au nadir	<ul style="list-style-type: none"> • 250 m (bande #1-2) • 500 m (bande #3-7) • 1 km (bande #8-36)
Période de revisite	(+/-2jours)

Tableau I.2: Caractéristiques du capteur SPOT VEGETATION (<http://vegetation.cnes.fr/>).



Lancement	1998
Altitude	830 km
Orbite	polaire héliosynchrone
Heure de passage à l'équateur	10:30 a.m (descendant)
Champ de vue	~2250 km Angle d'observation (off-nadir) de l'ordre de 50.5°
Résolution spatiale au nadir	1.15 km
Période de revisite	1 jour

Tableau I.3: Bandes spectrales du capteur SPOT VEGETATION (<http://vegetation.cnes.fr/>).

Bande	Bandes spectrales	Longueur d'ondes	Résolution spatiale (m)
1	Bleu	0.43-0.47 μm	1000
2	Rouge	0.61-0.68 μm	1000
3	Proche Infrarouge	0.78-0.89 μm	1000
4	Moyen Infrarouge	1.58-1.75 μm	1000

Tableau I.4: Les 7 premières bandes spectrales de MODIS/TERRA (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>).

Bande	Bandes spectrales	Longueur d'onde	Résolution spatiale(m)
1	Rouge	0.62-0.67 μm	250
2	Infrarouge	0.84-0.87 μm	250
3	Bleu	0.45-0.47 μm	500
4	Vert/Jaune	0.54-0.56 μm	500
5	Infrarouge	1.23-1.25 μm	500
6	Infrarouge	1.62-1.65 μm	500
7	Infrarouge	2.10-2.15 μm	500

I-3.1.1 Les Produits VEGETATION

Il existe essentiellement deux types de produits disponibles (Maisongrande et al. 2004).

- Les produits « physique » (P), correspondent à des segments de prise de vue « instantanée », c'est-à-dire sur quelques secondes à quelques minutes d'acquisition continue. Ils sont étalonnés et transformés en réflectances mais non corrigés des effets atmosphériques;
- Les produits de synthèse (S) sont élaborés après assemblage (*compositing* en anglais) de plusieurs segments de prise de vue sur une même zone géographique. Ils existent au pas de temps journalier (recoupement des fauchées) et au pas de temps de 10 jours⁸. Ces données sont corrigées des effets atmosphériques au moyen du modèle SMAC⁹ (Rahman and Dedieu 1994; Berthelot and Dedieu 1997) alimenté par des données issues de modèle de circulation générale (vapeur d'eau) ou de climatologies (ozone, aérosols).

L'objectif principal du procédé de composition décadaire est d'éliminer les données nuageuses. Deux techniques sont implémentées au Centre de Traitement des Images VEGETATION (*CTIV* en Belgique). Le Maximum Value Composite (MVC, Tarpley et al. 1984; Holben 1986;) est basé sur la sélection de la meilleure observation sur la période de composition. Pour chaque période et chaque pixel, les observations correspondant à l'indice de végétation (*NDVI: Normalized Difference Vegetation Index*) le plus élevé, sont retenues. Cet algorithme permet d'éliminer les nuages et de réduire les effets atmosphériques par la sélection d'acquisitions en conditions claires (Kimes et al. 1984; Holben 1986). En revanche, il a tendance à sélectionner les données acquises en condition de visée fortement latérale (Cilhar et al. 1994; Li et al. 1996; Burgess and Pairman 1997).

Tous les produits VEGETATION sont géoréférencés et présentés dans une projection plate-carrée, avec des pixels à une résolution de 1/112°. Ils sont accessibles par grandes

⁸ Les périodes sont définies à partir du calendrier légal: du 1er au 10, du 11 au 20 et du 21 à la fin de chaque mois

⁹ Simplified Method for Atmospheric Correction

régions du globe via le portail <http://www.vgt.vito.be/>. Ils sont distribués avec des données auxiliaires qui fournissent les conditions de prise de vue de chaque pixel (date et heure, angles de prise de vue et solaire).

I-3.1.2 Les produits MODIS

Dans notre étude, nous avons utilisé le produit MOD13Q1 (Huete et al. 1999; Huete et al. 2002). Il s'agit des images composites d'indice de végétation *NDVI* à la résolution spatiale de 250 m. Ce produit est généré à partir des observations instantanées de réflectance MOD09 corrigées des effets atmosphériques (Vermote et al. 2002). L'algorithme opère pixel à pixel et utilise les observations collectées sur une période de 16 jours, suivant les cinq étapes présentées en Figure I.14. Les observations sont classées en trois catégories selon l'angle de visée et les conditions d'enneuagement. Selon le nombre de données jugées correctes à l'issue de cette sélection (n dans la Figure I.14), trois algorithmes peuvent être appliqués: (1) une normalisation directionnelle (n suffisamment grand); (2) un *Maximum Value Composite* avec une condition sur la visée; (3) un *Maximum Value Composite* généralisé (sans contrainte sur la visée).

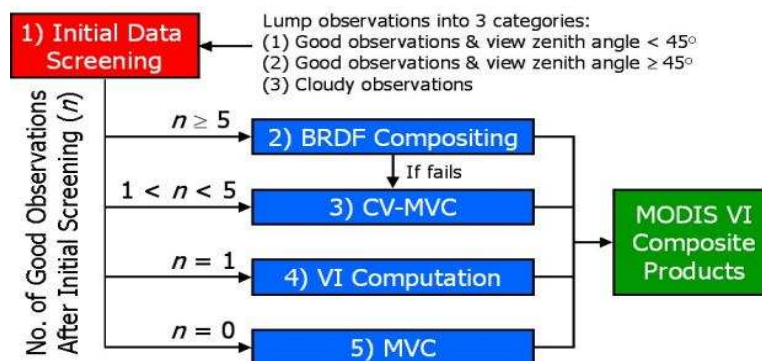


Figure I.14: Schéma de la procédure de synthèse des images d'indice de végétation MODIS (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>).

Les produits MODIS sont organisés sous forme de tuiles de taille 1200 km par 1200 km projetées dans la projection sinusoidale (Integerized Sinusoidal (ISIN) grid projection).

Collées ensemble, ces tuiles offrent une couverture globale de la terre. Ils sont gratuitement téléchargeables sur le site du portail EOS (Earth Observing System Data Gateway) de la NASA¹⁰ <http://modis.gsfc.nasa.gov>.

I-3.2 Les capteurs a haute résolution spatiale

Nous avons utilisé trois types d'images satellites à haute résolution spatiale issues des capteurs Landsat, SPOT HRVIR¹¹ et FORMOSAT-2. Les caractéristiques respectives de ces capteurs (orbite, résolution spatiale et temporelle et bande spectrale...) sont rappelées dans cette section (Tableau I.5 à I.10).

Le premier satellite civil d'observation de la Terre a été Landsat en 1972. Les trois premières missions étaient équipées des capteurs à résolution hectométrique MSS (Multi-Spectral Sensor). A partir de 1982 et de l'envoi de Landsat 4, les missions embarquent les capteurs Thematic Mapper qui observent dans sept bandes spectrales dont six dans le visible et le proche et moyen infrarouge (Tableau I.6). La résolution des images TM est de 30 m pour une scène de 185 km de coté. Le capteur ETM + (Enhanced Thematic Mapper), dont est équipée la dernière mission (Landsat-7), possède une bande panchromatique complémentaire à la résolution de 15 m (Tableau I.5).

Le système SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) est un système d'imagerie optique spatiale à haute résolution. Il est opérationnel depuis 1986, avec 5 missions lancées (SPOT -1 à 5), dont 3 sont encore opérationnelles de nos jours (SPOT-2, 4 et 5). Ils opèrent depuis une orbite quasi-polaire héliosynchrone à une altitude d'environ 830 km. Chaque mission comporte deux instruments dont le champ de vue est de 60 km et la résolution spatiale de 20 m pour SPOT-4 et de 10 m pour SPOT-5. Chaque instrument peut indifféremment acquérir des images en mode panchromatique (P) ou multi spectral (XS) de façon indépendante ou simultanée. Un grand atout du système SPOT est la

¹⁰ National Aeronautics and Space Administration

¹¹ Haute Résolution dans le Visible et l'infraRouge

capacité de dépointage du système imageur principal de part et d'autre de la trace au sol du satellite (d'environ 30°). Ceci permet d'augmenter considérablement la fréquence des acquisitions (sous des conditions de visée variables). On présente ici les caractéristiques du capteur HRVIR embarqué sur la plateforme SPOT-4 (Tableau I.7 et I.8).

Le satellite FORMOSAT-2 (Tableau I.9) a été lancé par l'agence spatiale Taïwanaise «The National Space Organization of Taiwan» (NSPO, <http://www.nspo.org.tw/>) en mai 2004. C'est le premier satellite qui permet d'obtenir des images quotidiennes à haute résolution spatiale (8 m au nadir) dans 4 bandes spectrales allant de 0.45 μm à 0.90 μm (du bleu au proche infrarouge) (Tableau I.10). FORMOSAT-2 est sur orbite héliosynchrone et observe chaque surface de la terre sous le même angle de prise de vue, ce qui minimise les effets directionnels. Les images FORMOSAT-2 sont distribuées par la société SPOTIMAGE France.

Tableau I.5: Caractéristiques du capteur Landsat 7ETM+ (<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>).



Lancement	1999
Altitude	705 km
Orbite	Quasi-polaire héliosynchrone
Heure de passage à l'équateur	9 :35 a.m.
Champ de vue	185 km
Résolution spatiale au nadir	<ul style="list-style-type: none"> • 30 m en multispectral • 15 m panchromatique [60 m dans le thermique]
Période de revisite	15 jours

Tableau I.6: Bandes spectrales du capteur Landsat 7 ETM+ (<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>).

Bande	Bandes spectrales	Longueur d'ondes	Résolution spatiale
1	Bleu	0.45-0.52 μm	30 m
2	Vert	0.53-0.61 μm	30 m
3	Rouge	0.62-0.69 μm	30 m
4	Proche Infrarouge	0.78-0.91 μm	30 m
5	Moyen Infrarouge	1.57-1.78 μm	30 m
6	Infrarouge Thermique	10.4-12.6 μm	60 m
7	Moyen Infrarouge	2.10-2.35 μm	30 m
8	Panchromatique	0.50-0.90 μm	15 m

Tableau I.7: Caractéristiques du capteur HRVIR embarqué sur la plate forme SPOT-4 (www.cnes.fr).



Lancement	1998
Altitude	830 km
Orbite	Quasi-polaire héliosynchrone
Heure de passage à l'équateur	10:30 a.m (descendant)
Champ de vue	~60 km
Résolution spatiale au nadir	20 m
Période de revisite	26 jours

Tableau I.8: Bandes spectrales du capteur HRVIR embarqué sur la plate forme SPOT-4 (www.cnes.fr).

Bande	Bandes spectrales	Longueurs d'ondes	Résolution spatiale
1	Vert	0.50-0.59 μm	20 m
2	Rouge	0.61-0.68 μm	20 m
3	Proche Infrarouge	0.79-0.89 μm	20 m
4	Moyen Infrarouge	1.58-1.75 μm	20 m
5	Panchromatique	0.5-0.89 μm	2.5 m

Tableau I.9: Caractéristiques du satellite FORMOSAT-2 (<http://www.nspo.org.tw/>).



Lancement	Mai 2004
Altitude	891 km
Orbite	Quasi-polaire héliosynchrone
Heure de passage à l'équateur	9 h 30 descendant,
Champ de vue	24 km
Résolution spatiale au nadir	8 m (spectrale) 2 m (panchromatique)
Période de revisite	(+/-1 jours)

Tableau I.10: Bandes spectrales de FORMOSAT-2 (<http://www.nspo.org.tw/>).

Bande	Bandes spectrales	Longueurs d'ondes	Résolution spatiale
1	Bleu	0.40-0.52 μm	8 m
2	Vert	0.52-0.60 μm	8 m
3	Rouge	0.63-0.69 μm	8 m
4	Proche Infrarouge	0.76-0.90 μm	8 m
5	Panchromatique	0.45-0.90 μm	2 m

I-4 APPLICATIONS DE LA TELEDETECTION POUR L'ETUDE DES SURFACES CONTINENTALES

Dans cette section, on discute des applications de la télédétection ayant trait avec la thématique du présent travail. On donne en premier lieu un aperçu des méthodes de cartographie de l'occupation du sol, qui est un préalable aux études permettant de comprendre les interactions homme-environnement et à la gestion des ressources naturelles (Aspinall and Justice 2003; Lepers et al. 2005). On introduit ensuite les approches permettant de caractériser les surfaces continentales en variables biophysiques, relatives au fonctionnement du système sol-plante. Enfin, on discute de l'utilisation conjointe des données de télédétection et des modèles agrométéorologiques. Les données de télédétection, régulièrement distribuées dans l'espace et le temps, apparaissent effectivement fortement complémentaires aux simulations réalisées au moyen de modèle, qui décrivent la dynamique du système sol-plante. Leur utilisation combinée est une voie de recherche particulièrement ambitieuse pour la mise en place

d'observatoires des ressources hydriques et végétales à l'échelle régionale (Moulin 1995; Guérif et al. 2001; Boegh et al. 2004; Mo et al. 2005).

I-4.1 Occupation du Sol

I-4.1.1 Méthodes de classification

La classification a pour objectif de produire des images thématiques, c'est à dire des images dont le contenu ne représente plus une mesure mais une interprétation et une catégorisation de la nature des objets associés aux pixels (Richards 1999). Les résultats de la classification sont généralement des cartes d'occupation du sol (Prenzel 2004; Rogan and Chen 2004; Lu and Weng 2007) qui sont à la base de nombreuses applications socio-économiques et environnementales (Aspinall and Justice 2003; Lepers et al. 2005).

La classification des données satellites dépend de nombreux facteurs relatifs à la thématique de l'étude, aux besoins de l'utilisateur, aux caractéristiques de la zone d'étude, à la disponibilité, aux caractéristiques et à la qualité des données satellites. Les étapes de classification incluent le choix des images satellites, la détermination de la méthode de classification appropriée, les opérations de prétraitement des images, la sélection des échantillons d'apprentissage et enfin l'évaluation de la classification. On trouvera des éléments de réponses aux différentes questions soulevées par ces étapes dans les publications suivantes (Quattrochi and Goodchild 1997; Phinn 1998; Lefsky and Cohen 2003; Olthof and Fraser 2007; Simonneaux et al. 2008).

Il existe de très nombreuses méthodes de classification: nuées dynamiques, ascendante hiérarchique, maximum de vraisemblance, réseaux de neurones. Ces approches de classification peuvent être regroupées selon trois types de critère (Tableau I.11):

- Supervisée ou non supervisée ;
- Paramétrique ou non paramétrique;

- Classification par pixel ou sub-pixel.

Les méthodes supervisées nécessitent au préalable une connaissance *à priori* du nombre, comportement et sémantique des classes à déterminer. Cette connaissance est déduite d'un jeu d'entraînement/apprentissage. Les échantillons d'apprentissage sont en général sélectionnés à partir d'observations faites sur le terrain en repérant des parcelles représentatives des différents éléments devant être classés. La classification non supervisée détermine automatiquement les classes à partir de critères statistiques. A titre d'exemple la méthode des nuées dynamiques est une méthode itérative qui, à chaque itération, calcule les centres de gravité des classes et les distances des pixels à ces centres jusqu'à ce que les centres de gravité se stabilisent.

Les classifications paramétriques sont le plus souvent des classifications supervisées. Ce sont des méthodes statistiques qui cherchent à approximer une densité et une loi de probabilité des échantillons en déterminant des paramètres spécifiques tel que la moyenne, la variance et l'écart type à partir d'un jeu d'entraînement. Le plus souvent, ces méthodes utilisent des lois gaussiennes. L'inconvénient de ces approches est la difficulté d'intégrer d'autres données (spatiales, contextuelles, *etc*) dans la procédure de classification. Les classifications non paramétriques n'émettent aucune hypothèse sur la famille des lois de probabilité dont sont susceptibles d'être tirées les observations. Ces méthodes de classification ont l'avantage d'être souples dans le sens où elles peuvent utiliser d'autres sources de données.

Dans les méthodes de classification par pixel, chaque pixel est classé individuellement. Il est assigné à une seule classe et un seul label. Ces méthodes reposent sur l'hypothèse que la taille du pixel est supérieure à la taille des objets observés, hypothèse généralement non satisfaite dans le cas des capteurs grands champs (résolution spatiale ~ 1 km). D'autres méthodes de classifications dites « sub-pixel » considèrent que la réponse spectrale d'un pixel est issue de la composition linéaire ou non linéaire des divers objets qui le composent. La classification « sub-pixel » a pour but de déterminer la contribution en termes de pourcentage des divers objets constituant le pixel. Ces méthodes font l'objet de la prochaine section.

Tableau I.11: Critères, catégories et caractéristiques des méthodes de classifications en télédétection (Lu et Weng 2007).

Criteria	Categories	Characteristics	Example of classifiers
Whether training samples are used or not	Supervised classification approaches	Land cover classes are defined. Sufficient reference data are available and used as training samples. The signatures generated from the training samples are then used to train the classifier to classify the spectral data into a thematic map.	Maximum likelihood, minimum distance, artificial neural network, decision tree classifier.
	Unsupervised classification approaches	Clustering-based algorithms are used to partition the spectral image into a number of spectral classes based on the statistical information inherent in the image. No prior definitions of the classes are used. The analyst is responsible for labelling and merging the spectral classes into meaningful classes.	ISODATA, K-means clustering algorithm.
Whether parameters such as mean vector and covariance matrix are used or not	Parametric classifiers	Gaussian distribution is assumed. The parameters (e.g. mean vector and covariance matrix) are often generated from training samples. When landscape is complex, parametric classifiers often produce 'noisy' results. Another major drawback is that it is difficult to integrate ancillary data, spatial and contextual attributes, and non-statistical information into a classification procedure.	Maximum likelihood, linear discriminant analysis.
	Non-parametric classifiers	No assumption about the data is required. Non-parametric classifiers do not employ statistical parameters to calculate class separation and are especially suitable for incorporation of non-remote-sensing data into a classification procedure.	Artificial neural network, decision tree classifier, evidential reasoning, support vector machine, expert system.
Which kind of pixel information is used	Per-pixel classifiers	Traditional classifiers typically develop a signature by combining the spectra of all training-set pixels from a given feature. The resulting signature contains the contributions of all materials present in the training-set pixels, ignoring the mixed pixel problems.	Most of the classifiers, such as maximum likelihood, minimum distance, artificial neural network, decision tree, and support vector machine.
	Subpixel classifiers	The spectral value of each pixel is assumed to be a linear or non-linear combination of defined pure materials (or endmembers), providing proportional membership of each pixel to each endmember.	Fuzzy-set classifiers, subpixel classifier, spectral mixture analysis.

I-4.1.2 Classification des images à basse résolution spatiale

A l'heure actuelle, plusieurs études ont été réalisées pour produire des cartes d'occupation du sol à l'échelle globale à partir des données à basse résolution spatiale (VEGETATION ou MODIS) (GLCF¹², <http://www.landcover.org/>, GLC¹³2000, Bartholome et al. 2002 et GLOBCOVER, Bicheron et al. 2006). Ces cartes sont utiles pour mieux comprendre, expliquer et prévoir le comportement des écosystèmes continentaux et leur évolution. Pour des études régionales (~ 100 km x 100 km), l'utilisation de ces cartes est délicate, car ces produits sont généralement issus de classification « par pixel », alors que les réflectances enregistrées par les capteurs satellites à basse résolution spatiale résultent des réponses de plusieurs classes « pixel mixte ».

On peut expliquer la formation de pixel mixte dans une image satellite par 1) le champ de prise de vue du capteur satellite; 2) la complexité spatiale, la taille et la forte hétérogénéité des surfaces observées par le capteur (Thomas et al. 2000). Un exemple de pixels mixtes à la résolution de 30 m est présenté dans la Figure I.15, où l'on observe la présence de plusieurs types d'objets de natures différentes. Le traitement des pixels mixtes nécessite le recours à des méthodes de désagrégation.

¹² Global Land Cover Facility

¹³ Global Land Cover

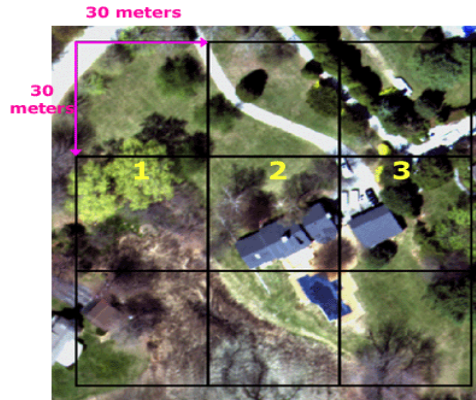


Figure I.15: Photo aérienne superposée à une grille de résolution spatiale de 30 m.

I-4.1.3 Approche linéaire de désagrégation

Plusieurs méthodes ont été proposées depuis une dizaine d'années pour étudier les pixels mixtes sans les assigner à une seule classe. Parmi ces méthodes, l'approche linéaire de désagrégation (Adams et al. 1986; Elmore et al. 2000; Smith et al. 1990) est la plus utilisée (Eq. I.6). Elle suppose que le signal d'un pixel mixte peut être modélisé par une somme pondérée faisant intervenir les signatures pures des classes d'occupation du sol (*i.e.* les signaux que l'on attribue aux objets de cette classe), et la surface que chaque classe occupe dans le pixel. Les signatures pures doivent décrire au mieux les évolutions spectrales ou temporelles typiques des cultures individuelles (Strahler et al. 1986). Dans une approche de désagrégation linéaire où l'on considère que les signatures pures ne varient pas spatialement, le signal moyen est exprimé à la date t par l'équation I.6. Lorsqu'on utilise des séries temporelles de données, cette équation est résolue par un procédé de minimisation d'erreur (Eq. I.7).

$$Y_i(t) = \sum_{j=1}^p \pi_{ij} \times \rho_j(t) + \varepsilon_i(t) \quad (\text{Eq. I.6})$$

$$RMSE_i = \sqrt{\frac{1}{T} \times \sum_{t=1}^T [\varepsilon_i(t)]^2} \quad (\text{Eq. I.7})$$

$Y_i(t)$: signal moyen observé sur le pixel i au temps t ;

- π_{ij} : surface occupée par la classe j dans le pixel i ;
- $\rho_j(t)$: signal attribué à la classe j au temps t ;
- ε_i : terme d'erreur ;
- p : nombre de classes étudiées ;
- T : nombre d'observations ;
- i : indice du pixel ;
- j : indice de la classe.

Trois cas d'application du modèle linéaire sont envisageables:

- **Cas 1**

On recherche les signatures pures $\rho_j(t)$ connaissant la répartition π_{ij} de chacune des classes. Pour chaque pixel, l'équation (Eq. I.6) s'applique et on en déduit une erreur entre le signal mixte et le signal restitué par la combinaison linéaire des signatures $\rho_j(t)$ pondérées par leur pourcentages associés (Eq. I.7). Dans l'hypothèse de stationnarité spatiale, le système d'équation est résolu par une procédure de minimisation de l'erreur moyenne sous la contrainte que les $\rho_j(t)$ soient positifs (Figure I.16).

$$\begin{array}{l}
 \text{Pixel 1 : } Y_1(t) = \sum_{j=1}^p \pi_{1j} \times \rho_j(t) + \varepsilon_1(t) \rightarrow RMSE_1 = \sqrt{\frac{1}{T} \times \sum_{t=1}^T [\varepsilon_1(t)]^2} \\
 \text{Pixel 2 : } Y_2(t) = \sum_{j=1}^p \pi_{2j} \times \rho_j(t) + \varepsilon_2(t) \rightarrow RMSE_2 = \sqrt{\frac{1}{T} \times \sum_{t=1}^T [\varepsilon_2(t)]^2} \\
 \vdots \\
 \text{Pixel N : } Y_N(t) = \sum_{j=1}^p \pi_{Nj} \times \rho_j(t) + \varepsilon_N(t) \rightarrow RMSE_N = \sqrt{\frac{1}{T} \times \sum_{t=1}^T [\varepsilon_N(t)]^2}
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l}
 \text{Détermination des } \rho_j(t) \text{ par} \\
 \text{minimisation de l'erreur moyenne} \\
 \\
 RMSE_m = \frac{\sum_{i=1}^N RMSE_i}{N} \\
 \\
 \text{Sous la contrainte que} \\
 0 \leq \rho_j \leq 1
 \end{array} \right\}$$

N est le nombre de pixels mixtes dans la zone
 T nombre d'observations

Figure I.16: Détermination des signatures pures $\rho_j(t)$ par procédure de minimisation.

- **Cas 2**

On recherche les pourcentages π_{ij} connaissant la dynamique de chaque classe $\rho_j(t)$ en minimisant l'erreur donnée (Eq. I.7) sous les contraintes physiques que les π_{ij} soient positifs et leur somme soit égale à 1. Le succès de l'approche linéaire dépend essentiellement du choix des $\rho_j(t)$ (Cross et al. 1991; Quarmby et al. 1992; Foody and Cox 1994). Ces dynamiques peuvent être identifiées directement à partir d'une librairie de signatures prédéfinies ou à partir de données collectées sur le terrain (Smith et al. 1990; Adams et al. 1995; Roberts et al. 1998). L'utilisation des librairies de signatures n'est pas toujours appropriée car ces signatures sont souvent acquises dans des conditions (effets atmosphériques et conditions d'éclairement) qui diffèrent de celles de l'image à déconvoluer (Song and Woodcock 2003). Les $\rho_j(t)$ peuvent également être dérivés à partir d'une zone d'apprentissage/entraînement (où l'occupation du sol est connue).

- **Cas 3**

Le cas le plus général est celui où l'on recherche à la fois les pourcentages π_{ij} et les dynamiques de chaque classe $\rho_j(t)$. Il existe plusieurs méthodes pour résoudre ce cas (voir la review de Plaza et al. 2004). Ces méthodes n'utilisent aucune information *a priori* sur la nature et l'évolution des $\rho_j(t)$, le seul paramètre connu est le nombre de classes qui peuvent coexister au sein du pixel mixte. Ces méthodes identifient directement les signatures pures $\rho_j(t)$ par des procédures statistiques sur l'image qui sert de base pour appliquer le modèle linéaire (Atkinson et al. 1997; Elmore et al. 2000; Ridd 1995; Wessman et al. 1997). En procédant ainsi, les mêmes conditions géométrique et atmosphérique entre le signal mixte et les signatures pures sont conservées, ce qui réduit les erreurs résultantes des différences de conditions d'acquisitions.

I-4.1.4 Evaluation des résultats d'une classification

L'évaluation des résultats obtenus par classification se fait en général par comparaison à des données de terrain. Parmi les indicateurs statistiques de la performance d'une classification, la matrice de confusion est la plus utilisée (Congalton and Mead 1983; Foody 2002; Stehman 1997). Un exemple de matrice de confusion est donné dans le Tableau I.12. Les lignes de la matrice contiennent l'information sur les classes thématiques issues de la procédure de classification; les colonnes correspondent aux classes thématiques associées aux données collectées sur le terrain. Les cellules de la matrice contiennent un nombre de pixels ou d'unités géographiques élémentaires.

Si l'on prend l'exemple de la cellule d'indice ligne 1 et d'indice colonne 2 « $A_{1,2}$ » dans le Tableau I.12, celle-ci contient le nombre de pixels qui appartiennent en réalité (selon les données de terrain) à la classe 2 et qui se trouvent affectés à la classe 1 par le procédé de classification estimée. Ainsi, les valeurs de la diagonale de la matrice représentent le nombre de pixels correctement classés (en gris dans le Tableau I.12), et la somme des éléments de la diagonale représente le nombre total de pixels correctement classés. Le rapport de ce nombre par rapport au nombre total de pixels de la matrice donne la « précision globale » de la classification.

Les erreurs de classification sont de deux types : omission et commission. Les erreurs d'omission surviennent chaque fois qu'un pixel qui aurait dû être affecté à une classe n'a pas été reconnu. Les erreurs de commission apparaissent quand les pixels associés à une classe sont incorrectement identifiés. Si l'on considère la classe 1 dans le Tableau I.12, l'erreur d'omission est donnée par le nombre de pixels de la classe 1 mal classés ($A_{2,1} + A_{3,1}$), et l'erreur de commission est donnée par le nombre de pixels des autres classes identifiés dans la classe 1 ($A_{1,2} + A_{1,3}$). Ces grandeurs sont généralement exprimées en pourcentage.

Tableau I.12: Exemple de matrice de confusion.

		Echantillons et données de terrain				
		Classe 1	Classe 2	Classe 3	Total	Commission (%)
Classification	Classe 1	$A_{1,1}$	$A_{1,2}$	$A_{1,3}$	$\sum_{j=1}^3 A_{1,j}$	$\frac{A_{1,2} + A_{1,3}}{\sum_{j=1}^3 A_{1,j}} \times 100$
	Classe 2	$A_{2,1}$	$A_{2,2}$	$A_{2,3}$	$\sum_{j=1}^3 A_{2,j}$	$\frac{A_{2,1} + A_{2,3}}{\sum_{j=1}^3 A_{2,j}} \times 100$
	Classe 3	$A_{3,1}$	$A_{3,2}$	$A_{3,3}$	$\sum_{j=1}^3 A_{3,j}$	$\frac{A_{3,1} + A_{3,2}}{\sum_{j=1}^3 A_{3,j}} \times 100$
Total		$\sum_{i=1}^3 A_{i,1}$	$\sum_{i=1}^3 A_{i,2}$	$\sum_{i=1}^3 A_{i,3}$	$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 A_{i,j}$	
Omission (%)		$\frac{A_{2,1} + A_{3,1}}{\sum_{i=1}^3 A_{i,1}} \times 100$	$\frac{A_{1,2} + A_{3,2}}{\sum_{i=1}^3 A_{i,2}} \times 100$	$\frac{A_{1,3} + A_{2,3}}{\sum_{i=1}^3 A_{i,3}} \times 100$		
Précision globale (%)		$\frac{\sum_{i=1}^3 A_{i,i}}{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 A_{i,j}} \times 100$				

I-4.2 Variables biophysiques sol-plante

Le comportement de la végétation dans divers domaines spectraux et surtout dans le domaine solaire est typique. En effet, les feuilles vertes réfléchissent une faible proportion du rayonnement incident dans la bande rouge et une forte proportion dans la bande proche infrarouge (Guyot 1990) (Figure I.17). Le caractère directionnel de la réflectance est également changé selon la proportion de végétation (active et/ou sénescence), et, pour un couvert végétal, selon l'état physiologique, la structure et l'agencement des différents éléments qui le constituent. Les mêmes observations peuvent être effectuées pour le sol dont la fonction bidirectionnelle de réflectance dépend des propriétés de la surface (humidité, rugosité et composition minérale ou organique). Ces considérations sont à la base de nombreuses recherches visant à décrire les surfaces terrestres en terme de variables biophysiques relatives au sol (Baret et al. 1992; Cierniewsk 1989; Jacquemoud et al. 1992; Lobell et al. 2002; Mathieu et al. 1998; Nagler et al. 2000) et de la végétation (Baret and Guyot 1991; Bastiaanssen 2000; Carlson and Ripley 1997; Duchemin et al. 1999; Duchemin et al. 2006; Guérif et al. 2001; Gutman 1999; Hall et al. 1995; Myneni et al. 1997; Scotford and Miller 2005).

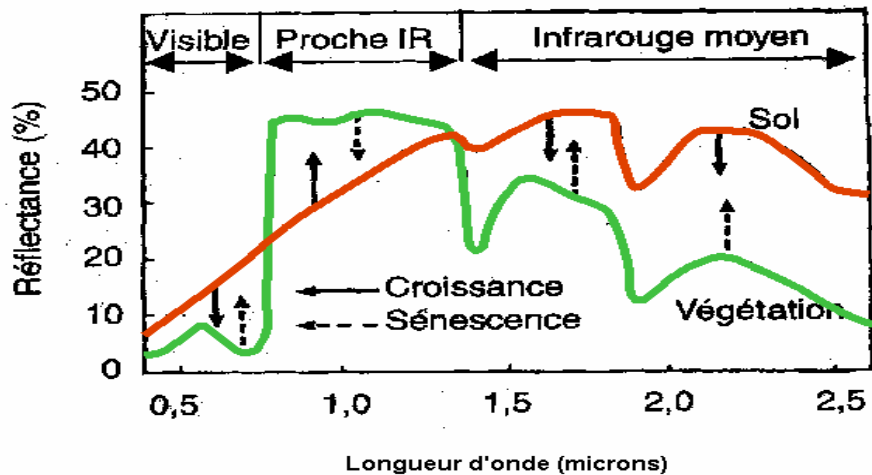


Figure I.17: Représentation schématique du sens de l'évolution de la réflectance d'un couvert végétal au cours de la croissance et de la sénescence (Guyot 1989).

Globalement, on peut distinguer deux types de méthodes visant à estimer ces variables biophysiques : les méthodes d'inversion de modèles de transferts radiatifs (Bicheron and Leroy 1999; Kimes et al. 2000) et les relations semi-empiriques (Asrar et al. 1984; Baret et al. 1989; Richardson 1992; Duchemin et al. 2006). Les premières reposent sur la modélisation des interactions électromagnétiques à l'interface sol-plante-atmosphère. On cherche dans un premier temps à restituer le rayonnement observé dans une ou plusieurs longueurs d'onde et selon certaines configurations géométriques de mesures. Dans un deuxième temps, on vise à diminuer la différence entre observations et simulations en modifiant certains paramètres intervenant dans la modélisation. Ces méthodes sont relativement difficiles à mettre en œuvre car elles nécessitent la connaissance *à priori* de certains paramètres du modèle. Les méthodes des relations semi-empiriques utilisent les caractéristiques spectrales des couverts pour établir des correspondances entre variables biophysiques et observations. On utilise en général des indices de végétation, combinaisons d'observations effectuées dans plusieurs longueurs d'onde, généralement le rouge et le proche infrarouge, pour maximiser le contraste entre sol et végétation (Asrar et al. 1984; Baret et al. 1989; Duchemin et al. 2006; Richardson 1992). L'avantage de ces indices réside en outre dans la minimisation de certains effets indésirables (*e.g.* variation de la configuration géométrique soleil-cible-capteur, effets atmosphériques ou changement de la couleur du sol ou de l'état de surface).

L'indice le plus fréquemment utilisé dans le cadre de la télédétection de la végétation est le *NDVI* (Normalized Difference Vegetation Index, Rouse et al. 1973; Rouse et al. 1974), défini comme le ratio entre la différence des réflectances proche infrarouge et rouge et la somme de ces réflectances (Eq. I.8). Le *NDVI* est très dépendant des propriétés optiques de celles-ci. Pour diminuer l'influence du sol sous-jacent, d'autres indices ont été proposés comme le *SAVI* (Soil Adjusted Vegetation Index, Huete 1988) ou le *TSAVI* (Transformed SAVI, Baret and Guyot 1991). Ces indices nécessitent la connaissance de la « droite » des sols, qui traduit l'augmentation de leur réflectance dans le visible et le proche infrarouge (Figure I.17). Ils ne sont généralement pas délivrés de façon opérationnelle par les centres de traitement des images satellites.

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R} \quad (\text{Eq. I.8})$$

où R : réflectance dans la bande Rouge ;

PIR : réflectance dans la bande du Proche Infrarouge.

I-4.3 Utilisation conjointe de modèle de cultures et de données de télédétection pour l'évaluation du bilan hydrique

I-4.3.1 Modélisation Agro-Météorologique

Un modèle agrométéorologique est un ensemble de relations mathématiques permettant de rendre compte, de façon simplifiée, du fonctionnement et de l'évolution d'une culture donnée (Bonhomme et al. 1995) en fonction de son environnement technique, climatique et pédologique. La modélisation des agro-écosystèmes trouve son origine dans les premiers travaux sur la photosynthèse et la respiration de plantes en conditions optimales de croissance (De Wit et al. 1970; Monteith 1972). Depuis, de nombreux modèles ont été développés, comme en témoignent les études comparatives de (

Jamieson et al. 1998; Olesen et al. 2002; Lipiec et al. 2003; Eitzinger et al. 2004). Pour ces modèles, de même que pour tout autre type de modèle, il est possible de distinguer trois approches pour la représentation des processus (Leenhardt 1991) :

- une approche analogue où les phénomènes sont représentés par d'autres ayant un fonctionnement comparable ;
- une approche empirique reliant les facteurs explicatifs aux variables à expliquer au moyen d'une loi ajustée à des points expérimentaux, la loi n'ayant pas de signification physique ;
- une approche mécaniste qui décrit chaque processus en accord avec les lois physiques et biologiques qui le contrôlent.

Les modèles agronomiques n'ont par ailleurs jamais cessé de se complexifier pour intégrer de plus en plus finement les connaissances sur les processus influant sur le bilan agro-environnemental des cultures. Ils permettent de simuler les effets, combinés ou non, de la phénologie des organes végétatifs et reproductifs (Fenner 1998; Lawless et al. 2005), de la nutrition azotée (Lemaire and Gastal 1997; Limami and Améziane 1997; Olesen et al. 2002), des stress thermique (Porter and Gawith 1999) et hydrique (Jones and Tardieu 1998; Debaeke and Aboudrare 2004), de l'induration des sols (Hamza and Anderson 2005; Sadras et al. 2005), ou encore de l'élévation de la concentration des gaz à effets de serre (Van Oijen et al. 2004). La tendance est également à la mise au point de modèles qui tiennent explicitement compte des pratiques agricoles (Brisson et al. 2003; Boote et al. 1996;).

Ces modèles fonctionnent généralement au pas de temps journalier afin d'étudier un couvert homogène (une parcelle agricole). La principale difficulté pour spatialiser ces modèles réside dans l'existence d'un grand nombre de paramètres et de variables nécessaires à leur mise en œuvre et méconnus à l'échelle régionale (Boote et al. 1996; Faivre et al. 2004; de Wit et al. 2005). Il est par conséquent nécessaire de recourir à des paramétrisations génériques, déterminées *à priori* et constantes pour une région, ce qui limite la précision et la variabilité spatiale des simulations (Wallach et al. 2002). En outre, la spatialisation des modèles de cultures pose le problème de la détermination des variables d'entrées, et en particulier de celles associées à la gestion des exploitations

(calendriers culturaux, irrigation, fertilisation, travail du sol) qui connaissent de fortes variations spatio-temporelles et sont généralement mal connues. A titre d'exemple, l'étude de Mo et al. (2005) repose sur l'hypothèse d'une fertilisation optimale et d'une irrigation uniforme sur une zone d'environ 90000 km²; les auteurs concluent que l'amélioration des prévisions du rendement nécessite l'intégration d'informations concernant les pratiques agricoles plus détaillées dans le temps et l'espace.

Par ailleurs, le nombre de variables biophysiques pouvant être déterminées par télédétection optique (Hall et al. 1995; Guérif et al. 2001; Bastiaanssen and Makin 2003; Courault et al. 2003; Scotford and Miller 2005) reste faible par rapport au nombre de paramètres des modèles de cultures. De plus, les paramètres des modèles ne sont généralement pas totalement indépendants et plusieurs combinaisons peuvent résulter en des simulations acceptables pour une variable observée, alors que les autres variables simulées peuvent varier fortement et de manière incohérente. Il s'agit du problème d'équifinalité particulièrement étudié pour les modèles hydrologiques (Beven et al. 2001; Franks et al. 1997) et mise en évidence par Duchemin et al. (2008) dans le cas d'un modèle de croissance de la végétation. Dans ce contexte, il est parfois préférable de mettre en œuvre des modèles simplifiés, spécifiquement adaptés aux objectifs de l'étude et à la disponibilité des observations. Ces modèles permettent en effet d'obtenir une plus large dynamique spatiale d'un nombre de variables réduit, en comparaison de modèles complexes traitant la zone étudiée d'une manière homogène.

I-4.3.2 Equation du bilan hydrique

Le bilan hydrique est établi pour simuler l'évolution d'un stock d'eau en un lieu et sur une période donnée. Pour une culture, le stock est contenu dans l'horizon du sol qui contient les racines, les apports d'eau sont effectués par précipitation et irrigation, et les pertes sont dues au drainage profond et aux processus d'évapotranspiration (Figure I.18). Le terme de ruissellement peut être entrant (apport d'eau) ou sortant (perte d'eau), et il peut également comprendre un drainage latéral sub-surface (non représenté sur la Figure I.18). Le calcul du bilan hydrique consiste à décrire l'évolution du stock d'eau

disponible dans le sol, c'est-à-dire sa quantité et sa répartition dans les différents horizons de sol. On donne en exemple l'équation du bilan hydrique appliquée au seul horizon racinaire dont la capacité est également appelée réserve utile (Eq. I.9).

La réserve utile est la mesure de la quantité d'eau utilisable par la plante. Elle est fonction de la profondeur de sol occupée par le système racinaire et les propriétés hydriques du sol. Ces dernières peuvent être caractérisées par deux points d'humidité remarquables : (1) la capacité au champ, correspondant à la quantité d'eau retenue par un sol qui, après avoir été détrempé, est drainé naturellement pendant quelques jours ; (2) le point de flétrissement, correspondant à la quantité d'eau minimale en deça de laquelle les racines ne peuvent plus extraire l'eau du sol. La réserve utile unitaire (par couche de sol) est définie par la différence entre la capacité au champ et le point de flétrissement. Ces points d'humidité sont essentiellement fonction de la texture du sol et peuvent être estimés à partir des pourcentages de sable, limon et argile par des fonctions de pédo-transferts (Wosten 1997; Wosten and Tamari 1999).

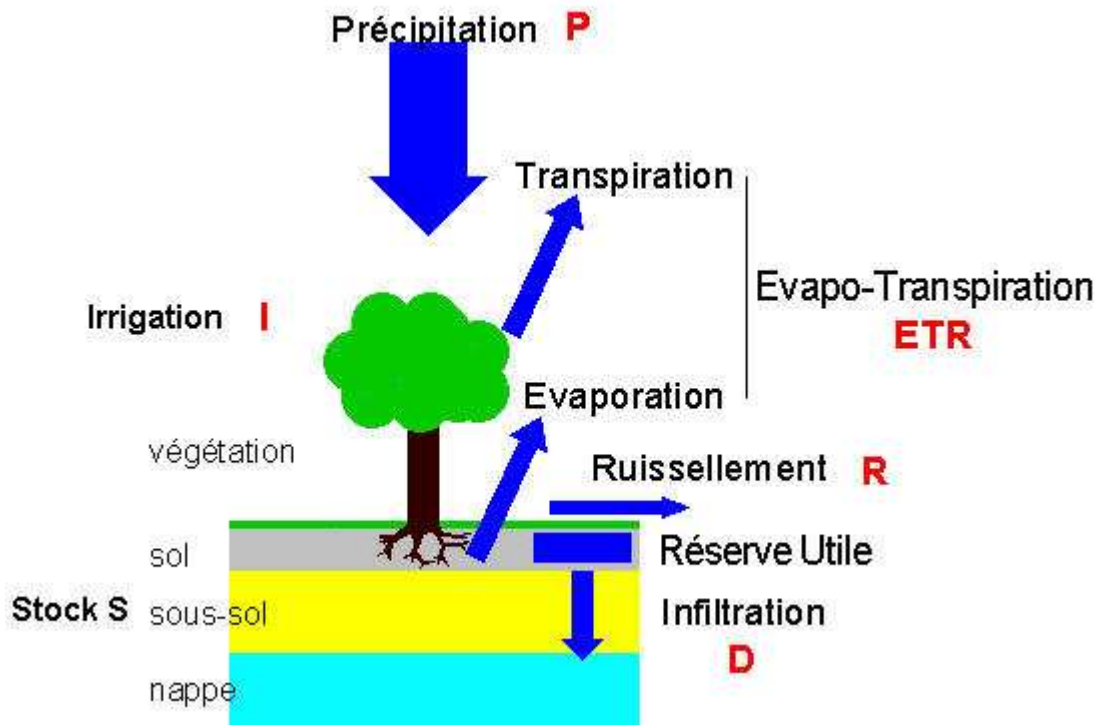


Figure I.18: Bilan hydrique d'une culture.

$$\Delta S = \underbrace{P + I}_{\text{Apport}} - \underbrace{(ETR + R + D)}_{\text{Perte}} \quad (\text{Eq. I.9})$$

Avec

- ΔS : variation de stock en eau du sol en mm;
- P : pluie en mm;
- I : irrigation en mm;
- ETR : évapotranspiration réelle de la culture en mm;
- R : ruissellement en mm;
- D : pertes par infiltration profonde en mm.

Dans l'équation du bilan hydrique, les précipitations peuvent être estimées à partir d'un réseau de stations pluviométriques, de mesures satellitaires (*e.g* PERSIANN¹⁴, Hsu et al. 1997; Hsu et al. 1999) ou des sorties de modèles météorologiques. Le drainage est considéré comme équivalent à l'excès d'eau lorsque la réserve est pleine (débordement du réservoir). D'autre part, en plaine semi-aride, les processus de transferts latéraux (ruissellement et transferts sub-surfaces) sont souvent réduits. Les termes d'évapotranspiration et d'irrigation deviennent ainsi les termes clef de l'équation du bilan hydrique.

I-4.3.3 Calcul de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration correspond à la quantité d'eau totale transférée du sol vers l'atmosphère par évaporation du sol et par transpiration des plantes. Il existe plusieurs méthodes pour le calcul de l'évapotranspiration que l'on peut classer en trois catégories :

- les approches expérimentales telles que la méthode du bilan hydrique (Damagnez 1968; Katerji and Hallaire 1984), la méthode lysimétrique (Ducrocq 1987; Marek et al. 1988) et les méthodes microclimatiques basées sur le bilan

¹⁴ Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks

d'énergie de la surface du couvert végétal (rapport de Bowen, méthode des corrélations turbulentes ou méthodes aérodynamique).

- les approches de modélisation des transferts d'eau et d'énergie entre le sol, la végétation et l'atmosphère (Braud et al. 1995; Sinclair and Seligman 1996; Olioso et al. 1999; Boulet et al. 2000).
- les approches de modélisation simplifiée, fondée sur des paramétrisations des processus d'évaporation et de transpiration selon un principe d'offre (contenu en eau dans le sol) et de demande (pouvoir évaporatif). C'est le cas de l'approche préconisée par la FAO pour le pilotage des irrigations (modèle FAO-56, Allen et al. 1998; Allen 2000), qui a été retenue pour notre étude et dont les grandes lignes sont présentées dans ce qui suit.

Le calcul de l'évapotranspiration selon la méthode de la FAO-56 est fondé sur les concepts d'évapotranspiration de référence (ET_0 , calculée à partir de variables climatiques standard en adaptant l'équation de Penman-Monteith) et de coefficients culturaux (K_c) introduits pour simuler la réponse spécifique de la plante étudiée. Ces concepts ont été introduits afin de séparer la demande climatique de la réponse de la plante. Sont ainsi définis trois termes d'évapotranspiration qui diffèrent selon le type de cultures et leurs conditions agro-environnementales (Figure I.19):

- (1) l'évapotranspiration de référence ET_0 qui traduit le pouvoir évaporant de l'air ;
- (2) l'évapotranspiration en condition standard, qui donne la réponse d'une culture en l'absence de tout stress agro-environnemental.
- (3) l'évapotranspiration réelle, qui tient compte des conditions agronomiques et environnementales dans lequel évolue réellement la culture

L'évapotranspiration de référence ET_0 est définie comme étant « le taux d'évaporation d'une surface étendue de gazon, en croissance active, ayant une hauteur uniforme de 8 à 15 cm, couvrant complètement le sol, et ne souffrant pas de stress hydrique». Cette description est associée à des hypothèses sur les variables biophysiques principales du système : indice de surface foliaire (LAI), résistance extérieure, albedo, hauteur du couvert. Ceci permet de mettre en œuvre une méthode non ambiguë pour calculer l' ET_0 basée selon l'équation de Penman-Monteith adaptée par la FAO (Eq. I.10, d'après Allen

et al, 1998). Cette formule a été retenue comme référence à la suite de nombreuses études visant au calcul ou à la mesure de l'*ETO* (Allen et al. 1998; Kassam and Smith 2001).

$$ETO = \frac{0.408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times \frac{900}{T + 273} \times u_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0.34 \times u_2)} \quad \text{(Eq. I.10)}$$

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];

G : flux conductif [MJ/m²/jour];

Δ : pente de la courbe de la pression de vapeur saturante à la température de l'air [kPa °C⁻¹];

γ : constante psychrométrique [kPa.C⁻¹].

L'évapotranspiration en conditions optimales ET_c (Eq. I.11) correspond à celle d'une culture donnée à un stade donné sous des conditions agronomiques optimales (sol fertile, pas de stress hydrique). Elle est égale au produit de l'*ETO* par le coefficient cultural K_c (Figure I.19). Le coefficient cultural est censé intégrer toutes les différences, d'ordre aérodynamiques (transfert de masse à l'interface sol-plante-atmosphère) et écophysologiques (surface de transpiration).

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad \text{(Eq. I.11)}$$

Le plus souvent, les valeurs de K_c sont déduites expérimentalement pour une région et une culture données. Son évolution dépend en premier lieu du stade de développement de la culture, qui est décrit en 4 phases principales (Figure I.20, à gauche): (1) la phase initiale qui s'étend du semis à environ 10 % de la couverture du sol; (2) la phase de développement du couvert végétal, jusqu'à une couverture du sol maximale ; (3) la mi-saison qui se termine par le début de la sénescence du couvert ; (4) la phase de sénescence du couvert. L'évolution du coefficient cultural K_c dépend également des conditions hydriques dans lesquelles évolue la culture étudiée, en particulier lorsque le couvert est peu couvrant (Figure I.20, à droite). Ceci traduit simplement le fait que l'évaporation du sol est d'autant plus forte que les apports d'eau sont réguliers.

Le calcul de l'évapotranspiration réelle ETR est censé tenir compte des conditions climatiques, agronomiques et environnementales dans lesquelles la culture se développe. Ces conditions reflètent l'état réel de la culture (stress hydrique, état phytosanitaire...) en faisant appel à des coefficients réducteurs K_s dans (Eq. I.12) et la Figure I.19). Dans le cas d'un stress hydrique, le coefficient réducteur sera estimé à partir du contenu en eau du sol.

$$ETR = K_s \cdot K_c \cdot ET_0 \quad \text{(Eq. I.12)}$$

Enfin, signalons que la FAO a proposé deux grandes familles d'algorithmes pour le calcul de l'évapotranspiration. La première (*Single Crop Coefficient*) utilise un seul coefficient cultural qui regroupe l'évaporation du sol et la transpiration des plantes. La deuxième (*Dual Crop Coefficient*) dissocie ces deux phénomènes en leur affectant à chacun un coefficient distinct : K_e coefficient d'évaporation et K_{cb} coefficient de transpiration. Le coefficient K_e dépend en premier lieu de l'humidité de l'horizon supérieur du sol et du taux de couverture par la végétation. Le coefficient K_{cb} est défini comme étant le rapport entre ET_c et ET_0 lorsque la surface du sol est sèche et la culture dans des conditions optimales (absence de stress hydrique). Son évolution temporelle est semblable à celle du coefficient K_c .

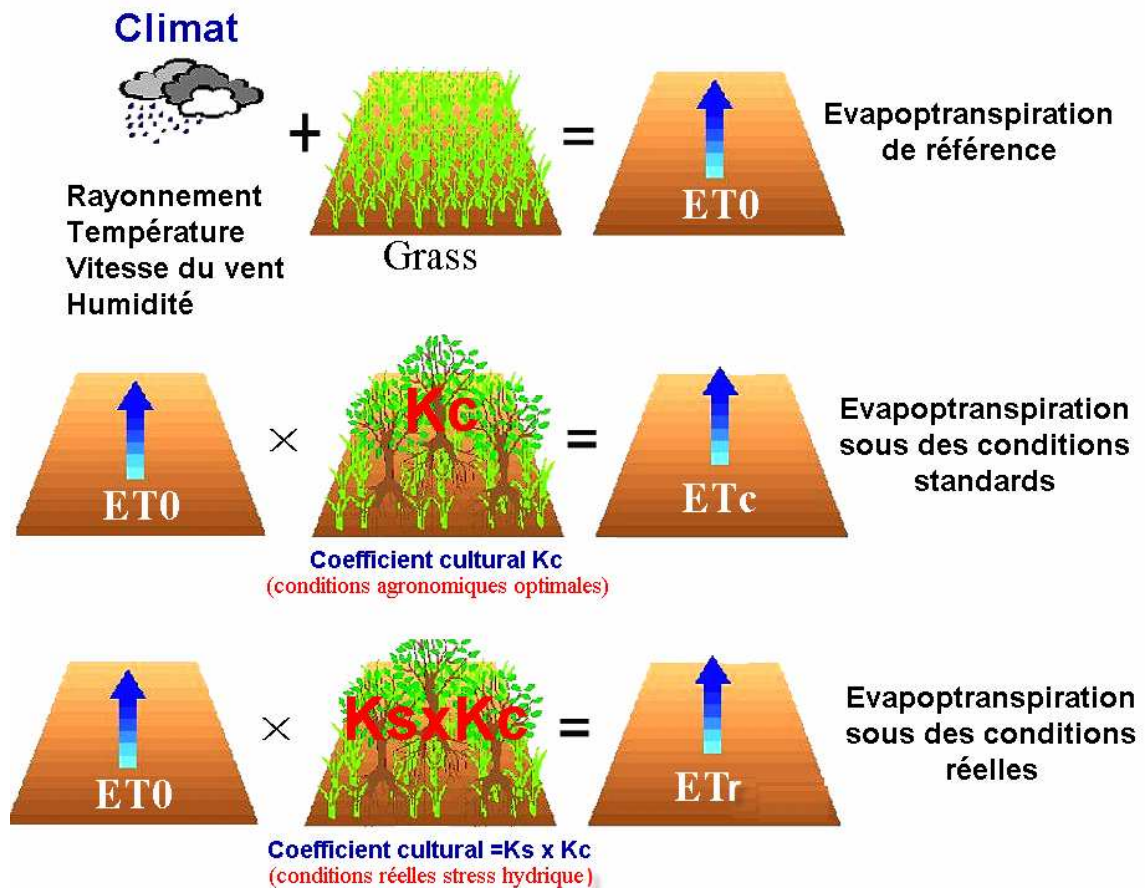


Figure I.19: Les trois types d'évapotranspiration du modèle FAO-56: Evapotranspiration de référence (ET_0), évapotranspiration sous des conditions standard (ET_c) et des conditions réelles (ET_r).

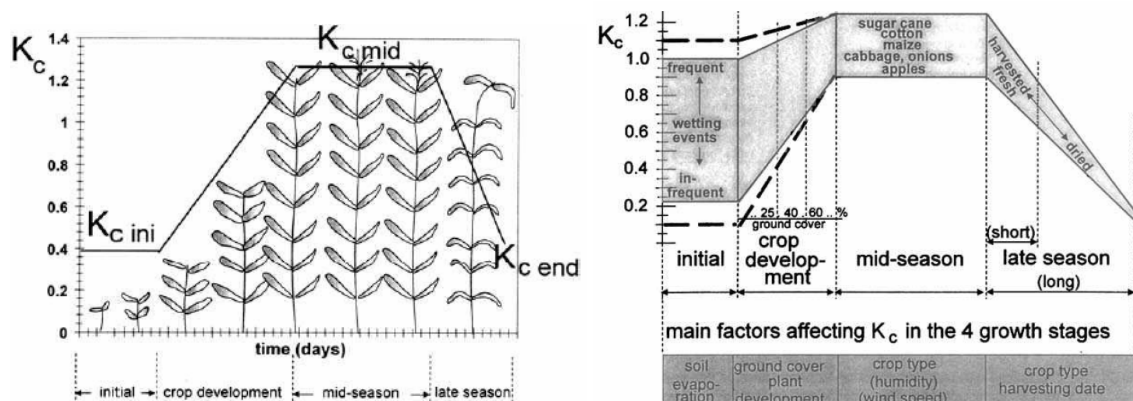


Figure I.20: Evolutions typiques du coefficient culturel (Allen et al. 1998).

I-4.3.4 Télédétection et modélisation

La capacité de décrire les surfaces continentales selon des variables biophysiques est directement utile à la mise en œuvre des modèles sur de larges régions. En particulier, l'état de développement du couvert végétal (indice foliaire) pour être utilisé pour contrôler les simulations réalisées à partir de modèles agro-météorologiques (Clevers et al. 2002; De Wit et al. 2004; Duchemin et al. 2008; Lobell 2003; Mo et al. 2005; Verhoef and Bach 2003). Les procédures de contrôle peuvent être groupées en trois catégories (Moulin et al. 1998):

- Le forçage (Figure I.21), qui consiste à imposer la trajectoire d'une variable simulée par le modèle à partir des données issues de la télédétection. Dans l'exemple de la Figure I.21, les valeurs de l'indice foliaire déduites des images satellites sont substituées à celles simulées par le modèle à chaque fois qu'une observation est disponible ;
- L'étalonnage (Figure I.22) qui a pour but de trouver le jeu de paramètres du modèle qui rapproche le plus possible le comportement du modèle de celui de l'environnement réel modélisé. Le calage repose sur une procédure d'optimisation qui peut contribuer à compenser les imprécisions du modèle et les erreurs associées aux observations ;
- L'assimilation ou « réinitialisation », qui est similaire au calage mais qui possède un aspect temporel. En effet, la variable considérée n'est pas calée sur une mesure de télédétection, mais sur un jeu de données acquises au cours d'une période de plusieurs jours (Moulin et al. 1998).

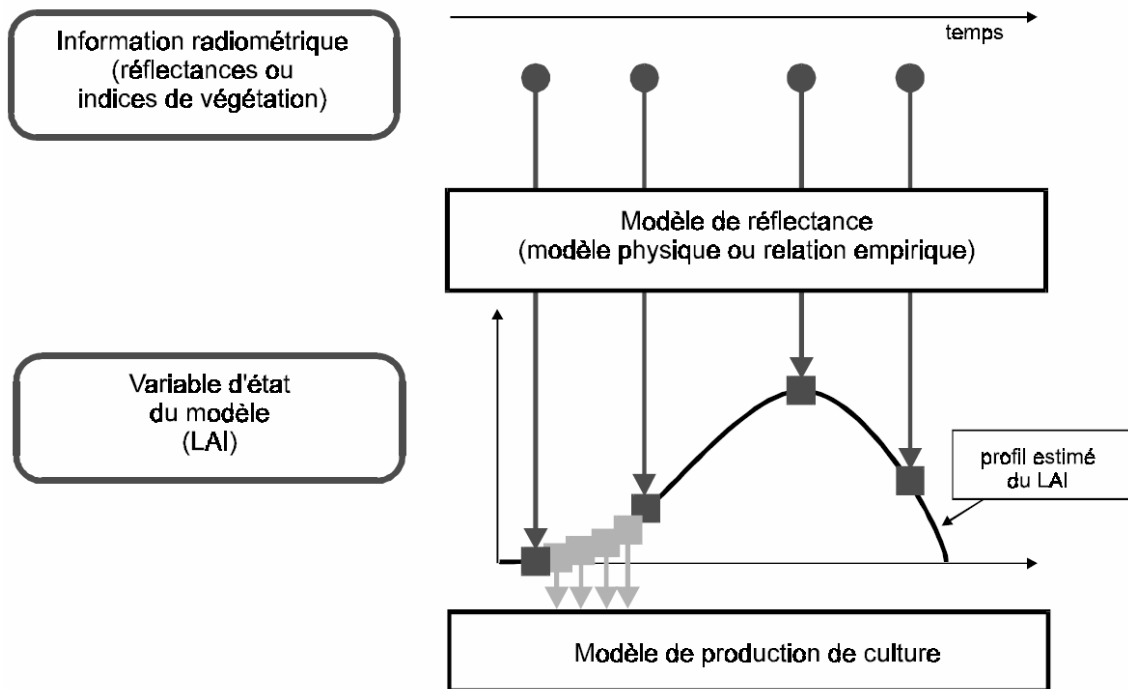


Figure I.21: Schématisation d'une procédure de contrôle d'un modèle de culture: les estimations issues des satellites sont injectés dans le modèle pour contraindre la trajectoire du LAI (Delécolle et al. 1992).

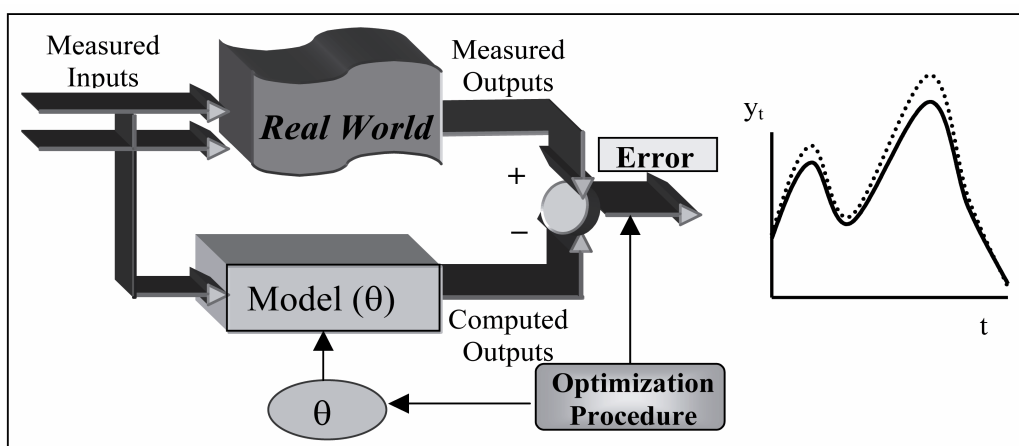


Figure I.22: Procédure d'étalonnage.

Plusieurs études ont montré qu'il existe une similitude entre l'évolution de l'indice de végétation (*NDVI*) au cours du cycle d'une culture et celle du coefficient cultural *K_c* (Heilman et al. 1982; Bausch and Neale 1987; Neale et al. 1989; Jackson and Huete 1991; Bausch 1993; Choudhury et al. 1994; Moran 1995; Gutman 1999; Bastiaanssen et al. 2000; Duchemin et al. 2006; Er-Raki et al. 2007). La corrélation entre coefficient cultural et indices de végétation est meilleure lorsque l'on cherche à estimer le coefficient cultural de transpiration. Plusieurs études précitées ont utilisé la relation entre ces deux paramètres afin d'estimer les besoins en eau des cultures à l'échelle régionale.

I-5 OBJECTIFS DE LA THESE ET DEMARCHE METHODOLOGIQUE

Comme nombre de régions semi-arides, le Tensift, au centre du Maroc, est confronté à une situation de forte pression sur la ressource en eau (démographie croissante, développement socio-économique et extension des périmètres de cultures irriguées). Cette région semi-aride et fortement anthropisée est le site pilote du programme de recherche SudMed (Chehbouni et al. 2008). Pour évaluer le caractère durable de la gestion des ressources hydrique et végétale, il est nécessaire d'appréhender l'ensemble des composantes du cycle de l'eau sur de longues périodes.

Le présent travail s'inscrit dans ce contexte, avec pour objectif de développer des méthodes permettant de quantifier la consommation en eau des agro-écosystèmes de la plaine agricole du Tensift/Al Haouz (environ 3000 km² autour de la ville de Marrakech) à partir de données à basse résolution spatiale. Cet objectif suppose de connaître l'occupation du sol et la dynamique de la végétation, et de mettre en œuvre des modèles agrométéorologiques. Les capteurs à large champ (VEGETATION et MODIS) fournissent des images quasi-quotidiennement, facilement et gratuitement accessibles par internet, à une résolution spatiale kilométrique. Le recours à des méthodes de

désagrégation est donc nécessaire car un pixel « basse résolution » contient généralement différents types de surfaces.

La démarche générale adoptée au cours de ce travail s'appuie sur l'utilisation conjointe de modèles agrométéorologiques et de données de télédétection à haute et basse résolution spatiale (Figure I.23). Les séries d'images à basse résolution spatiale sont utilisées pour étudier l'occupation du sol et la dynamique de la végétation en mettant en œuvre des méthodes de désagrégation. Plus précisément, nous avons testé ces méthodes sur des images MODIS et VEGETATION et sur une saison agricole test (2002-2003), puis nous avons utilisé les séries d'images MODIS pendant six saisons agricoles successives (période 2000-2006). Pour chaque saison, l'information dérivée de ces images a été intégrée dans un schéma de modélisation agrométéorologique de type forçage/étalonnage. L'objectif est de spatialiser les différents termes du bilan hydrique, et, plus particulièrement le terme d'irrigation. Les variables estimées (occupation du sol, évapotranspiration et irrigation) sont évaluées à partir de mesures de terrain, d'une base de données sur l'eau des barrages, et par confrontation à l'information de même nature dérivée des images à haute résolution spatiale. Les séries d'images à haute résolution spatiale et les mesures terrains sont disponibles pour deux saisons agricoles (2002-2003 et 2005-2006). La série 2002-2003 (une dizaine d'images SPOT et Landsat) a été utilisée pour produire une carte d'occupation du sol de référence sur la partie centrale de la région d'étude. La série 2005-2006 (une vingtaine d'images FORMOSAT-2) a permis d'étudier plus finement la partie orientale de la plaine, qui contient les secteurs irrigués dédiés à la culture des céréales (Duchemin et al. 2008). Outre la restitution de l'occupation du sol, elle a été utilisée pour spatialiser à fine résolution les différents termes du bilan hydrique. Cette spatialisation a permis d'affiner l'évaluation du terme d'irrigation, qui reste délicat car trois systèmes d'irrigation coexistent (eau des barrages, des oueds et de la nappe) et que les volumes distribués hors système moderne (barrages et canaux) sont très mal connus.

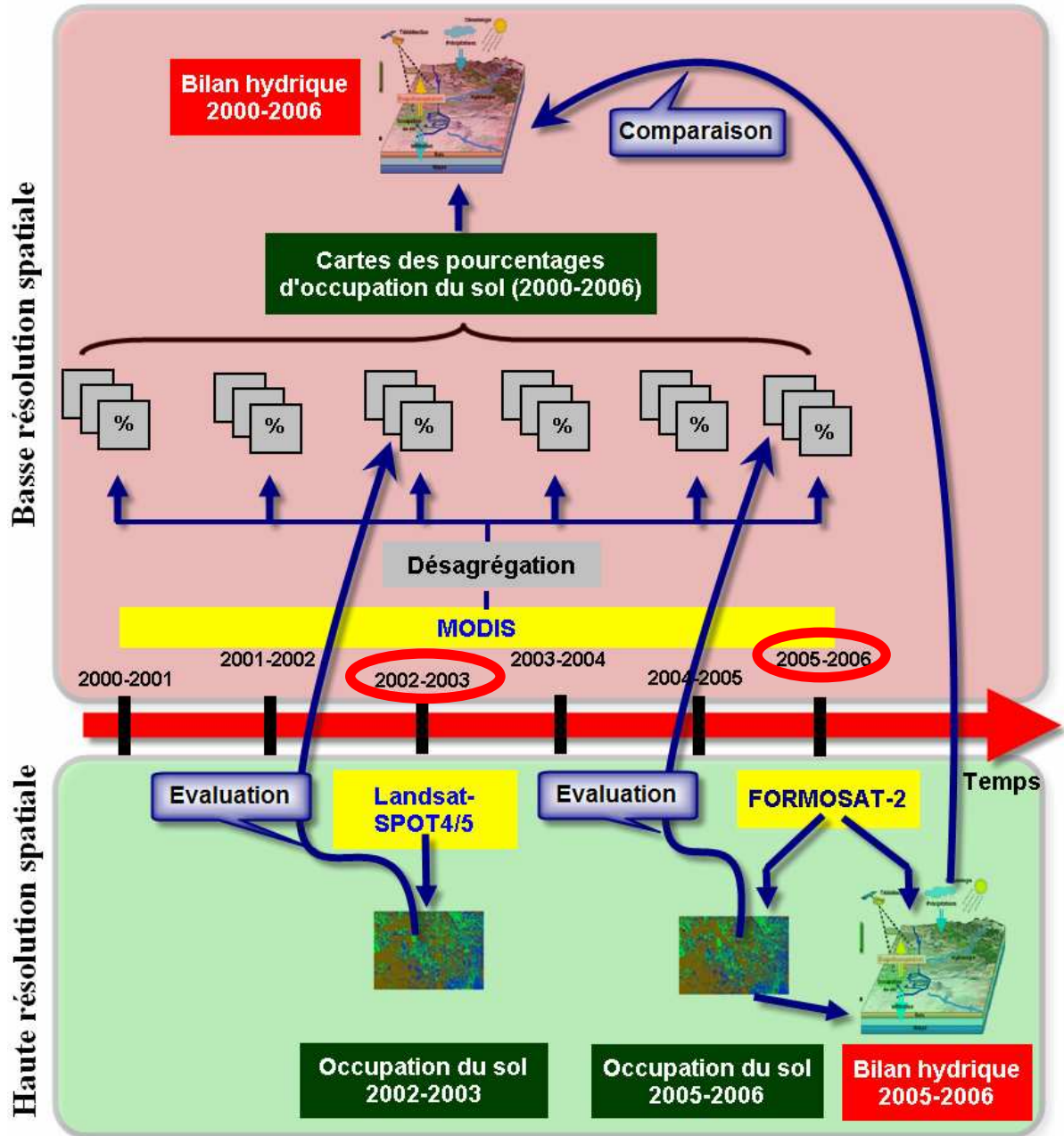


Figure I.23: Démarche méthodologique.

Références

- Adams, J.B., Sabol, D.E., Kapos, V., Almeida, R., Roberts, D.A., Smith, M.O., and Gillespie, A.R. (1995). Classification of Multispectral Images Based on Fractions of Endmembers - Application to Land-Cover Change in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, **52**, pp. 137-154.
- Adams, J.B., Smith, M.O., and Johnson, P.E. (1986). Spectral mixture modelling: A new analysis of rock and soil types at the Viking Lander Site. *Journal of Geophysical Research*, **91**, pp. 8098-8112.
- 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**, pp. 27-41.
- Allen, R.G., Smith, M., Raes, D., and Pereira, L.S. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage. Paper No56. FAO, Rome, Italy*, pp. 300.
- Achard, F., Malingreau, J.P., and Phulpin, T. (1994). A mission for global monitoring of the continental biosphere. VEGETATION International Users Committee Secretariat, Joint Research Center, Institute for Remote Sensing Application. *I-21020 ISPRA (Va), Italy*, <http://www.vegetation.cnes.fr/>.
- Arnaud, M., and Leroy, M. (1991). Spot-4 - a New Generation of Spot Satellites. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **46**, pp. 205-215.
- Aspinall, R., and Justice, C. (2003). A Land Use and Land Cover Change science strategy. In: Summary of a Workshop Organized by the US Climate Change Science Program (CCSP) Land Use Interagency Working Group (LUIWG).
- Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E.T., and Hatfield, J.L. (1984). Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*, **76**, pp. 300-306.
- Atkinson, P.M., Cutler, M.E.J., and Lewis, H. (1997). Mapping sub-pixel proportional land cover with AVHRR imagery. *International Journal of Remote Sensing*, **18**, pp. 917-935.
- Bacour, C. (2001). Contribution à la détermination des paramètres biophysiques des couverts végétaux par inversion de modèles de réflectances: analyses de sensibilité comparatives et configuration optimales, pp. 228, Université Paris 7.
- Baret, F., Guyot, G., and Major, D.J. (1989). Crop biomass evaluation using radiometric measurements. *Photogrammetria*, **43**, pp 241-256.
- Baret, F., Jacquemoud, S., Guyot, G., and Leprieux, C. (1992). Modeled analysis of the biophysical nature of spectral shifts and comparison with information-content of broad bands. *Remote Sensing of Environment*, **41**, pp. 133-142.
- Baret, F., and Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, **35**, pp. 161-173.
- Baret, F., Bartholomé, E., Bicheron, P., Borstlap, G., Bydekerke, L., Combal, B., Derwae, J., Geiger, B., Gontier, E., Grégoire, J., Hagolle, O., Jacobs, T., Leroy, M., Piccard, I., Samain, O., and Roey, T.V. (2006). Manuel de l'utilisateur VGT4Africa (Première édition). <http://www-tem.jrc.it/>, pp. 260.
- Bartholome, E., Belward, A.S., Achard, F., Bartalev, S., Carmona-Moreno, C., Eva, H., Fritz, S., Gregoire, J.M., Mayaux, P., and Stibig, H.J. (2002). GLC 2000 Global Land Cover mapping for the year 2000 Project status November 2002. Joint Research Center, Italy. <http://www-gem.jrc.it/glc2000/>.
- Bastiaanssen, W.G.M. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, **229**, pp. 87-100.
- Bastiaanssen, W.G.M., Molden, D.J., and Makin, I.W. (2000). Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management*, **46**, pp. 137-155.
- Bausch, W.C. (1993). Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sensing of Environment*, **46**, pp. 213-222.
- Bausch, W.C., and Neale, C.M.U. (1987). Crop coefficient derived from reflected canopy radiation: a concept. *Trans ASAE*, **30**, pp. 703-709.
- Berthelot, B., and Dedieu, G. (1997). Correction of atmospheric effects for VEGETATION data. In: *G.a.P. Guyot, T. (Editor), Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Courchevel, France*, pp. 19-25.
- Beven, K., Musy, A., and Higy, C. (2001). Tribune Libre : L'unicité de lieu, d'action et de temps. *Revue des Sciences de l'Eau*, **14**, pp. 525-533.

- Bicheron, P., and Leroy, M. (1999). A method of biophysical parameter retrieval at global scale by inversion of a vegetation reflectance model. *Remote Sensing of Environment*, **67**, pp. 251-266.
- Bicheron, P., Leroy, M., Brockmann, C., Krämer, U., Miras, B., Huc, M., Ninö, F., Defourny, P., Vancutsem, C., Arino, O., Ranéra, F., Petit, D., Amberg, V., Berthelot, B., and Gross, D. (2006). GLOBCOVER : a 300m global land cover product for 2005 using ENVISAT/MERIS time series. In, *Proceedings of the Recent Advances in Quantitative Remote Sensing Symposium*. Valencia, September.
- Boegh, E., Thorsen, M., Butts, M.B., Hansen, S., Christiansen, J.S., Abrahamsen, P., Hasager, C.B., Jensen, N.O., van der Keur, P., and Refsgaard, J.C. (2004). Incorporating remote sensing data in physically based distributed agro-hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, **287**, pp. 279-299.
- Bonhomme, R., Drouet, T., and Améglio, T. (1995). Introduction à la modélisation du fonctionnement physiologique d'un couvert. Ecole des chercheurs INRA. Tome 1: de la plante au couvert végétal. INRA, Actes, Le Croisic, pp. 647-669.
- Bonn, F., and Rochon, G. (1992). Précis de télédétection - Volume 1 - Principes et Méthodes. Universités Francophones, Presses de l'Université du Québec/AUPELF. pp. 485.
- Boote, K.J., Jones, J.W., and Pickering, N.B. (1996). Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal*, **88**, pp. 704-716.
- Boulet, G., Chehbouni, A., Braud, I., Vauclin, M., Haverkamp, R., and Zammit, C. (2000). A simple water and energy balance model designed for regionalization and remote sensing data utilization. *Agricultural and Forest Meteorology*, **105**, pp. 117-132.
- Braud, I., Dantas-Antonino, A.C., Vauclin, M., Thony, J.L., and Ruelle, P. (1995). A simple soil-plant-atmosphere transfer model (SiSPAT) development and field verification. *Journal of Hydrology*, **166**, pp. 213-250.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussiere, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillere, J.P., Henault, C., Maraux, F., Seguin, B., and Sinoquet, H. (2003). An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, **18**, pp. 309-332.
- Burgess, D.W., and Pairman, D. (1997). Bidirectional reflectances in NOAA-AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, **18**, pp. 2815-2825.
- Carlson, T.N., and Ripley, D.A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, **62**, pp. 241-252.
- Chehbouni, A., Escadafal, R., Duchemin, B., Boulet, G., Simonneaux, V., Dedieu, G., Mougenot, B., Khabba, S., Kharrou, H., Maisongrande, P., Merlin, O., Chaponnière, A., Ezzahar, J., Er-Raki, S., Hoedjes, J., Hadria, R., Abourida, A., Cheggour, A., Raibi, F., Boudhar, A., Benhadj, I., Hanich, L., Bankaddour, A., Guemouria, N., Chehbouni, A., Olioso, A., Jacob, F., and Sobrino, J. (2008). An integrated modelling and remote sensing approach for hydrological study in arid and semi-arid regions: the SUDMED Program. *International Journal of Remote Sensing*. *Accepted*.
- Choudhury, B.J., Ahmed, N.U., Idso, S.B., Reginato, R.J., and Daughtry, C.S.T. (1994). Relations between evaporation coefficients and vegetations indexes studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment*, **50**, pp. 1-17.
- Cierniewski, J. (1989). The influence of the viewing geometry of bare soil surfaces on their spectral response in the visible and near infrared. *Remote Sensing of Environment*, **27**, 135-142.
- Cilhar, J., Manak, D., and Voisin, N. (1994). AVHRR bidirectional reflectances effects and compositing. *Remote Sensing of Environment*, **48**, pp. 77-88.
- Clevers, J., Vonder, O.W., Jongschaap, R.E.E., Desprats, J.F., King, C., Prevot, L., and Bruguier, N. (2002). Using SPOT data for calibrating a wheat growth model under mediterranean conditions. *Agronomie*, **22**, pp. 687-694.
- Congalton, R.G., and Mead, R.A. (1983). A quantitative method to test for consistency and correctness in photo interpretation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **49**, pp. 69-74.
- Cross, A.M., Settle, J.J., Drake, N.A., and Paivinen, R.T.M. (1991). Subpixel Measurement of Tropical Forest Cover Using Avhrr Data. *International Journal of Remote Sensing*, **12**, pp. 1119-1129.
- Damagnez, J. (1968). les bilans hydriques et énergétiques et l'étude des facteurs du milieu. . In, *Agroclimatological method proceeding of the Redding Sym*. UNESCO, Paris.
- De Wit, C.T., Brouwer, R., and Penning de Vries, F.W.T. (1970). The simulation of photosynthetic systems. In: Setlik, I. (Ed.), Prediction and measurement of photosynthetic productivity. Proceeding IBP/PP Technical Meeting Trebon 1969. Pudoc, Wageningen, The Netherlands, pp.47-50.

- De Wit, A.J.W., Boogaard, H.L., and Van Diepen, C.A. (2004). Using NOAA–AVHRR estimates of land surface temperature for regional agrometeorological modelling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **5**, pp.187–204.
- De Wit, A.J.W., Boogaard, H.L., and van Diepen, C.A. (2005). Spatial resolution of precipitation and radiation: The effect on regional crop yield forecasts. *Agricultural and Forest Meteorology*, **135**, pp. 156-168.
- Debaeke, P., and Aboudrare, A. (2004). Adaptation of crop management to water-limited environments. *European Journal of Agronomy*, **21**, pp. 433-446.
- Delécolle, R., Maas, S.J., Guerif, M., and Baret, F. (1992). Remote-Sensing and Crop Production Models - Present Trends. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **47**, pp.145-161.
- Duchemin, B., Guyon, D., and Lagouarde, J.P. (1999). Potential and limits of NOAA-AVHRR temporal composite data for phenology and water stress monitoring of temperate forest ecosystems. *International Journal of Remote Sensing*, **20**, pp. 895-917.
- Duchemin, B., Hadria, R., Erraki, S., Boulet, G., Maisongrande, P., Chehbouni, A., Escadafal, R., Ezzahar, J., Hoedjes, J.C.B., Kharrou, M.H., Khabba, S., Mougnot, B., Olioso, A., Rodriguez, J.C., and Simonneaux, V. (2006). Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management*, **79**, pp. 1-27.
- Duchemin, B., Maisongrande, P., Boulet, G., and Benhadj, I. (2008). A simple algorithm for yield estimates: Evaluation for semi-arid irrigated winter wheat monitored with green leaf area index. *Environmental Modelling and Software*, **23**, pp. 876-892.
- Ducrocq, M. (1987). Les bases de l'irrigation. Editions scientifiques universitaires, Mkalles-Mar Roukoz , BP 1514-Beyrouth (Liban).
- Eitzinger, J., Trnka, M., Hosch, J., Zalud, Z., and Dubrovsky, M. (2004). Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. *Ecological Modelling*, **171**, pp. 223-246.
- Elmore, A.J., Mustrand, J.F., Manning, S., and Lobell, D.B. (2000). Quantifying vegetation change in semiarid environments: Precision and accuracy of spectral mixture analysis and the Normalized Difference Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*, **73**, pp. 87-102.
- Er-Raki, S., Chehbouni, A., Guemouria, N., Duchemin, B., Ezzahar, J., and 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**, pp. 41-54.
- Faivre, R., Leenhardt, D., Voltz, M., Benoit, M., Papy, F., Dedieu, G., and Wallach, D. (2004). Spatialising crop models. *Agronomie*, **24**, pp. 205-217.
- Fenner, M. (1998). The phenology of growth and reproduction in plants. In *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*. Ed. Gustav Fischer Verlag, 1998. Vol. 1/1, pp. 78–91.
- Foody, G.M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, **80**, pp.185-201.
- Foody, G.M., and Cox, D.P. (1994). Sub-pixel land cover composition estimation using a linear mixture model and fuzzy membership functions. *International Journal of Remote Sensing*, **15**, pp. 619-631.
- Franks, S.W., Beven, K.J., Quinn, P.F., and Wright, I.R. (1997). On the sensitivity of soil-vegetation-atmosphere transfer (SVAT) schemes: Equifinality and the problem of robust calibration. *Agricultural and Forest Meteorology*, **86**, pp. 63-75.
- Garrigues, S. (2004). Hétérogénéité Spatiale des surfaces Terrestres en Télédétection: Caractérisation et Influence sur l'estimation des variables biophysiques.). Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, pp. 362..
- Girard, C.M., and Girard, M.C. (1999). Traitement des données de télédétection. Edition DUNOD Paris, ISBN 2 10 004185 1, pp. 527.
- Guérif, M.F., Baret, F., Moulin, S., and Bégué, A. (2001). Télédétection, hétérogénéité parcellaire et gestion spatialisée des interventions techniques. In : *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*. Collection Repères, édition CIRAD-INRA, pp. 303-326.
- Gutman, G.G. (1999). On the use of long-term global data of land reflectances and vegetation indices derived from the advanced very high resolution radiometer. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, **104**, pp. 6241-6255.
- Guyot, G. (1989). Les signatures spectrales des surfaces naturelles, *Paradigme*, Caen, pp. 178..
- Guyot, G. (1990). Optical properties of vegetation canopies, Applications of Remote Sensing in Agriculture. *Butterworths, London*, pp. 19-43.

- Hall, F.G., Townshend, J.R., and Engman, E.T. (1995). Status of Remote-Sensing Algorithms for Estimation of Land-Surface State Parameters. *Remote Sensing of Environment*, **51**, pp.138-156.
- Hamza, M.A., and Anderson, W.K. (2005). Soil compaction in cropping systems - A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, **82**, pp. 121-145.
- Heilman, J.L., Heilman, W.E., and Moore, D.G. (1982). Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agronomy Journal*, **74**, pp. 967-971.
- Holben, B.N. (1986). Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, **7**, pp.1417-1434.
- Hsu, K.L., Gao, X.G., Sorooshian, S., and Gupta, H.V. (1997). Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks. *Journal of Applied Meteorology*, **36**, pp. 1176-1190.
- Hsu, K.L., Gupta, H.V., Gao, X.G., and Sorooshian, S. (1999). Estimation of physical variables from multichannel remotely sensed imagery using a neural network: Application to rainfall estimation. *Water Resources Research*, **35**, pp. 1605-1618.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., and Ferreira, L.G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, **83**, pp. 195-213.
- Huete, A., Justice, C., and Leeuwen, W.V. (1999). MODIS Vegetation Index (MOD 13): Algorithm Theoretical Basis Document (version 3), (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>), pp. 120.
- Huete, A.R. (1988). A soil-adjusted vegetation index(SAVI). *Remote Sensing of Environment*, **25**, pp. 295-309.
- Jackson R.D., Reginato R.J., and Idso S.B. (1977). Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*, **13**, pp. 651-656.
- Jackson, R.D., and Huete, A.R. (1991). Interpreting Vegetation Indexes. *Preventive Veterinary Medicine*, **11**, pp.185-200.
- Jacquemoud, S., Baret, F., and Hanocq, J.F. (1992). Modeling spectral and bidirectional soil reflectance. *Remote Sensing of Environment*, **41**, pp. 123-132.
- Jamieson, P.D., Porter, J.R., Goudriaan, J., Ritchie, J.T., van Keulen, H., and Stol, W. (1998). A comparison of the models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat, Sirius, SUCROS2 and SWHEAT with measurements from wheat grown under drought. *Field Crops Research*, **55**, pp. 23-44.
- Jones, H.G., and Tardieu, F. (1998). Modelling water relations of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae*, **74**, pp. 21-46.
- Justice, C., and Townshend, J. (2002). Special issue on the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): a new generation of land surface monitoring. *Remote Sensing of Environment*, **83**, pp. 1-2.
- Justice, C., Townshend, J.R.G., and Salomonson, V. (1998). The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **36**, pp. 1228-1249.
- Justice, C.O., Townshend, J.R.G., and Markham, B.L. (1987). Modis Spatial-Resolution Study. *International Journal of Remote Sensing*, **8**, pp. 1119-1121.
- Kassam, A., and Smith, M. (2001). FAO Methodologies on Crop Water Use and Crop Water Productivity. *Expert Meeting on Crop Water Productivity ROME*, 3 To 5 December 2001. PAPER NO CWP-M0.
- 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.
- Kimes, D.S., Holben, B.N., Tucker, C.J., and Newcomb, W.W. (1984). Optimal Directional View Angles for Remote-Sensing Missions. *International Journal of Remote Sensing*, **5**, pp. 887-908.
- Kimes, D.S., Nelson, R.F., and Fifer, S.T. (2000). Predicting ecologically important vegetation variables from remotely sensed optical/radar data using neuronal networks. *Artificial Neuronal Networks*, pp. 31-44.
- Lawless, C., Semenov, M.A., and Jamieson, P.D. (2005). A wheat canopy model linking leaf area and phenology. *European Journal of Agronomy*, **22**, pp. 19-32.
- Leenhardt, D. (1991). Spatialisation du bilan hydrique: propagation des erreurs d'estimation des caractéristiques du sol au travers des modèles de bilan hydrique. Cas du blé d'hiver. pp. 125. Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier.
- Lefsky, M.A., and Cohen, W.B. (2003). Selection of remotely sensed data. *Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and Case Studies*, pp.13-44.

- Lemaire, G., and Gastal, F. (1997). N uptake and distribution in plant canopies. In: Diagnosis of the nitrogen status in crops, G Lemaire ed., Springer-Verlag, pp. 3-44.
- Lepers, E., Lambin, E.F., Janetos, A.C., DeFries, R., Achard, F., Ramankutty, N., and Scholes, R.J. (2005). A synthesis of information on rapid land-cover change for the period 1981–2000. *BioScience*, **55**, pp. 115–124.
- Li, Z.Q., Cihlar, J., Zheng, X.N., Moreau, L., and Ly, H. (1996). The bidirectional effects of AVHRR measurements over boreal regions. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **34**, pp. 1308-1322.
- Limami, A., and Améziane, R. (1997). Nutrition azotée (NO₃) et distribution du carbone dans la plante. In assimilation de l'azote chez les plantes : aspects physiologique, biochimique et moléculaire. Jean François Morot-Gaudry, INRA éditions, Paris 1997. ISBN 2-7380-0716-3.
- Lipiec, J., Arvidsson, J., and Murer, E. (2003). Review of modelling crop growth, movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction. *Soil and Tillage Research*, **73**, pp. 15-29.
- Lobell, D.B., G.P. Asner, J. I. Ortiz-Monasterio, T.L. Benning (2003). Remote sensing of regional crop production in the Yaqui Valley, Mexico: estimates and uncertainties. *Agriculture Ecosystems and Environment*, **94**, pp. 205-220.
- Lobell, D.B., Ortiz-Monasterio, J.I., Addams, C.L., and Asner, G.P. (2002). Soil, climate, and management impacts on regional wheat productivity in Mexico from remote sensing. *Agricultural and Forest Meteorology*, **114**, pp. 31-43.
- Lu, D., and Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, **28**, 823-870.
- Maisongrande, P., Duchemin, B., and Dedieu, G. (2004). VEGETATION/SPOT: an operational mission for the Earth monitoring; presentation of new standard products. *International Journal of Remote Sensing*, **25**, pp. 9-14.
- Malézieux, E.G., and Trébouil, M.J. (2001). Modéliser les agroécosystèmes. In : *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*. Collection Repères, édition CIRAD-INRA, pp. 17-33.
- Marek, T.H., Schneider, A.D., Howell, T.A., and Ebeling, L.L. (1988). Design and Construction of Large Weighing Monolithic Lysimeters. *Transactions of the Asae*, **31**, pp. 477-484.
- Mathieu, R., Pouget, M., Cervelle, B., and Escadafal, R. (1998). Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typic soil color of an arid environment. *Remote Sensing of Environment*, **66**, pp. 17-28.
- Mo, X., Liu, S., Lin, Z., Xu, Y., Xiang, Y., and McVicar, T.R. (2005). Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain. *Ecological Modelling*, **183**, pp. 301-322.
- Monteith, J.L. (1972). Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, **9**, pp. 747-766.
- Moran, M.S., R.D. Jackson, T.R. Clarke, J. Qi, F. Cabot, K.J. Thome, B.L. Markham (1995). Reflectance factor retrieval from Landsat TM and SPOT HRV data for bright and dark targets. *Remote Sensing Environment*, **52**, pp. 218-230.
- Moulin, S. (1995). Assimilation d'observations satellitaires courtes longueurs d'onde dans un modèle de fonctionnement de culture. Thèse de l'Université Paul Sabatier (Toulouse), pp. 235.
- Moulin, S., Bondeau, A., and Delecolle, R. (1998). Combining agricultural crop models and satellite observations: from field to regional scales. *International Journal of Remote Sensing*, **19**, pp. 1021-1036.
- Myneni, R.B., Keeling, C.D., Tucker, C.J., Asrar, G., and Nemani, R.R. (1997). Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, **386**, pp. 698-702.
- Nagler, P.L., Daughtry, C.S.T., and Goward, S.N. (2000). Plant litter and soil reflectance. *Remote Sensing of Environment*, **71**, pp. 207-215.
- Neale, C.M.U., Bausch, W.C., and Heerman, D.F. (1989). Development of reflectance-based crop coefficients for corn. *Trans. ASAE*, **32**, pp. 1891–1899.
- Olesen, J.E., Pertesen, B.M., Bernsten, J., Hansen, S., Jamieson, P.D., and Thomsen, A.G. (2002). Comparison of methods for simulation effects of nitrogen on green area index and dry matter growth in winter wheat. *European Journal of Agronomy*, **16**, pp. 279-294.
- Oliosio, 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**, pp. 341-356.
- Olthof, I., and Fraser, R.H. (2007). Mapping northern land cover fractions using Landsat ETM+. *Remote Sensing of Environment*, **107**, pp. 496-509.

- Phinn, S.R. (1998). A Framework for Selecting Appropriate Remotely Sensed Data Dimensions For Environmental Monitoring and Management. *International Journal of Remote Sensing*, **19**, pp. 3457-3463.
- Plaza, A., Martinez, P., Perez, R., and Plaza, J. (2004). A quantitative and comparative analysis of endmember extraction algorithms from hyperspectral data. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **42**, pp. 650-663.
- Porter, J.R., and Gawith, M. (1999). Temperatures and the growth and development of wheat: a review. *European Journal of Agronomy*, **10**, pp. 23-36.
- Prenzel, B. (2004). Remote sensing-based quantification of land-cover and land-use change for planning. *Progress in Planning*, **61**, pp. 281-299.
- Quarmby, N.A., Townsend, J.R.G., and Settle, J.J. (1992). Linear mixture modelling applied to AVHRR data for crop area estimation. *International Journal of Remote Sensing*, **13**, pp. 415-425.
- Quattrochi, D., and Goodchild, M. (1997). Scale in Remote Sensing and GIS *CRC Press, Lewis Publishers, New York*.
- Rahman, H., and Dedieu, G. (1994). SMAC: A Simplified Method for the Atmospheric Correction of Satellite Measurements in the Solar Spectrum. *International Journal of Remote Sensing*, **15**, pp. 123-143.
- Richards, J.A. (1999). Remote Sensing Digital Image Analysis. In, *Springer-Verlag* (pp. 240). Berlin, Germany.
- Richardson, A.J., C.L. Wiegand, D.F. Wanjura, D. Dusek and J.L. Steiner (1992). Multisite analyses of spectral-biophysical data for sorghum. *Remote Sensing of Environment*, **41**, pp. 71-82.
- Ridd, M.K. (1995). Exploring a V-I-S (Vegetation-Impervious Surface-Soil) Model for Urban Ecosystem Analysis through Remote-Sensing - Comparative Anatomy for Cities. *International Journal of Remote Sensing*, **16**, pp. 2165-2185.
- Roberts, D.A., Gardner, M., Church, R., Ustin, S., Scheer, G., and Green, R.O. (1998). Mapping chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models. *Remote Sensing of Environment*, **65**, pp. 267-279.
- Rogan, J., and Chen, D.M. (2004). Remote sensing technology for mapping and monitoring land-cover and land-use change. *Progress in Planning*, **61**, pp. 301-325.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., and Deering, D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In : *3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, pp. 309-317.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., and Harlan, J.C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. *NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, Md.*, pp. 371..
- Running, S.W., Justice, C.O., Salomonson, V., Hall, D., Barker, J., Kaufmann, Y.J., Strahler, A.H., Huete, A.R., Muller, J.P., Vanderbilt, V., Wan, Z.M., Teillet, P., and Carneggie, D. (1994). Terrestrial Remote-Sensing Science and Algorithms Planned for Eos Modis. *International Journal of Remote Sensing*, **15**, pp. 3587-3620.
- Sadras, V.O., O'Leary, G.J., and Roget, D.K. (2005). Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Research*, **91**, pp. 131-148.
- Saint, G. (1994). VEGETATION onboard SPOT-4: mission specifications version 3. VGT/PS/940518/1 document (pp. 39.) available at <http://vegetation.cnes/fr/> and at the VEGETATION International Users Committee Secretariat at Joint Research Centre (Ispra, Italy), e-mail: iuc.vegetation@cen.jrc.it.
- Scotford, I.M., and Miller, P.C.H. (2005). Applications of spectral reflectance techniques in Northern European cereal production: A review. *Biosystems Engineering*, **90**, pp. 235-250.
- Simonneaux, V., Duchemin, B., Helson, D., Er-Raki, S., Olivoso, A., and Chehbouni, A.G. (2008). The use of high-resolution image time series for crop classification and evapotranspiration estimate over an irrigated area in central Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, **29**, pp. 95-116.
- Sinclair, T.R., and Seligman, N.G. (1996). Crop modeling: From infancy to maturity. *Agronomy Journal*, **88**, pp. 698-704.
- Smith, M.O., Ustin, S.L., Adams, J.B., and Gillespie, A.R. (1990). Vegetation in Deserts .1. a Regional Measure of Abundance from Multispectral Images. *Remote Sensing of Environment*, **31**, pp. 1-26.
- Song, C.H., and Woodcock, C.E. (2003). Monitoring forest succession with multitemporal Landsat images: Factors of uncertainty. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41**, pp. 2557-2567.
- Stehman, S.V. (1997). Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment*, **62**, pp. 77-89.

- Strahler, A.H., Woodcock, C.E., and Smith, J.A. (1986). On the Nature of Models in Remote-Sensing. *Remote Sensing of Environment*, **20**, pp. 121-139.
- Tarpley, J.P., Schneider, S.R., and Money, R.L. (1984). Global vegetation indices from NOAA-7 meteorological satellite. *Journal of Climate Applied Meteorology*, **23**, pp. 491-494.
- Thomas, M., Lillesand, and Ralph, W.K. (2000). Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley and Sons, New York, Chichester, Singapore, fourth edition, 2000.
- Van Oijen, M., Dreccer, M.F., Firsching, K.H., and Schnieders, B. (2004). Simple equations for dynamic models of the effects of CO₂ and O₃ on light-use efficiency and growth of crops. *Ecological Modelling*, **179**, pp. 39-60.
- Verhoef, W., and Bach, H. (2003). Remote sensing data assimilation using coupled radiative transfer models. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, **28**, pp. 3-13.
- Vermote, E.F., El Saleous, N.Z., and Justice, C.O. (2002). Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results. *Remote Sensing of Environment*, **83**, pp. 97-111.
- Wallach, D., Goffinet, B., Bergez, J.E., Debaeke, P., Leenhardt, D., and Aubertot, J.N. (2002). The effect of parameter uncertainty on a model with adjusted parameters. *Agronomie*, **22**, pp. 159-170.
- Wessman, C.A., Bateson, C.A., and Benning, T.L. (1997). Detecting fire and grazing patterns in tallgrass prairie using spectral mixture analysis. *Ecological Applications*, **7**, pp. 493-511.
- Wosten, J.H.M. (1997). Pedotransfer functions to evaluate soil quality. *n: Soil quality for crop production and ecosystem health. E.G. Gregorich and M.R. Carter, Elsevier eds*, pp. 221-245.
- Wosten, J.H.M., and Tamari, S. (1999). Application of artificial neural networks for developing pedotransfer functions of soil hydraulic parameters. *Assessment of Non-Point Source Pollution in the Vadose Zone*, **108**, pp. 235-241.
- Xiong, X.X., Che, N.Z., and Barnes, W. (2005). Terra MODIS on-orbit spatial characterization and performance. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **43**, pp. 355-365.

**CHAPITRE II. Région d'étude,
données expérimentales et satellitaires**

CHAPITRE II. REGION D'ETUDE, DONNEES EXPERIMENTALES ET SATELLITAIRES..... 79

II-1	Caractéristiques hydro-climatiques du bassin du Tensift.....	84
II-2	La plaine du Tensift	88
II-2.1	Présentation générale	88
II-2.2	L'agriculture	90
II-2.3	L'irrigation.....	93
II-2.4	Principaux secteurs irrigués (réseau ORMVAH/ABHT).....	94
II-2.5	Périmètre irrigué test (R3).....	96
II-3	Données expérimentales	99
II-3.1	Précipitations.....	100
II-3.1.1	Qualité des données.....	101
II-3.1.2	Spatialisation.....	104
II-3.2	Evapotranspiration de référence ETO.....	110
II-3.2.1	Le réseau de stations climatiques.....	110
II-3.2.2	Les sorties du modèle météorologique.....	113
II-3.2.3	Spatialisation de l'ETO.....	114
II-3.3	Cartes pédologiques	118
II-3.4	Relevé de l'occupation du sol.....	120
II-3.5	Variables biophysiques sol-plante et flux d'évapotranspiration.....	124
II-3.6	Données d'irrigation.....	127
II-4	Données satellites	131
II-4.1	Segmentation de la série temporelle des images FORMOSAT-2 de NDVI.....	137
II-4.2	Superposition entre données haute et basse résolution.....	138
II-4.3	Comparaison des NDVI moyens entre les données haute et basse résolution.....	140

Ce chapitre s'articule en deux parties.

La première partie (sous-chapitres 1 et 2) est consacrée à la description de la région d'étude selon 3 niveaux spatiaux de description:

- (1) Les caractéristiques hydro-climatiques du bassin versant de l'oued Tensift, région pilote du projet franco-marocain SudMed (Chehbouni et al. 2008), sont décrites;
- (2) Ce bassin inclut la plaine du Tensift, partie orientale « hydrologiquement active » où est concentrée la majorité des secteurs irrigués gérés par l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Haouz (ORMVAH) ;
- (3) Parmi ces secteurs irrigués, on distingue le secteur R3, situé à 40 km à l'Est de Marrakech. Ce périmètre, qui a été intensivement étudié durant le projet SudMed, constitue un site privilégié pour l'évaluation quantitative des résultats obtenus.

Dans une deuxième partie (sous-chapitres 3 et 4), on présente les différents jeux de données expérimentales et satellitaires qui ont été collectés et utilisés au cours de ce travail de thèse. Les données climatiques et les cartes pédologiques sont utiles à la mise en œuvre des modèles agrométéorologiques. D'autres données servent à évaluer les résultats de nos recherches : relevés d'occupation du sol, variables biophysiques (humidité, indice foliaire et flux d'évapotranspiration), volumes d'irrigation sur les principaux secteurs irrigués de la région. Enfin, nous détaillons les séries d'images satellitaires, et les prétraitements associés. Les séries d'images à haute résolution spatiale (série Landsat/SPOT et FORMOSAT) ont permis de produire des cartes d'occupation du sol de référence pour deux saisons agricoles en 2002-2003 et 2005-2006, et, pour cette dernière année, de spatialiser le bilan hydrique sur le secteur irrigué test « R3 ». Les méthodes de désagrégation des données à basse résolution ont été appliquées à MODIS et VEGETATION pour une année test (2002-2003), à des fins de comparaison. L'étude complète sur la plaine du Tensift (saisons agricoles 2000-2001 à 2005-2006) a été réalisée à partir de données MODIS.

II-1 CARACTERISTIQUES HYDRO-CLIMATIQUES DU BASSIN DU TENSIFT

Le bassin versant du Tensift est situé dans la région de Marrakech au Maroc (Figure II.1). Ce bassin, d'une superficie de 20450 km², est très fortement anthropisé jusque dans les hautes vallées. L'économie dans le bassin est essentiellement fondée sur l'agriculture et l'élevage qui concerne plus de la moitié de la population active. La céréaliculture (blé essentiellement) et l'arboriculture (agrumes et oliviers principalement) prédominent. L'irrigation représente 85 % de la consommation d'eau dans cette région. Les activités industrielles et minières, le tourisme et l'artisanat occupent également une part importante de la population active.

Le climat du bassin versant est de type continental semi-aride sur la majorité du bassin, avec des spécificités sur la frange côtière (influencée par le courant froid des Canaries) et la chaîne montagneuse du Haut-Atlas au sud, où la majorité des précipitations est concentrée. Les précipitations sont globalement faibles avec une forte variabilité spatio-temporelle. La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 250 mm à Marrakech et peut dépasser 600 mm dans l'Atlas (Figure II.2).

Les oueds les plus importants prennent tous naissance dans le Haut Atlas. Sur ce relief montagneux à structures géologiques hétérogènes, des ruissellements à caractère torrentiel interviennent et sont collectés par le réseau hydrographique du Tensift qui les évacue vers l'océan. Ce bassin peut être divisé en deux grandes zones (Figure II.3):

- La zone du cours amont du Tensift et ses affluents de la rive gauche (d'ouest en est : N'Fis, Rheraya, Issil, Ourika, Zat et R'dat), qui constituent la partie hydrologique active du bassin. Elle s'étend sur une superficie d'environ 12000 km²;
- La zone du bas Tensift qui englobe le cours aval de l'oued Tensift et le bassin de l'oued « Chichaoua ». Elle s'étend sur une superficie d'environ 8000 km² (Figure II.3).

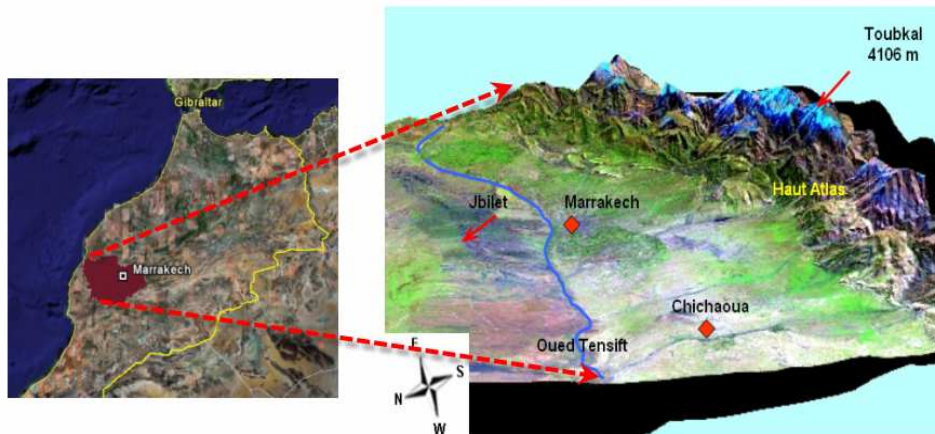


Figure II.1: Localisation et vue d'ensemble du bassin du Tensift au Maroc.

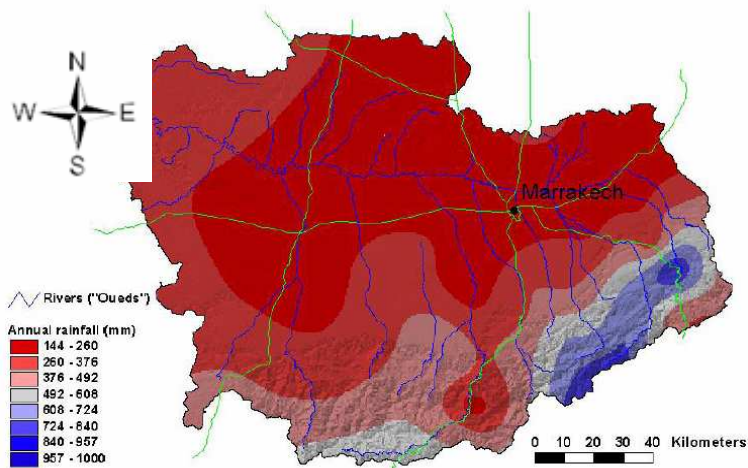


Figure II.2: Variabilité spatiale des précipitations sur le bassin du Tensift (Chehbouni et al. 2008).

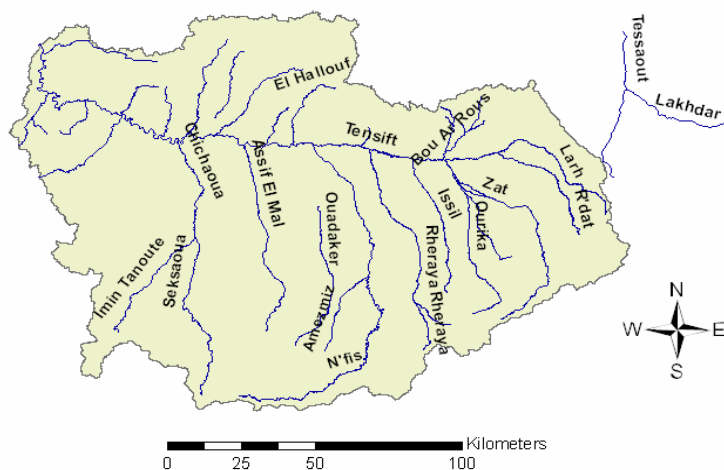


Figure II.3: Les principaux oueds du bassin Tensift.

Dans la partie amont du Tensift, on peut également distinguer trois parties dont le fonctionnement hydrologique est contrasté, à savoir, du nord au sud (Figure II.1):

- Un chaînon montagneux constitué de bas plateaux ('*Jbilet*s', altitude inférieure à 1000 m), très aride, qui ne joue pas un rôle majeur dans l'hydrologie de la région;
- La plaine centrale semi-aride du Tensift, qui est ma principale zone d'étude et sera décrite en détail dans le sous-chapitre suivant;
- Le versant nord de l'Atlas, caractérisé par un climat montagnard nettement plus humide et froid. Cette chaîne montagneuse culmine à 4165 m et ceinture au sud la plaine du Tensift. C'est le « château d'eau » de la région. L'eau pour l'irrigation des cultures y est acheminée en plaine soit directement par les systèmes hydrauliques (barrages et canaux) soit indirectement en contribuant à la recharge des nappes aquifères (Chaponniere et al. 2005; Boudhar et al. 2007).

Les apports moyens annuels de l'Atlas sont évalués à près de 824.5 million de m³ (Ouzine and Kharrou 2004). En outre, le bassin du Tensift bénéficie d'un transfert de l'ordre de 300 millions de m³ à partir de celui de l'Oum Er Rbia situé au nord est. Ce transfert est destiné à l'alimentation en eau de la ville de Marrakech et à l'irrigation. Ainsi, le potentiel en eau de surface mobilisable s'élève en moyenne par année à environ 1100 millions de m³. Ces ressources sont toutefois insuffisantes pour subvenir aux besoins en eau des cultures pratiquées dans le Haouz.

Les réservoirs d'eaux souterraines dans lesquels s'accumulent ou transitent les eaux pluviales infiltrées sont d'extension inégale. Les plus importants sont:

- La nappe du Haouz à l'est sur une superficie d'environ 6000 km² (Figure II.4);
- La nappe du Mejjat à l'ouest qui s'étend sur une superficie de 1000 km².

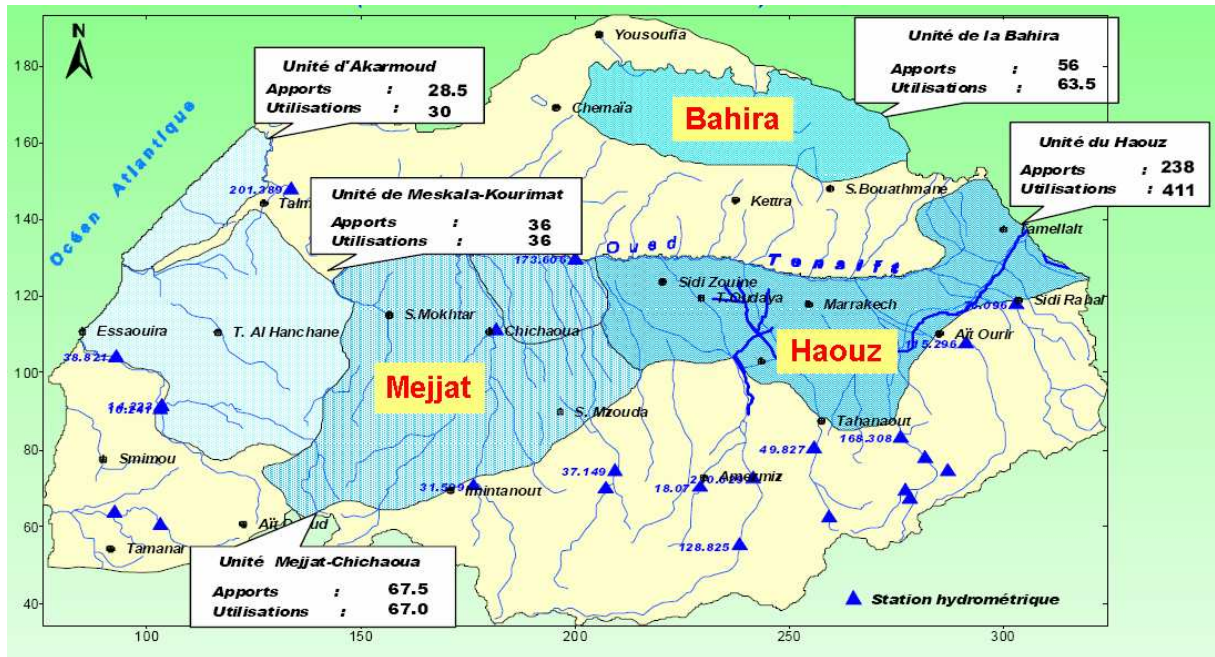


Figure II.4: Principales nappes phréatiques du bassin versant du Tensift (Limam 2005).

Les potentialités de recharge des nappes phréatiques sont actuellement totalement mobilisées, voire surexploitées par prélèvement dans les réserves propres de l'aquifère. Ces prélèvements servent en premier lieu à l'irrigation des zones cultivées, qui ont connu une forte extension durant les trois dernières décennies. La Figure II.5 montre globalement une baisse significative du niveau de la nappe durant ces seize dernières années pouvant atteindre parfois 10 m dans certaines régions (Berrazouk et al 2004).

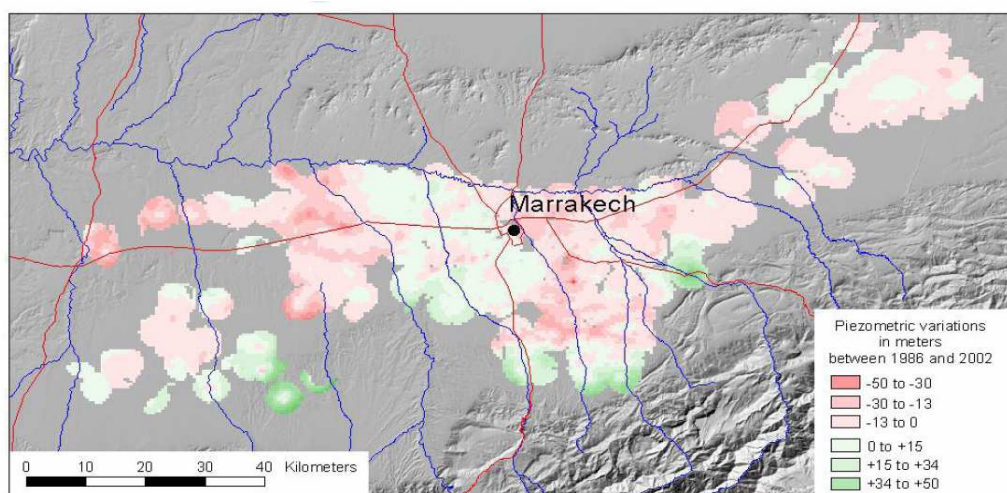


Figure II.5: Variation du niveau de la nappe du Haouz depuis 1980 jusqu'à 2004 (Berrazouk et al 2004).

II-2 LA PLAINE DU TENSIFT

II-2.1 Présentation générale

La partie orientale de la plaine du Tensift, que l'on désignera plus simplement par plaine du Tensift, constitue la zone d'étude principale de ces travaux. Délimitée en rouge sur la Figure II.6, elle couvre une superficie d'environ 3000 km² entre les reliefs des *Jbilet*s au nord et ceux de l'Atlas au sud. C'est la zone hydrologiquement et agronomiquement active de la plaine. Elle est divisée en trois sous-régions: la sous-région du NFIS à l'Est de la plaine, le Haouz central et le Tessaout Amont à l'ouest (Figure II.6).

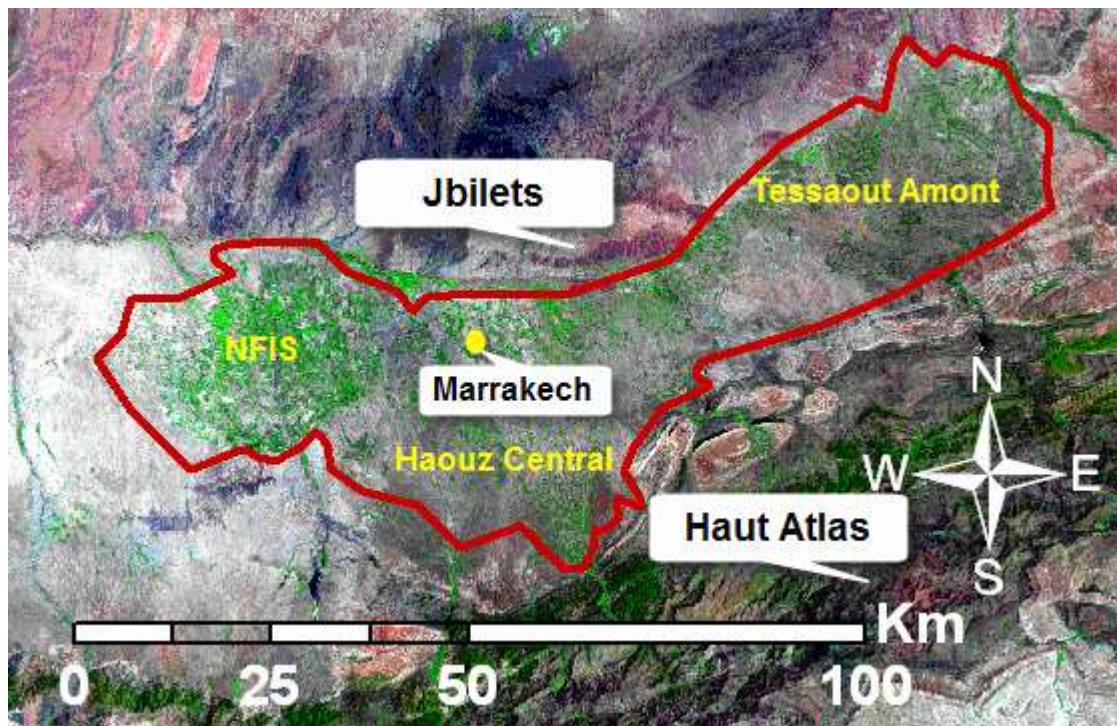


Figure II.6: Plaine du Tensift. La zone d'étude est délimitée en rouge (Image Landsat à 30 m de résolution spatiale).

La plaine du Tensift connaît un climat semi-aride continental, avec une pluviométrie faible et irrégulière de l'ordre de 250 mm/an. La température est très élevée en été

(37.7°C en moyenne des maxima) et relativement basse en hiver (4.9°C comme moyenne des minima). La demande évaporative est très importante, avec un cumul annuel d'environ 1500 mm (Duchemin et al. 2006; Er-Raki et al. 2007). Le développement et la gestion durable de la région sont fortement tributaires du régime climatique, et en premier lieu des précipitations qui connaissent une forte variabilité intra- et inter-annuelle. Si l'on analyse l'évolution des précipitations enregistrées par la station pluviométrique de la ville de Marrakech sur les 40 ans dernières années (Figure II.7), on constate que les précipitations peuvent varier d'un facteur 5 d'une année à l'autre avec un maximum de 450 mm enregistré en 1970-1971 et un minimum autour de 90 mm en 1992-1993. L'examen de la répartition moyenne de ces mêmes données (Figure II.8) montre l'existence de deux saisons nettement différenciées:

- d'Octobre à Avril, une saison humide où interviennent la quasi-totalité des épisodes pluvieux, soit près de 80 % de la pluviométrie annuelle;
- de Mai à Septembre, une saison sèche avec seulement 20 % de la pluviométrie annuelle.

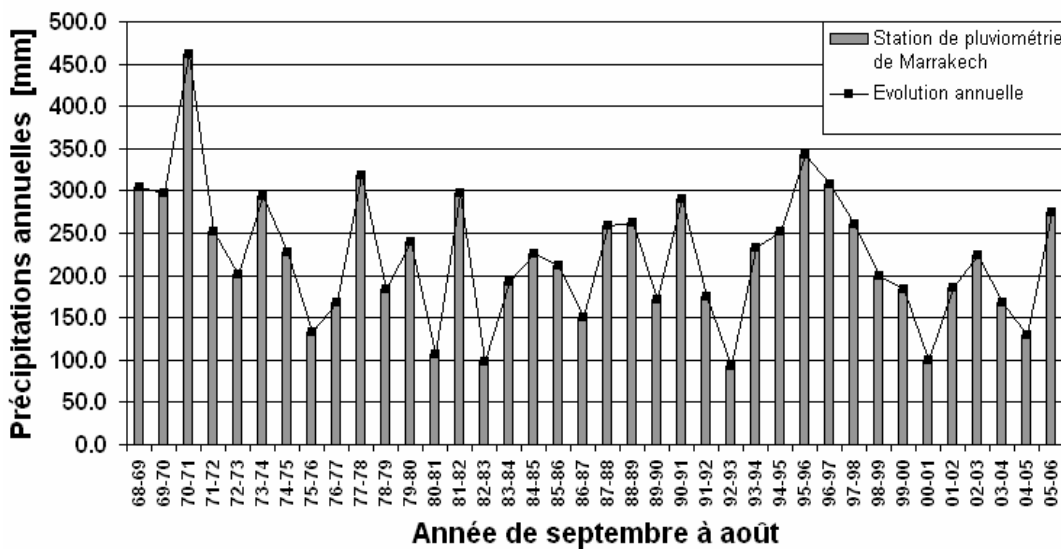


Figure II.7: Précipitations annuelles à la station de Marrakech de 1968 à 2006.

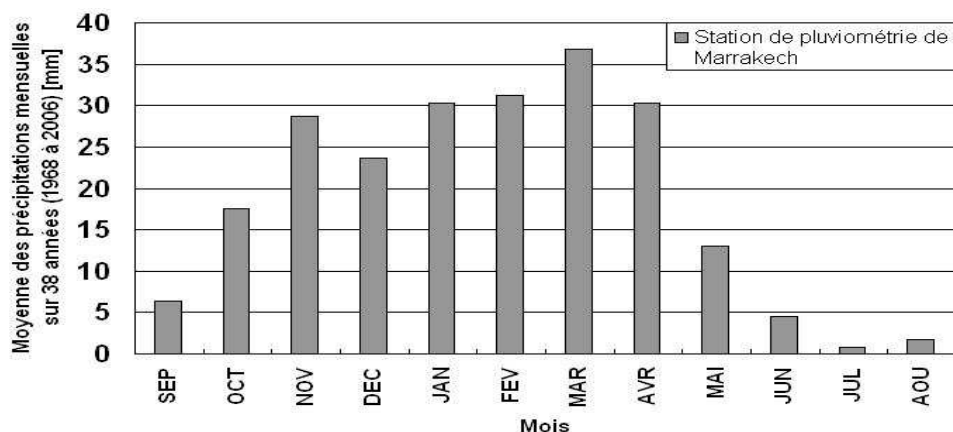


Figure II.8: Moyenne mensuelle des précipitations à Marrakech (1968-2006).

II-2.2 L'agriculture

Les cultures céréalières et fourragères (blé, orge, luzerne,...), les oliviers et les agrumes sont les cultures dominantes dans la plaine du Tensift (environ 80 % des terres arables). Les autres types de cultures sont des cultures maraîchères, des fruitiers à feuilles caduques (pommiers, pêchers, abricotiers) et la vigne. Les plantations arborées sont principalement situées dans les parties ouest et est de la plaine (secteurs du NFIS et de la Tessaout), ainsi que le long de l'oued Tensift et dans les cônes de déjection de ses principaux affluents. La majorité des zones non cultivées se situent au sud-ouest de la plaine. La partie centrale de la plaine (secteur du Haouz) est dominée par les cultures céréalières.

Le parcellaire agricole est très hétérogène. Cette hétérogénéité concerne la superficie des parcelles cultivées, ainsi que leur agencement et organisation spatiale (Figure II.9). On peut trouver des parcelles agricoles de faible superficie de l'ordre de 100 m² et d'autres ayant des superficies pouvant parfois atteindre 10 ha. La nature des exploitations en est la principale cause. Il existe des grosses propriétés étatiques ou de particuliers disposant de moyens financiers importants pour réaliser des investissements. Ces propriétaires ont souvent une autre activité économique et investissent un capital dans l'agriculture. Pour l'irrigation, ils disposent de bornes individuelles sur le réseau collectif, ainsi que de forages particuliers, et de techniques

modernes (goutte-à-goutte, aspersion). A l'extrême inverse, on trouve de petites fermes dont les propriétaires (ou gérants) ne disposent d'aucune capacité d'investissement, et réalisent une agriculture essentiellement vivrière, à base de céréaliculture et d'élevage. Ils irriguent de manière traditionnelle (gravitaire) et dépendent de la dotation qui leur est accordée sur les bornes collectives. Ils utilisent en complément, quand ils en disposent, l'eau des réseaux traditionnels réalimentés ou de crue.

L'historique de chaque sous-région en termes de gestion du territoire, de statut foncier et d'aménagement hydraulique, est également un facteur structurant de l'espace agricole. A l'est de la plaine, la région du Tessaout Amont se caractérise par la juxtaposition de toutes petites parcelles où on retrouve principalement des cultures annuelles, parfois en sous-étages de plantations arborées (Figure II.9a). La zone du Haouz central, la plus récemment aménagée, présente un paysage agricole relativement bien structuré avec un agencement plus régulier du parcellaire (Figure II.9b). Dans la région du NFIS, secteur aménagé de longue date, on note la coexistence de parcelles agricoles de grandes tailles bien agencées et de petites parcelles éparpillées (Figure II.9c-d).

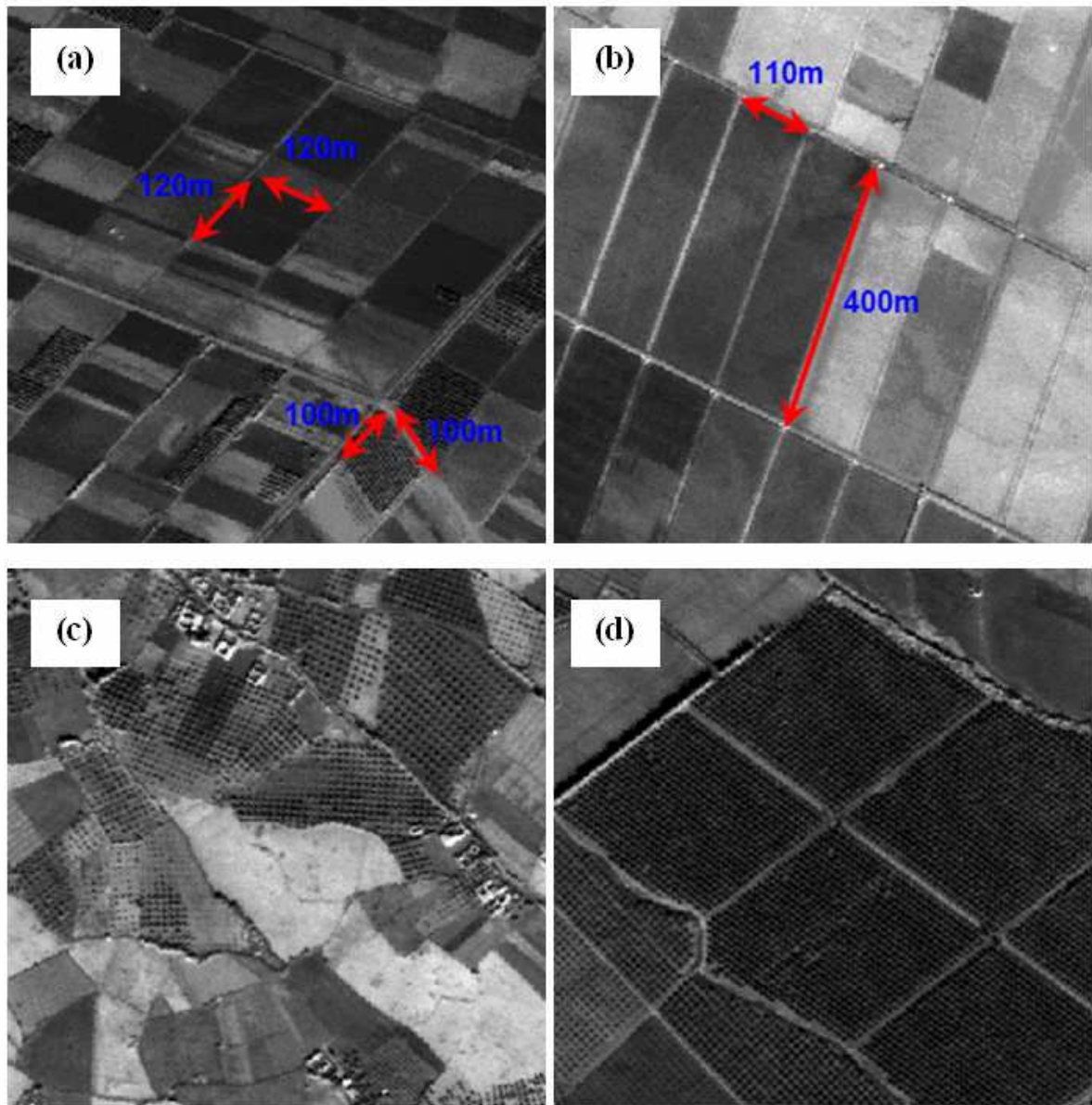


Figure II.9: Mise en évidence de l'hétérogénéité parcellaire du point de vue aménagement et superficie.

(a) Tessaout Amont, (b) Haouz, (c) et (d) NFIS
(Image panchromatique FOMORSAT-2, résolution spatiale 2m).

II-2.3 L'irrigation

Les systèmes de distribution de l'eau pour l'irrigation dans la plaine du Tensift ont connu plusieurs évolutions historiques (Ouzine and Kharrou 2004). Les aménagements hydrauliques de mobilisation des eaux ont été construits à l'époque des premières dynasties (Almoravides et Almohades, XI^{ème} siècle) qui se sont installées à Marrakech. Les premiers réseaux étaient destinés au transport de l'eau de l'oued Ourika pour irriguer les terres agricoles et actionner les machines hydrauliques. La succession de plusieurs dynasties sur cette région a permis la diversification des aménagements hydrauliques. Actuellement, on compte trois principaux systèmes d'irrigation:

- Un réseau ancien constitué de canaux traditionnels (seguias), canaux en terre non revêtus, qui dérivent les eaux des oueds vers la plaine ;
- Un réseau moderne constitué de canaux ou de conduites souterraines dans les secteurs aménagés et gérés par l'ORMVAH ;
- Les ouvrages (puits et forages) servant à puiser les eaux souterraines.

La Figure II.10 présente la répartition, en termes de superficie irriguée, de la provenance de l'eau. On constate que l'eau mobilisée pour l'irrigation provient en premier lieu des barrages (près de la moitié) et en second lieu directement des oueds (eaux de crues et réseaux traditionnels), suivie par les eaux souterraines de la nappe. Ces chiffres sont cependant à considérer avec précaution car les caractéristiques (nombre, localisation, utilisation) des puits et forages sont en grande partie méconnues (faiblesse des enquêtes de terrain, absence de recensement régulier des ouvrages anciens, pratique changeante pour la délivrance des autorisations...), et les volumes d'eau circulant dans les réseaux traditionnels sont irréguliers et très difficiles à contrôler. Les seules données réellement fiables, qui seront utilisées au cours de l'étude, sont les volumes d'eau des barrages distribués par l'ORMVAH et l'ABHT sur les secteurs aménagés en moyenne et grande hydrauliques.

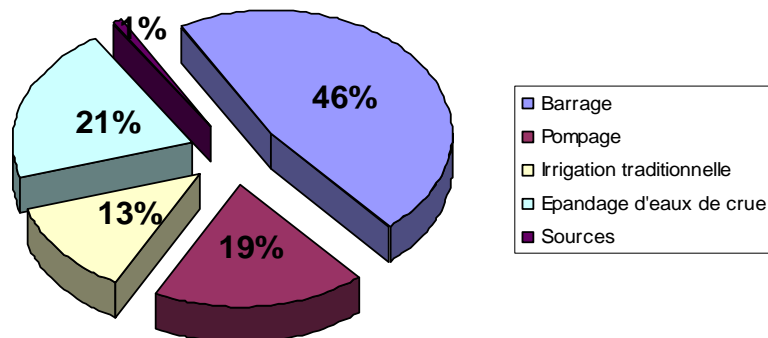


Figure II.10: Répartition en superficie de l'utilisation des ressources en eau dans la plaine (source ORMVAH et ABHT).

II-2.4 Principaux secteurs irrigués (réseau ORMVAH/ABHT)

On distingue trois principaux secteurs irrigués (Figure II.11 et II.12):

- Le secteur du «NFIS» situé à l'ouest de la ville de Marrakech et alimenté par les barrages Lalla Takerkoust et Moulay Hassan 1^{er} via le canal de Rocate ;
- Les secteurs centraux du Haouz, alimentés par le Barrage de Moulay Hassan 1^{er} via le canal de Rocate ; les aménagements de ces secteurs datent des années 90 ;
- Le secteur de la Tessaout Amont fût le premier à bénéficier d'aménagements modernes «grande hydraulique », en 1970. Il est irrigué à partir de l'eau de l'oued Tessaout et du barrage Moulay Youssef.

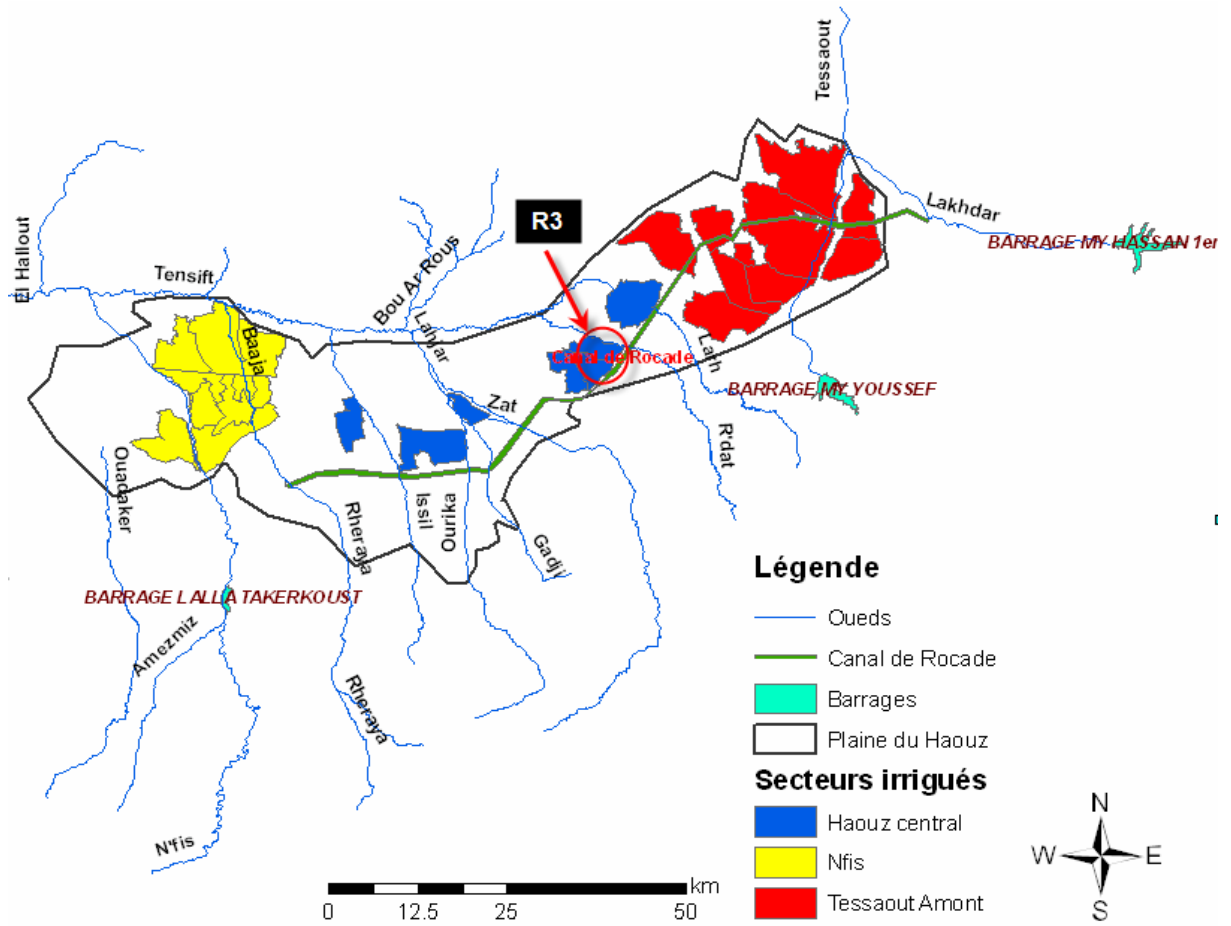


Figure II.11: Principaux secteurs irrigués, barrages et ressources en eaux gérés par l'ORMVAH, la plaine du Tensift est délimitée en noir.

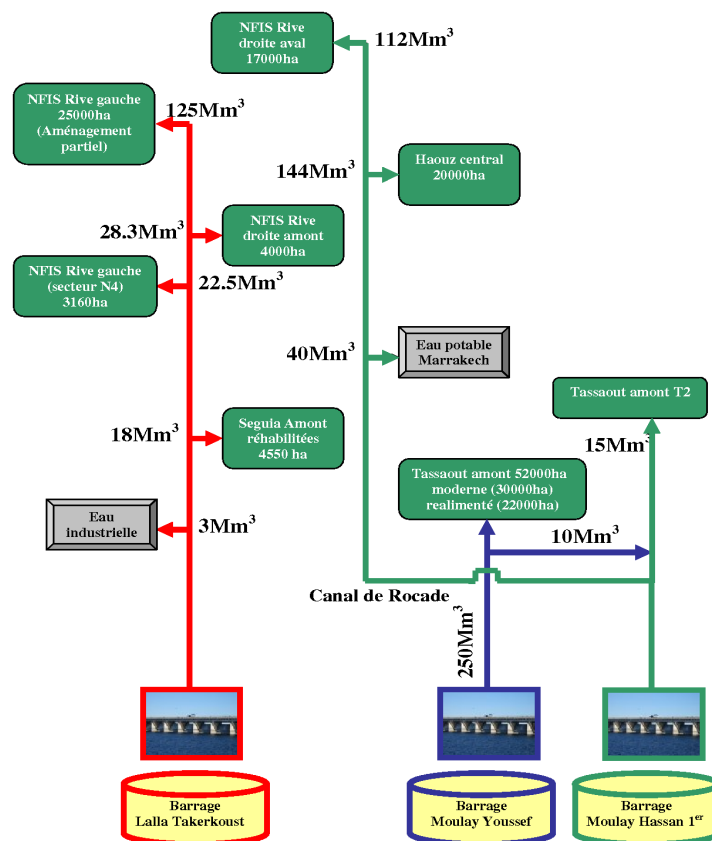


Figure II.12: La répartition des ressources en eau par périmètre.

II-2.5 Périmètre irrigué test (R3)

Le périmètre irrigué R3, situé à 40 km à l'est de Marrakech (Figure II.11), est la zone principale de validation des travaux de cette thèse. Ce périmètre irrigué a été intensivement étudié au cours des saisons agricoles 2002-2003, 2003-2004 et 2005-2006 (Hadria et al. 2006; Duchemin et al. 2006; Duchemin et al. 2007; Er-Raki et al. 2007). Les caractéristiques de ce site (relief absent, parcellaire régulier et de grande taille) en font une zone d'étude privilégiée pour évaluer l'apport des données satellites à fournir un bilan spatialisé des consommations en eau.

Ce secteur a une superficie de 2800 ha (Figure II.13) est essentiellement utilisé pour la production de céréales. On y cultive majoritairement du blé, sur plus de la moitié de la

surface (1550 ha en 2002-2003 et 1750 ha en 2003-2004), ainsi que des oliviers (dans la partie nord-ouest) et des cultures maraîchères (dans la partie sud). Une partie non négligeable, un quart à un tiers selon les années, est laissée en jachère ou non cultivée. Les céréales sont semées entre novembre et janvier, atteignent leur maximum de développement fin mars, et sont récoltées au début de l'été.

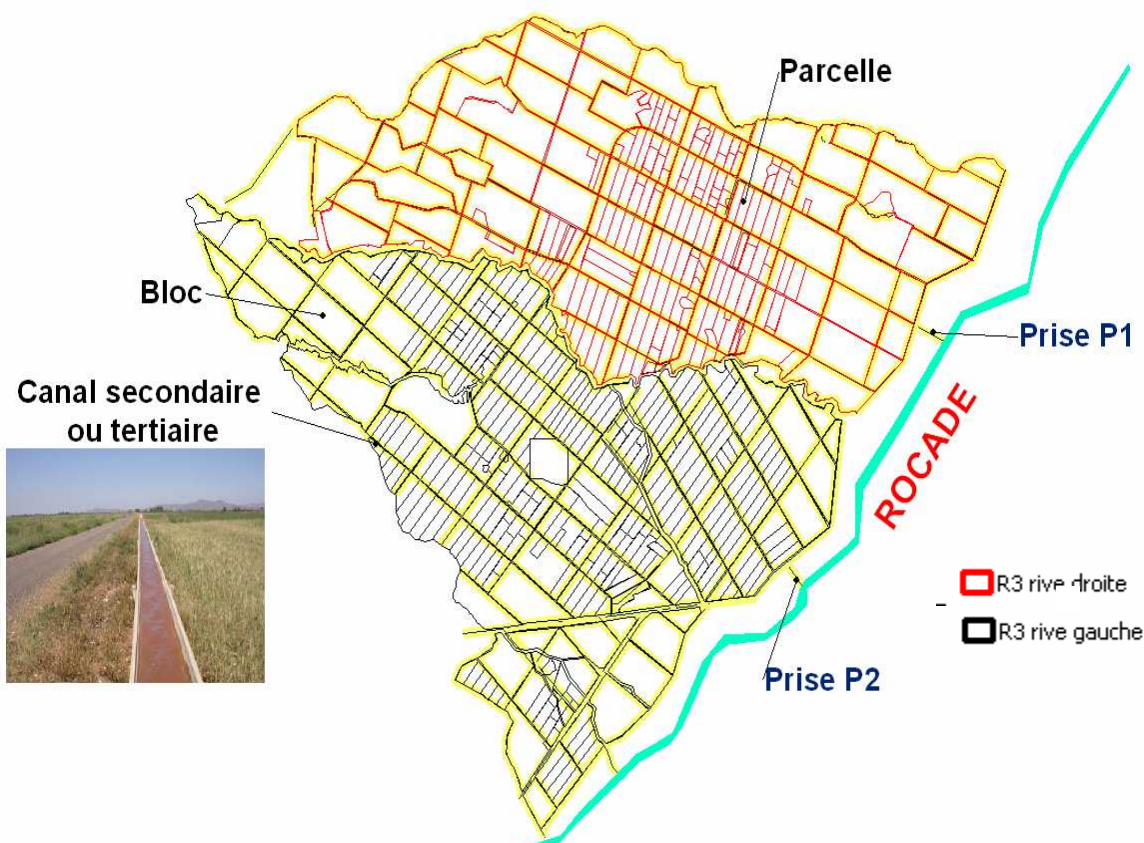


Figure II.13: Organisation du périmètre irrigué R3.

Cette zone est gérée conjointement par des associations d'agriculteurs et un centre local de l'ORMVAH, notamment en termes d'irrigation. En début de saison, ils décident du nombre de tour d'eau et des quantités attribuées pour l'irrigation des cultures céréalières. Si le taux de remplissage des barrages le permet, il est procédé jusqu'à 5 tours d'eau pour le blé (décembre-mai), avec des quantités fixes d'un tour à l'autre à l'échelle du secteur. Pour la saison 2002-2003, les quantités d'eau étaient égales à 30 mm par tour d'eau, alors qu'elles étaient le double en 2003-2004 et 2005-2006. A chaque tour, les agriculteurs reçoivent un volume fonction de la superficie des

exploitations, même si certaines zones sont inexploitées. Un agriculteur peut décider de laisser la part qui lui est attribuée aux fermes voisines. Cette organisation engendre une grande hétérogénéité spatiale et temporelle des volumes d'eau d'irrigation à l'échelle de la parcelle.

L'eau d'irrigation est acheminée depuis le barrage Hassan 1^{er} par le canal de Rcade (Figure II.13). Il dessert deux prises primaires P1 et P2 qui acheminent l'eau sur les rives droite et gauche de ce secteur. Ensuite, un réseau de canaux aériens secondaires et tertiaires acheminent l'eau jusqu'aux parcelles. Le secteur est ainsi découpé en blocs d'irrigation, divisés au minimum en 6 parcelles rectangulaires de 4 à 5 ha chacune. Chaque bloc est alimenté par un canal tertiaire, mais un tertiaire alimente un nombre variable (de 1 à 10) blocs; certains blocs sont directement irrigués par les canaux secondaires. L'irrigation des parcelles se fait par inondation après aménagement du terrain (nivelage et création de buttes espacées de quelques mètres servant à canaliser l'eau).

Les noms des tertiaires sont mentionnés sur la Figure II.14 en respectant la notation suivante (Nom secteur Primaire-Secondaire Tertiaire). A titre d'exemple, le tertiaire « R3P1-S2T3 » signifie que l'eau pour l'irrigation de l'ensemble de ces blocs de parcelles provient de la prise primaire P1 (au niveau du canal de Rcade) qui dessert le canal secondaire S2 qui lui-même dessert le canal tertiaire T3.

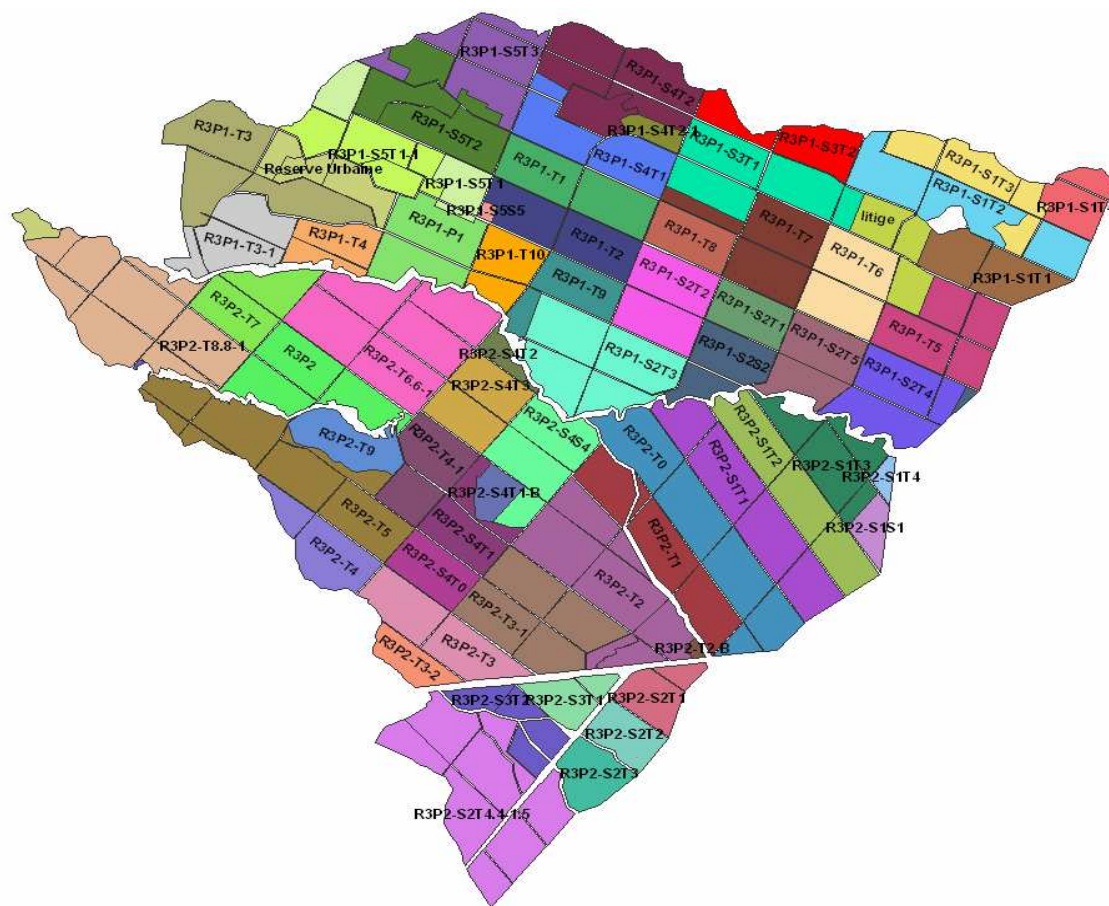


Figure II.14: Tertiaires et blocs d'irrigation sur le secteur irrigué R3. Les couleurs indiquent le ou les blocs irrigués par chaque tertiaire. Le label indique le nom de la prise principale (P1 ou P2) et ceux des canaux secondaires et tertiaires. Les noms des tertiaires respectent la notation suivante (Nom secteur Primaire-Secondaire Tertiaire).

II-3 DONNEES EXPERIMENTALES

Dans la plaine du Tensift, les données climatiques ont été collectées par le réseau de stations pluviométriques (une vingtaine de pluviomètres) et météorologiques (quelques stations) de l'ORMVAH, de l'ABHT et de la DREF¹⁵. Ce réseau a été considérablement renforcé au cours du projet SudMed (jusqu'à 8 stations météorologiques complètes en 2003-2004). Les données météorologiques (température de l'air, vitesse du vent, rayonnement global et humidité de l'air) nous ont servi à calculer l'évapotranspiration de référence. Ces données ont été spatialisées sur la plaine en utilisant des algorithmes

¹⁵ Direction Régionale des Eaux et Forêts

géostatistiques et des sorties du modèle météorologique de la Direction Météorologique Nationale du Maroc. Pour chaque saison, on s'intéresse aux données journalières de septembre à août.

II-3.1 Précipitations

Le réseau de stations pluviométriques comporte plus de 30 stations réparties sur la zone d'étude (Figure II.15). Deux types de pluviomètres sont utilisés pour les mesures, pluviomètres à auget basculant et pluviomètres accumulateurs. Les données de précipitations sont recueillies sur la période 2000-2006 par différents organismes : ORMVAH, ABHT, DREF et SudMed (Tableau II.1). Les noms des stations sont précisés en annexe 1.

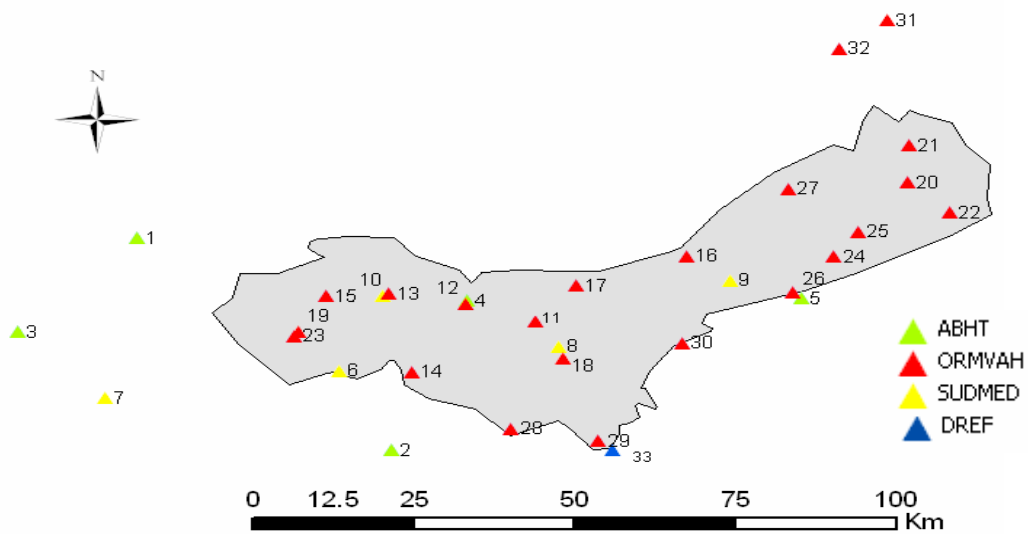


Figure II.15: Réseau de stations pluviométriques de la plaine du Tensift.

Tableau II.1: Nombres et sources des stations pluviométriques par saison.

Année	Nombre de stations de pluviométrie	Source			
		ORMVAH	ABHT	SudMed	DREF
2000-2001	23	17	5	0	1
2001-2002	24	18	5	0	1
2002-2003	31	22	5	3	1
2003-2004	31	21	5	5	0
2004-2005	33	22	5	6	0
2005-2006	31	21	5	5	0

II-3.1.1 Qualité des données

Une analyse préliminaire des données a révélé que certaines stations étaient mal maintenues (absence de pluie sur de longues périodes au cours desquelles d'évènements précipitants généralisés). Pour vérifier la qualité des données, nous avons comparé les stations deux à deux, chaque station étant comparée à sa plus proche « voisine ». Cette comparaison a été effectuée sur des cumuls avec trois pas de temps différents: 1 jour, 3 jours et 7 jours. Pour chaque couple de stations et chaque jeu de données (les différents cumuls), nous avons calculé l'erreur quadratique moyenne (cf. annexe 3) entre les observations journalières de chacune des stations. On discute à titre d'exemples:

- le cas des deux stations de Marrakech gérées respectivement par l'ORMVAH et l'ABHT, qui sont distantes de 650 m (Figure II.16 et Tableau II.2). Dans ce cas précis, la comparaison ne permet pas de détecter d'éventuelles anomalies liées à la collecte des données. Il n'y a pas de biais notable, et la corrélation est faible au pas de temps journalier (coefficient R^2 de l'ordre de 0.5) mais augmente avec le pas de temps pour atteindre une valeur assez élevée (R^2 supérieur à 0.8) au pas de temps de 3 jours. Les cumuls annuels des deux stations sont cohérents, avec un écart maximal en 2003-2004 de l'ordre de 60 mm. Cet écart est possible étant donné la variabilité spatio-temporelle des précipitations, qui est en particulier forte dans les périodes de transition entre saison humide et saison sèche (caractère orageux des pluies);

- le cas des deux stations de Saada gérées respectivement par l'ORMVAH et SudMed distantes de 875 m l'une de l'autre (Figure II.17 et Tableau II.2). La comparaison montre qu'il existe une différence importante (facteur de 2) entre les cumuls annuels des deux stations pour les deux années 2003-2004 et 2004-2006, avec une bonne corrélation des cumuls au pas de temps de 3 jours et 7 jours (R^2 supérieur à 0.9). Cette différence est un indicateur d'un dysfonctionnement au niveau de l'une des deux stations. La comparaison d'autres stations SudMed aux stations ORMVAH a montré la même tendance (de forts cumuls annuels pour les stations SudMed). La vérification au niveau des pluviométries SudMed a décelé une mauvaise calibration des quantités enregistrées à chaque basculement. Ces derniers n'ont pas été utilisés dans le procédé de spatialisation.

Au total, nous avons réduit le nombre de stations pluviométriques à environ 25 stations en ne gardant que celles qui ne présentent pas de dysfonctionnement apparent.

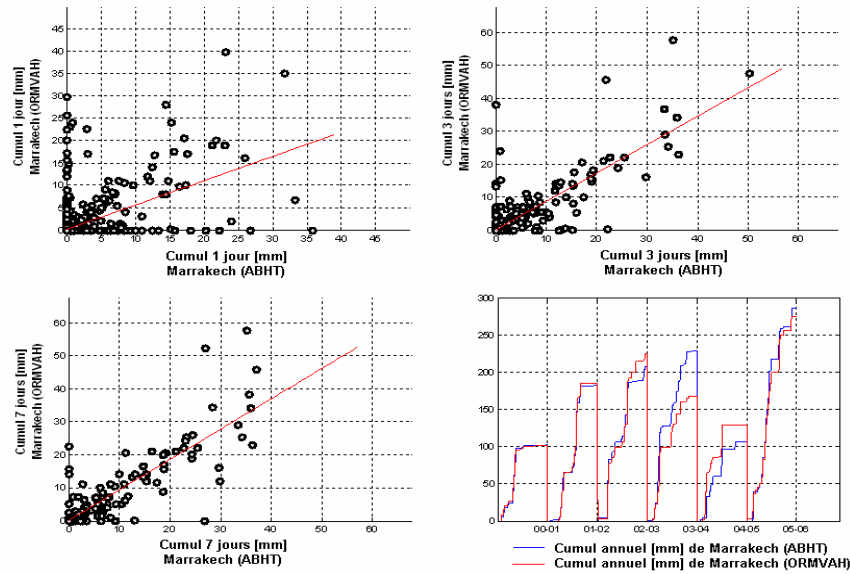


Figure II.16: Exemple de comparaison entre la station de pluviométrie « Marrakech ORMVAH » et la station « Marrakech ABHT ».

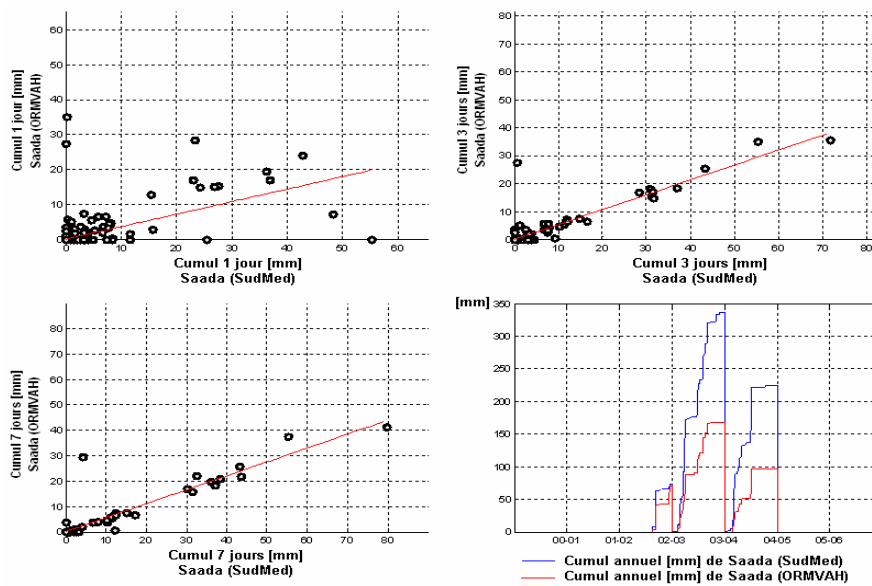


Figure II.17: Exemple de comparaison entre la station de pluviométrie « Saada ORMVAH » et la station « Saada SudMed ».

Tableau II.2: Statistiques des comparaisons entre les deux stations de pluviométries.

Type de comparaison	Marrakech		Saada	
	RMSE en mm	R ²	RMSE en mm	R ²
1 jour	2.55	0.53	3.49	0.59
cumul 3 jours	3.04	0.83	4.29	0.92
cumul 7 jours	4	0.88	7.22	0.93

II-3.1.2 Spatialisation

Pour obtenir des champs de pluie régulièrement distribués dans l'espace et le temps, nous avons testé deux méthodes d'interpolation géostatistiques: le krigeage (Krige 1951) et la méthode (*IDW: Inverse Distance Weighted*, Shepard 1968). Les deux méthodes donnent des estimations de cumuls annuels des précipitations comparables. Nous avons opté pour la méthode *IDW* de part sa facilité de mise en œuvre et d'autre part le nombre élevé de stations de mesures de pluviométrie.

La méthode *IDW* détermine les valeurs en chaque nœud de la grille par une combinaison linéaire des valeurs des points d'observations, sous l'hypothèse que l'influence d'un point d'observation diminue linéairement avec la distance qui le sépare du nœud considéré (Eq. II.1). Les facteurs de pondération (w_i) sont compris entre 0 et 1 et leur somme est égale à 1. Quand l'observation coïncide avec le nœud, le facteur de pondération est 1, et le poids des autres est nul. Une conséquence est la génération de bulle (en anglais *bull's eye*) autour de la position observée si l'observation diffère fortement des observations situées à proximité.

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i P_i \quad \text{(Eq. II.1)}$$

Avec

P_i : valeur des précipitations de la station i ;

w_i : facteur de pondération pour la station i (Eq. II.2);

n : nombre de stations de pluviométrie les plus proches du point à interpoler. Ce nombre est fixé au préalable par l'utilisateur, dans notre cas, nous l'avons fixé à 20 ;

(x, y) : coordonnées du nœud (point de grille) considéré.

$$w_i = \frac{\left[\frac{R - h_i}{R \times h_i} \right]^2}{\sum_{j=1}^n \left[\frac{R - h_j}{R \times h_j} \right]^2} \quad (\text{Eq. II.2})$$

Avec

R : Maximum de h_i (dans notre exemple $R = h_3$, Figure II.18)

$h_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$ est la distance euclidienne entre le point à interpoler X et la station i .

(x, y) et (x_i, y_i) représentent respectivement les coordonnées du nœud et les coordonnées de la station pluviométrique i .

X : Point à interpoler

X : Station de pluviométrie

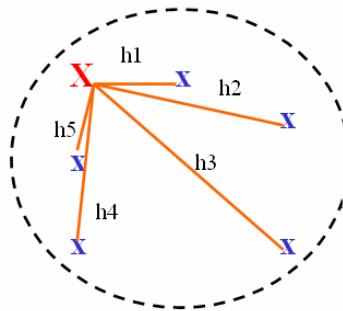


Figure II.18: Calcul du facteur de pondération dans la méthode « Inverse Distance Wighted ».

Cette méthode a été appliquée aux données journalières de précipitations de septembre 2000 à août 2006 à la résolution spatiale des images satellites du capteur MODIS (270 m). Le résultat final est une série journalière de cartes des précipitations sur la plaine du Tensift pour les six saisons agricoles étudiées. On présente en Figure II.19 et Tableau II.3 les cartes et les statistiques de cumuls annuels des précipitations (de septembre à août de chaque année) ainsi générées. L'analyse de ces données montre que les saisons 2000-2001, 2001-2002 et 2004-2005 sont sèches avec un cumul de précipitations annuel autour de 150 mm/an. Les trois autres années (2002-2003, 2003-2004 et 2005-2006) sont conformes (en cumuls annuels) aux valeurs climatologiques régionales (250 mm/an

à Marrakech, cf. Figure II.7). On remarquera également, même si cela n'est pas toujours net, deux types de gradients de précipitations, d'ouest en est et du nord au sud. Ces gradients s'expliquent par la présence des montagnes de l'Atlas au sud et à l'ouest de la zone d'étude (cf. II-2.1).

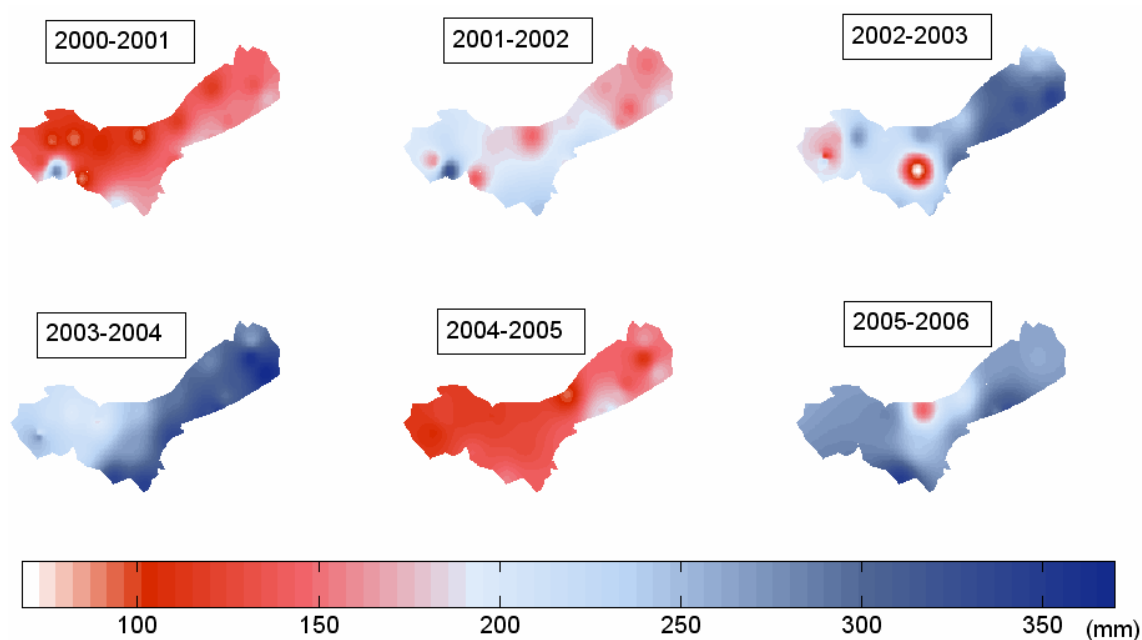


Figure II.19: Cumuls annuels des précipitations en plaine du Tensift (saison agricole 2000-2001 à 2005 à 2006).

Tableau II.3: Cumuls annuels des précipitations en plaine du Tensift.

Saison	min	max	moyenne
2000-2001	89.2	199.5	125.7
2001-2002	138.7	243.7	179.1
2002-2003	169.7	341.2	258.1
2003-2004	186.6	369.6	269.9
2004-2005	93.7	194.7	132.8
2005-2006	145.5	346.9	243.8

Pour avoir un indicateur sur la qualité de l'estimation des précipitations, nous avons généré des champs de pluies par le même algorithme, mais en éliminant un échantillon de stations pluviométriques, qui sont utilisées comme support de validation. Six stations

bien réparties sur la zone d'étude ont été choisies dans des régions où la densité du réseau est la plus faible (Figure II.20). La Figure II.21 et le Tableau II.4 donnent les résultats de la comparaison des valeurs de précipitations spatialisées en l'absence des six stations avec celles collectées sur ces stations. Cette comparaison est effectuée à l'aide d'indicateurs statistiques classiques (cf. annexe 3). Le nuage de point est généralement bien centré par rapport à la droite bissectrice (Figure II.21), et les biais sont inférieurs à 0.3 mm/j. En moyenne sur les six stations, l'erreur sur l'estimation des précipitations varie entre 9 % (cas de la saison 2003-2004) et 26 % (cas de la saison 2000-2001), mais les erreurs locales peuvent être très importantes, par exemple 80 % pour la station de Od Hassoune en 2005-2006. Dans ce cas, les précipitations observées pour les stations voisines à la station Od Hassoune pour la saison 2005-2006 sont plus élevées (autour de 260 mm) que celles de la station Od Hassoune (150 mm) (Figure II.19).

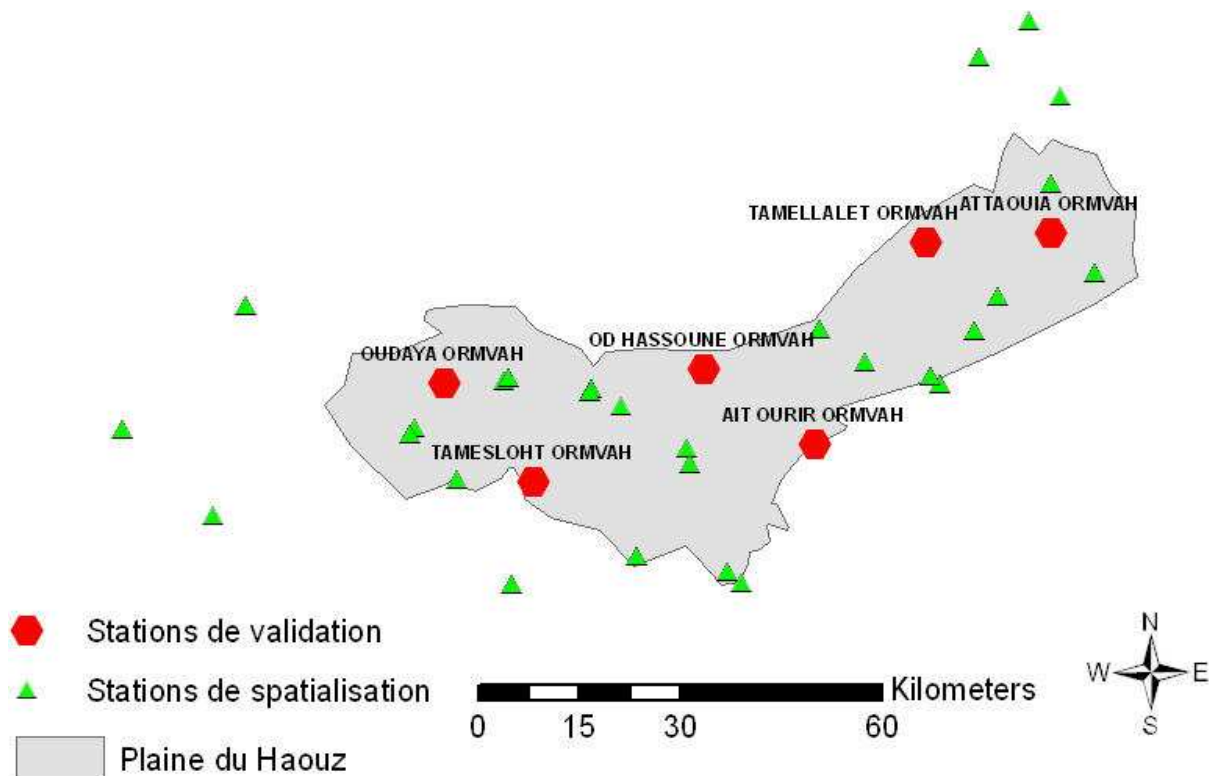


Figure II.20: Réseau de stations de pluviométrie. Les six stations sélectionnées pour évaluer la procédure d'interpolation sont mises en relief (Hexagones rouges).

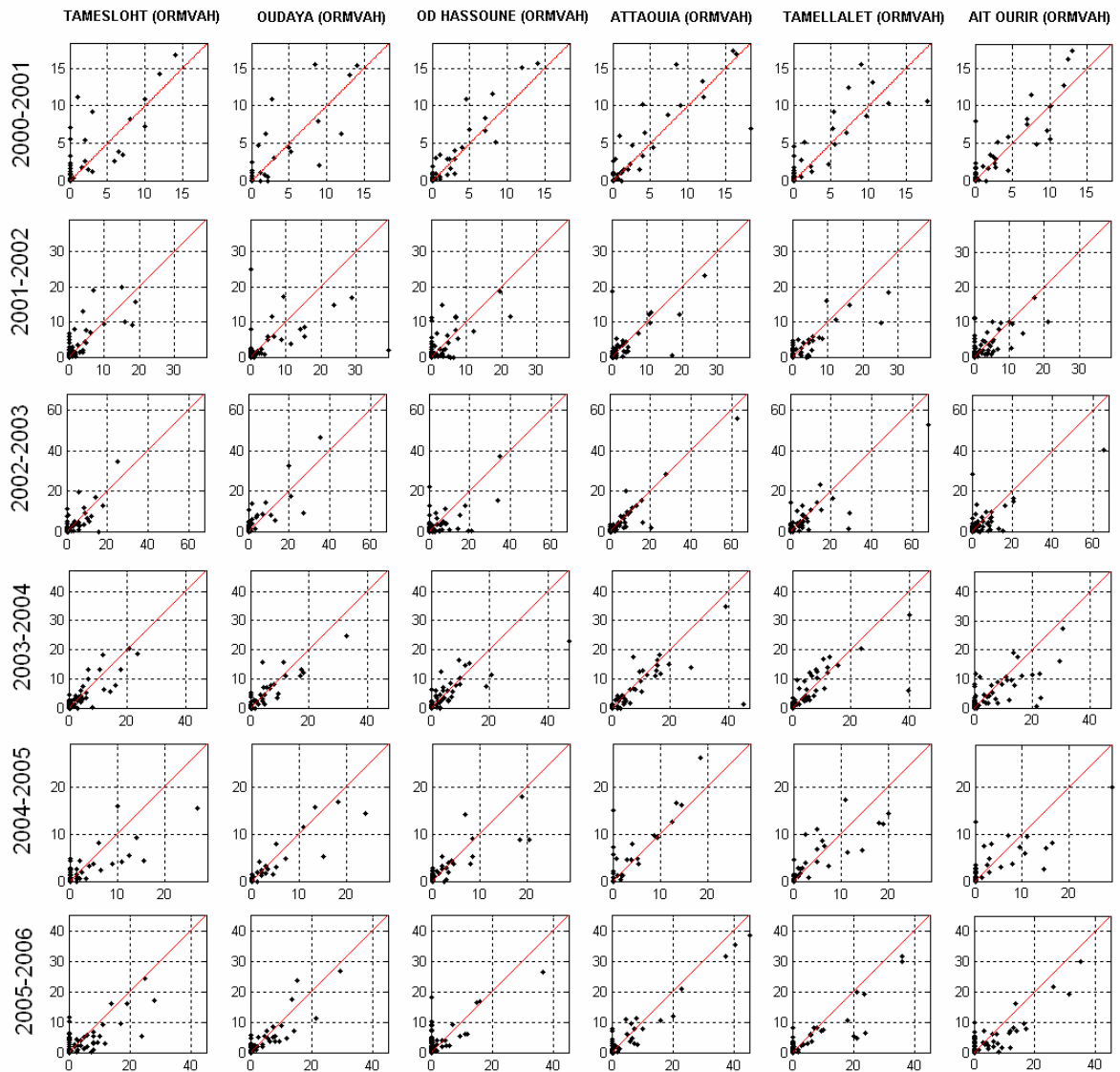


Figure II.21: Précipitations journalières estimées et observées sur les six stations de validation.

Tableau II.4: Statistiques entres les précipitations journalières estimées et observées sur les six stations de validation.

Saison	Station	RMSE [mm]	R ²	Biais	a'	b'	Cumul annuel observé [mm]	Cumul annuel estimé [mm]	Pourcentage d'erreur ^{**}
2000-2001	Tamesloht (ORMVAH)	0.9	0.7	0.1	1.0	0.1	89.1	129.1	45%
	Oudaya (ORMVAH)	0.8	0.7	0.0	1.0	0.1	92.4	107.4	16%
	Od Hassoune (ORMVAH)	0.6	0.9	0.1	1.1	0.0	92.3	118.8	29%
	Attaouia (ORMVAH)	0.9	0.8	0.1	0.9	0.1	135.7	155.2	14%
	Tamellalet (ORMVAH)	0.9	0.8	0.1	1.1	0.1	114.7	152.4	33%
	Ait Ourir (ORMVAH)	0.7	0.9	0.1	1.0	0.1	126.1	152.6	21%
							Moyenne	26%	
2001-2002	Tamesloht (ORMVAH)	1.3	0.7	0.2	0.9	0.2	138.5	196.9	42%
	Oudaya (ORMVAH)	2.7	0.3	-0.1	0.4	0.2	217.1	178.8	18%
	Od Hassoune (ORMVAH)	1.5	0.5	0.1	0.7	0.2	145.5	191.1	31%
	Attaouia (ORMVAH)	1.5	0.6	0.0	0.7	0.1	160.5	159.5	1%
	Tamellalet (ORMVAH)	1.3	0.7	0.0	0.7	0.2	165.5	169.8	3%
	Ait Ourir (ORMVAH)	1.4	0.6	0.1	0.7	0.2	178.7	201.8	13%
							Moyenne	18%	
2002-2003	Tamesloht (ORMVAH)	1.8	0.6	0.2	0.9	0.2	204.0	258.9	27%
	Oudaya (ORMVAH)	1.8	0.7	0.2	1.0	0.2	167.5	257.2	54%
	Od Hassoune (ORMVAH)	2.6	0.5	-0.1	0.6	0.2	266.5	237.9	11%
	Attaouia (ORMVAH)	1.5	0.9	-0.1	0.8	0.1	294.9	269.7	9%
	Tamellalet (ORMVAH)	2.3	0.8	-0.1	0.7	0.2	306.7	286.0	7%
	Ait Ourir (ORMVAH)	2.6	0.6	-0.1	0.6	0.3	300.4	275.8	8%
							Moyenne	19%	
2003-2004	Tamesloht (ORMVAH)	1.2	0.8	0.1	0.8	0.2	215.1	236.0	10%
	Oudaya (ORMVAH)	1.2	0.8	0.0	0.8	0.2	210.2	224.9	7%
	Od Hassoune (ORMVAH)	1.8	0.7	0.0	0.6	0.3	242.0	246.6	2%
	Attaouia (ORMVAH)	2.5	0.7	-0.2	0.6	0.2	363.0	293.5	19%
	Tamellalet (ORMVAH)	2.1	0.7	0.1	0.7	0.3	282.0	303.5	8%
	Ait Ourir (ORMVAH)	2.3	0.6	-0.1	0.6	0.3	337.6	303.8	10%
							Moyenne	9%	
2004-2005	Tamesloht (ORMVAH)	1.2	0.7	0.0	0.6	0.1	139.5	122.8	12%
	Oudaya (ORMVAH)	0.8	0.9	0.0	0.7	0.0	124.5	111.0	11%
	Od Hassoune (ORMVAH)	1.0	0.7	0.0	0.7	0.1	123.0	122.9	0%
	Attaouia (ORMVAH)	1.1	0.8	0.2	1.2	0.1	106.0	163.3	54%
	Tamellalet (ORMVAH)	1.1	0.8	0.0	0.8	0.1	144.5	154.7	7%
	Ait Ourir (ORMVAH)	1.4	0.7	0.0	0.6	0.2	142.0	145.9	3%
							Moyenne	14%	
2005-2006	Tamesloht (ORMVAH)	1.9	0.6	0.0	0.6	0.3	266.2	261.9	2%
	Oudaya (ORMVAH)	1.2	0.8	0.0	0.8	0.1	212.0	217.0	2%
	Od Hassoune (ORMVAH)	1.8	0.6	0.3	0.8	0.4	144.0	258.5	80%
	Attaouia (ORMVAH)	1.2	0.9	0.0	0.8	0.1	260.0	265.2	2%
	Tamellalet (ORMVAH)	1.8	0.8	0.0	0.7	0.2	268.8	251.7	6%
	Ait Ourir (ORMVAH)	1.7	0.8	0.0	0.7	0.2	277.5	260.2	6%
							Moyenne	16%	

*Coefficient de la droite de régression : cumul annuel estimé = a x cumul annuel observé + b

**
$$\text{Pourcentage d'erreur} = \left| \frac{\text{observation} - \text{estimation}}{\text{observation}} \right| \times 100$$

II-3.2 Evapotranspiration de référence *ET₀*

L'évapotranspiration de référence *ET₀*, définie comme l'évapotranspiration d'un gazon non stressé ayant des caractéristiques biophysiques (indice foliaire, hauteur, taux de couverture), traduit la « demande climatique », c'est-à-dire le pouvoir évaporant de l'atmosphère. Elle est nécessaire au calcul de l'évapotranspiration réelle à partir de coefficients culturaux (cf. I-4.3.3). Elle a été calculée et spatialisée à partir de valeurs collectées par deux stations météorologiques et des sorties du modèle météorologique « Al Bachir ».

II-3.2.1 Le réseau de stations climatiques

Le réseau est constitué des stations climatiques standards de l'ORMVAH et du projet SudMed (Figure II.22). Les mesures sont effectuées à deux mètres de hauteur. Les stations comportent une panoplie d'instruments permettant la mesure de la vitesse du vent, du rayonnement global, de l'humidité de l'air et de la température de l'air, au pas de temps demi-horaire (radiomètre, anémomètre, sonde d'humidité et thermistance). Le réseau ORMVAH comporte quatre stations dont trois étaient fonctionnelles pendant toute la période d'étude (2000 à 2006, Figure II.23). Sur ces trois stations, celle d'Attaouia n'a pu être exploitée car les données de rayonnement présentaient des valeurs aberrantes. Ce réseau a été renforcé à partir de l'automne 2002 au démarrage du projet SudMed. On dénombre alors jusqu'à 6 stations météorologiques supplémentaires sur la plaine (Figure II.22 et II.24). Ces stations étaient installées dans le cadre d'expérimentations plus lourdes visant à la mesure des flux turbulents (voir par exemple chehbouni et al. 2008 et Duchemin et al. 2006, 2008). Elles ne fournissent donc pas des mesures en continu.

Les variables météorologiques collectées par ces stations ont permis le calcul de l'*ET₀* au pas de temps journalier. Au préalable, nous avons transformé les mesures semi-horaires en variables journalières (température min et max, vitesse du vent min et max, humidité de l'air et rayonnement global) et procédé à un examen approfondi de chacun

de ces jeux de mesures pour éliminer les données aberrantes. Nous avons procédé à des interpolations quand le nombre de données journalières successivement manquantes est inférieur ou égal à quatre.

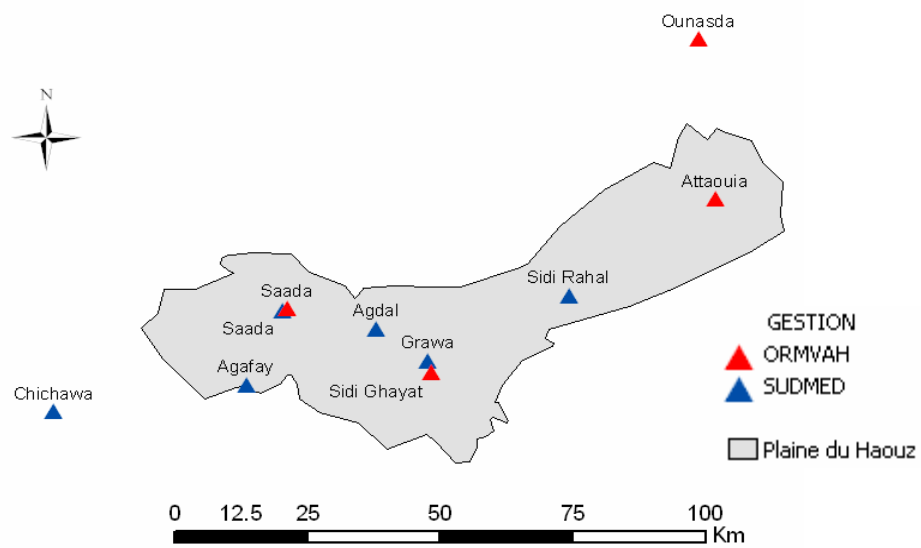


Figure II.22: Réseau de stations météorologiques automatique en plaine du Haouz.

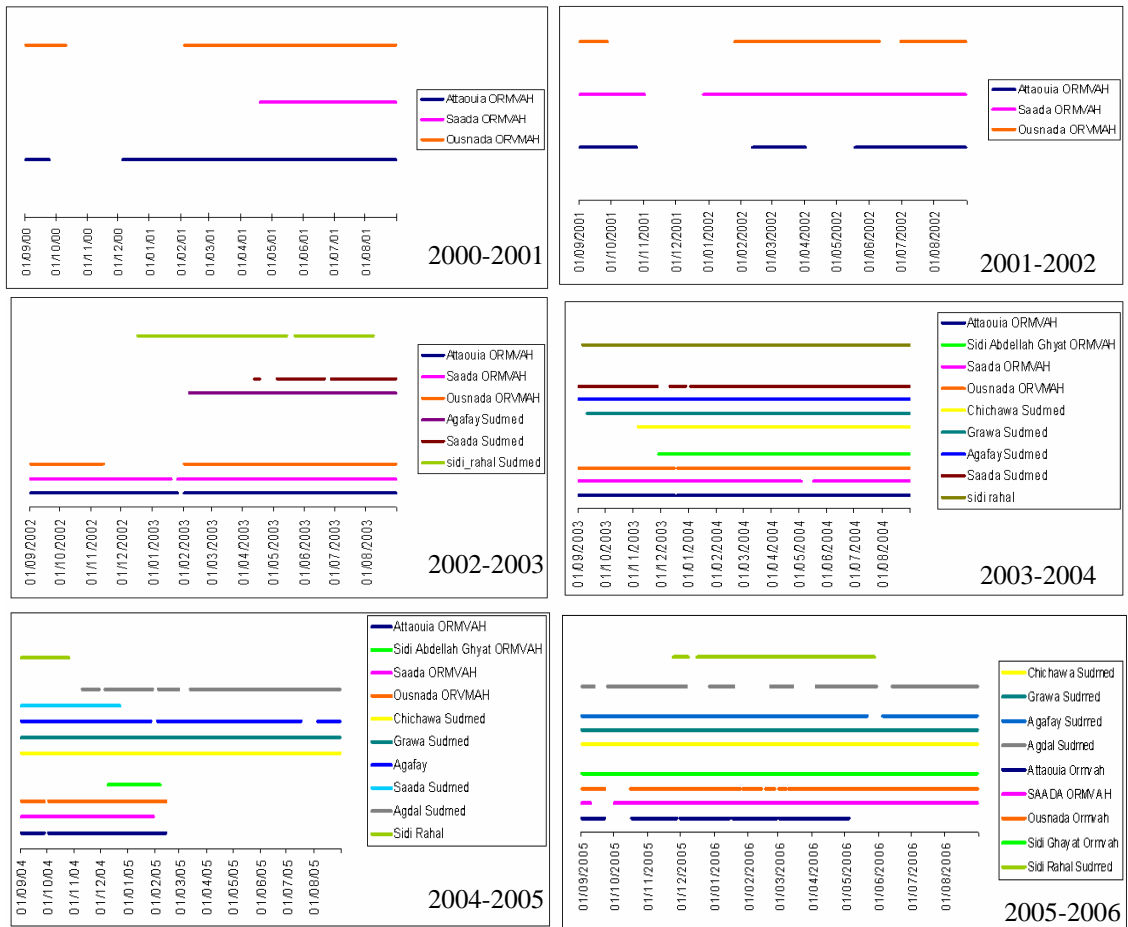


Figure II.23: Inventaire des stations météorologiques de 2000 à 2006 et période de disponibilité des données (traits pleins).



Figure II.24: Exemple de station météorologique SudMed installée dans le secteur irrigué NFIS.

II-3.2.2 Les sorties du modèle météorologique

Nous disposons des variables climatiques simulées par l'application « Al Bachir », version marocaine du modèle Aladin sur la saison 2002-2003. Il s'agit d'un modèle à aire limitée de prévision du temps couplé avec Arpège (Modèle français élaboré à Météo France). Les données climatiques (vitesse du vent, humidité relative, rayonnement globale et température de l'air à 2 m) sont données sous forme de maillage de point de résolution de 16 km (Figure II.25). Les données climatiques journalières issues de la grille DMN ont permis de calculer l'*ETO* dans chaque point. Comme résultat, nous obtenons des cartes d'*ETO* journalières à la résolution de 16 km sur la saison 2002-2003.

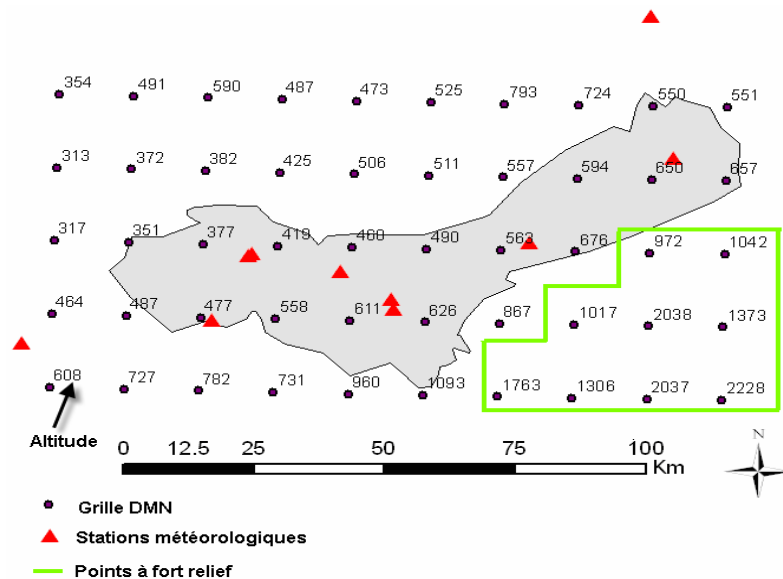


Figure II.25: Points de la grille du modèle météorologique « Al Bachir» de la Direction Régionale de la Météorologie (DMN) autour de la plaine du Tensift. L'altitude de chaque point est mentionnée.

La comparaison des données climatiques simulées et collectées a fait l'objet d'une étude (Amrhar 2004) qui a montré que ces jeux de données étaient cohérents du point de vue spatial et temporel. Cependant, cette étude a également mis en relief des biais importants attribuables aux conditions de mesures (il est difficile de trouver un emplacement correspondant aux normes de mesures dans la région de Marrakech) et

aux erreurs de simulations. Nous avons donc décidé d'utiliser les données du modèle pour appréhender la variation spatiale de l'*ETO* dans le processus de spatialisation.

II-3.2.3 Spatialisation de l'*ETO*

Seules deux stations de mesures fournissent des données d'évapotranspiration de référence en continue durant la période d'étude (septembre 2000 à août 2006), et les simulations par le modèle « Al Bachir » couvraient une seule saison agricole. Nous avons donc décidé de combiner ces deux sources d'information afin de spatialiser l'évapotranspiration de référence. L'idée est d'utiliser les simulations pour appréhender les variations spatiales de l'*ETO*, (après lissage temporel) qui fournissent un modèle d'interpolation/extrapolation. Les variations temporelles sont reproduites par calage sur les observations des deux stations qui ont fourni des données de 2000 à 2006. L'hypothèse sous-jacente est que les variations spatiales de l'*ETO* simulée par « Al Bachir » en 2002-2003 sont caractéristiques de la région d'étude. Le principe de l'algorithme est illustré sur la Figure II.26. Il fonctionne comme suit:

- 1) les données simulées sont moyennées en utilisant une fenêtre temporelle glissante de trente jours (en chaque point de la grille), pour extraire une image d'*ETO* qui inclut la variabilité spatiale autour du jour j . Au cours de ce procédé, nous avons remplacé les valeurs d'*ETO* sur les points de montagne (situés aux abords de la région d'étude, au sud-est, Figure II.25), non représentatives de celles de la plaine. Cette opération est réalisée par un algorithme de propagation à partir des points de mesures les plus proches des points éliminés (par exemple, sur la figure II.25, la valeur de l'*ETO* au point d'altitude 972 m a été remplacée par une moyenne des deux points de la plaine l'entourant, aux altitudes 676 et 650 m);
- 2) pour chaque jour j , le niveau moyen de cette image est corrigé par translation de telle sorte que l'écart entre les deux stations précitées et l'image, plus précisément les valeurs de l'image aux deux points de grille correspondant à ces stations, soit minimal ;
- 3) Les cartes d'*ETO* sont sur-échantillonnées de leur résolution nominale (16 km) à celle de MODIS (270 m).

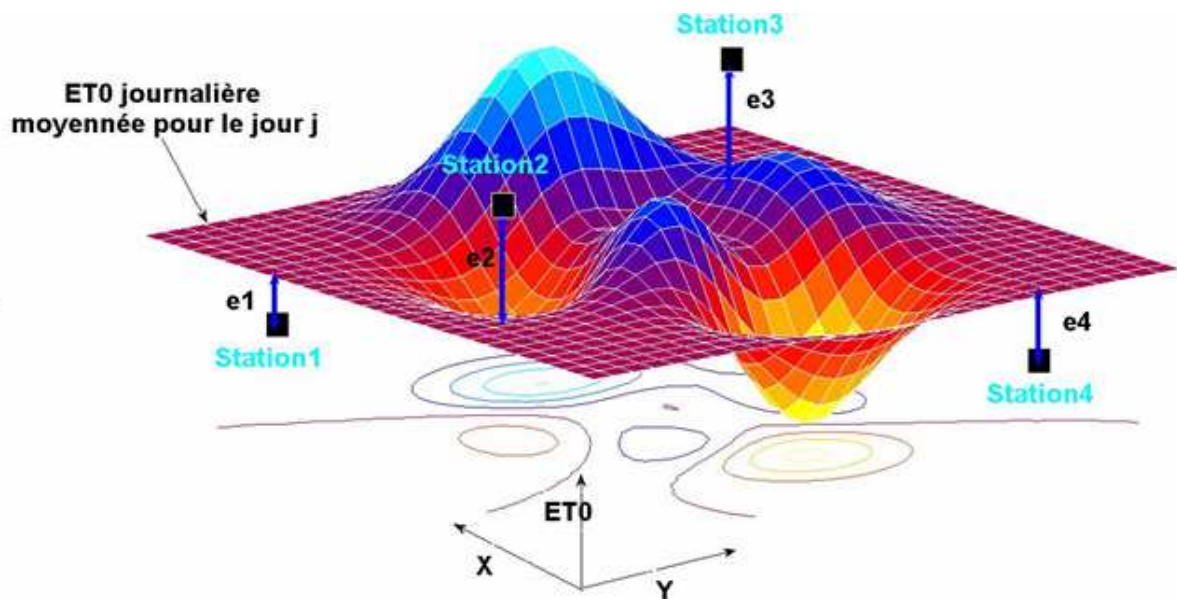


Figure II.26 Exemple illustrant l'opération de spatialisation de l'ET0

Les cartes et les statistiques des cumuls annuels, c'est-à-dire de septembre à août pour chaque saison étudiée (2000-2006), sont présentées en Figure II.27 et Tableau II.5. Les valeurs des cumuls moyens de l'ET0 sont en accord avec ce que l'on observe sur la région (autour de 1500 mm/an) avec des valeurs plus importantes pour les trois saisons 2000-2001, 2002-2003 et 2004-2005 (~1600 mm). On remarque également un gradient de l'ET0, d'ouest en est. Ces gradients s'expliquent par la présence d'un couloir de vent dans la partie de la plaine située entre les montagnes de l'Atlas au sud et à l'est de la zone d'étude et les *Jbilet*s au nord (cf. Figure II.6).

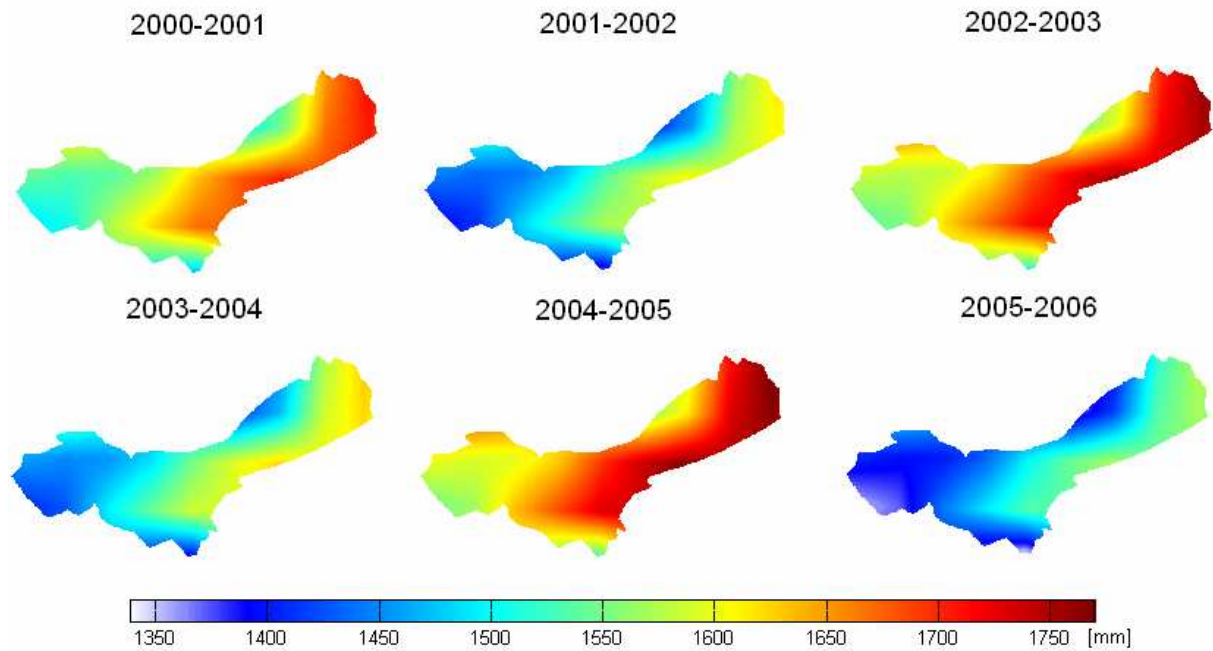


Figure II.27: Cumuls annuels de l'ET0 à la résolution de 270 m (de 2000-2001 à 2005-2006).

Tableau II.5: Cumuls annuels de l'ET0 sur la plaine du Tensift.

Saison	min	max	moyenne
2000-2001	1473.6	1710.8	1603.9
2001-2002	1377.6	1614.8	1507.9
2002-2003	1520.9	1758.1	1651.3
2003-2004	1391.5	1627.1	1521.1
2004-2005	1533.5	1770.8	1663.9
2005-2006	1337.6	1574.8	1468.0

Pour avoir une indication sur la qualité de l'estimation de l'ET0, nous avons comparé les estimations journalières de l'ET0 générées par l'algorithme de spatialisation aux observations de l'ET0 déduites des données des cinq stations SudMed n'ayant pas servi lors de la spatialisation. La comparaison est effectuée à partir de la saison 2002-2003, année à partir de laquelle les stations SudMed étaient opérationnelles. Les résultats de la comparaison sont présentés dans la Figure II.28 et le Tableau II.6. Les indicateurs statistiques classiques (RMSE, corrélation, biais et coefficient de régression, cf. annexe 3) ont été calculés. L'erreur moyenne sur l'estimation varie entre 3 % (cas de 2003-2004) et 12 % (cas de 2004-2005). Les coefficients de corrélation sont en moyenne

autour de 0.9 et les RMSE sont en dessous de 1.5 mm. Ces résultats montrent que les estimations sont en général de bonne qualité. Toutefois, il existe des erreurs locales importantes (cas de la station Agdal qui affiche respectivement 27 % et 19 % en 2004-2005 et 2005-2006). Ces erreurs peuvent être attribuées à l'emplacement de la station d'Agdal. Cette dernière est située dans un grand parcellaire cultivé majoritairement en olivier et agrume. Cet emplacement n'est pas adéquat pour mesurer l'*ET₀* qui est censée caractériser une surface de gazon dans des conditions optimales.

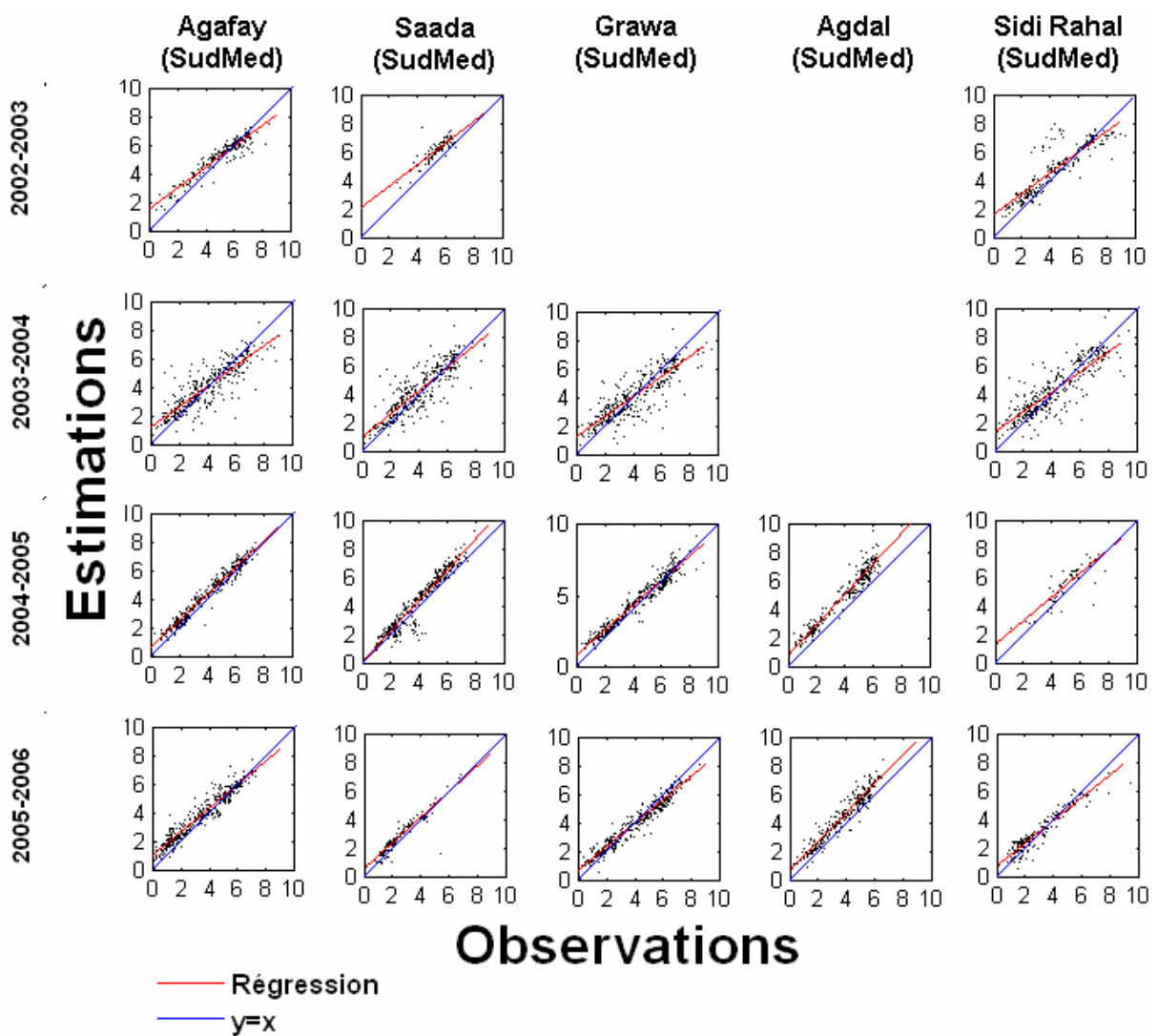


Figure II.28: *ET₀* journalières estimées en fonction de celles données par les cinq stations SudMed.

Tableau II.6: Statistiques entres les ET0 estimées et observées sur les cinq stations SudMed.

Saison	Station	Nombre de jour	RMSE [mm]	R ²	Biais	a [*]	b [*]	Cumul annuel observé [mm]	Cumul annuel estimé [mm]	Pourcentage d'erreur ^{**}
2002-2003	Agafay (SudMed)	207	0.63	0.94	0.22	0.74	1.53	1039.6	1085.2	4.4%
	Saada (SudMed)	121	0.89	0.85	0.78	0.77	2.05	656.3	750.5	14.4%
	Sidi Rahal (SudMed)	228	1.09	0.88	0.41	0.73	1.58	1008.3	1101.5	9.2%
Moyenne										9.3%
2003-2004	Agafay (SudMed)	366	0.97	0.86	0.11	0.72	1.21	1425.8	1466.7	2.9%
	Saada (SudMed)	348	0.95	0.86	0.24	0.82	0.95	1374.0	1456.3	6.0%
	Grawa (SudMed)	356	1.01	0.86	0.05	0.71	1.25	1454.0	1472.3	1.3%
	Sidi Rahal (SudMed)	361	1.13	0.88	0.03	0.70	1.32	1577.3	1587.3	0.6%
Moyenne										2.7%
2004-2005	Agafay (SudMed)	341	0.53	0.98	0.39	0.94	0.63	1346.4	1478.2	9.8%
	Saada (SudMed)	360	0.68	0.96	0.39	1.09	0.03	1480.5	1621.3	9.5%
	Grawa (SudMed)	365	0.55	0.97	0.26	0.88	0.79	1572.5	1666.5	6.0%
	Agdal (SudMed)	273	1.14	0.97	1.02	1.07	0.74	1040.6	1319.7	26.8%
	Sidi Rahal (SudMed)	56	0.88	0.83	0.45	0.84	1.26	281.2	306.3	8.9%
Moyenne										12.2%
2005-2006	Agafay (SudMed)	352	0.72	0.95	0.43	0.83	0.99	1189.8	1341.1	12.7%
	Saada (SudMed)	131	0.55	0.94	0.26	0.91	0.52	361.6	395.9	9.5%
	Grawa (SudMed)	365	0.51	0.97	-0.02	0.83	0.67	1478.3	1470.6	0.5%
	Agdal (SudMed)	269	0.86	0.96	0.70	1.02	0.62	974.1	1163.7	19.5%
	Sidi Rahal (SudMed)	179	0.58	0.95	0.09	0.80	0.71	561.0	576.5	2.8%
Moyenne										9.0%

* Coefficient de la droite de régression: ET0 estimé = a x ET0 observé + b

$$** \text{ Pourcentage d'erreur} = \left| \frac{\text{cumul observé} - \text{cumul estimé}}{\text{cumul observé}} \right| \times 100$$

II-3.3 Cartes pédologiques

Les cartes de réserve utile ont été générées par Bernard Mougnot sur la base des documents de l'ORMVAH (cartes pédologiques existantes et cartes géologiques) et d'analyses granulométrique et infiltrométrique effectuées sur le terrain (Benabdelouahab 2005; Plantecoste 2002). Les humidités au point de flétrissement et à la capacité au champ (cf. I-4.3.2) ont été évaluées par application de la fonction de pédo-transfert de Wosten. La réserve utile est déduite de ces humidités et de la profondeur du sol. On montre sur la Figure II.29 et II.30, les cartes sur la plaine et sur le secteur irrigué test R3 respectivement réalisées sur la base de document au 1/500000^{ème} et au 1/20000^{ème}. Sur R3, les sols argilo-limoneux prédominent, et les valeurs des

humidités au point de flétrissement et à la capacité au champ sont de l'ordre de 0.20 et 0.35 m³/m³, respectivement. Les tableaux des valeurs d'humidités par unité pédologique sont donnés en annexe 2.

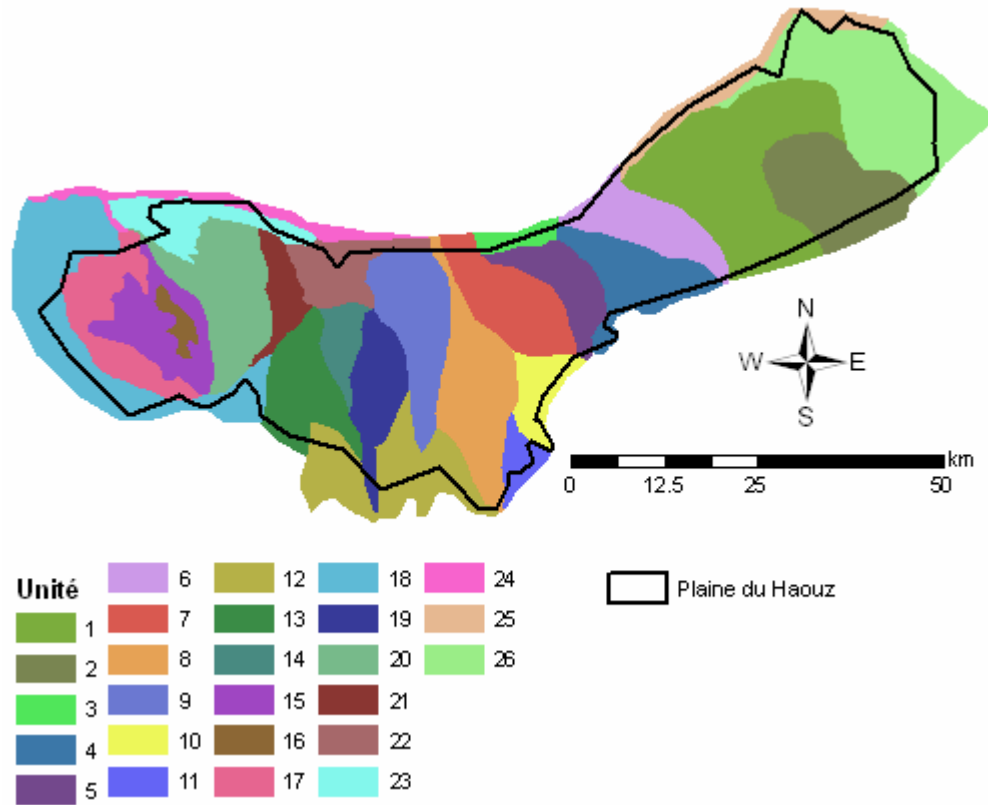


Figure II.29: Carte pédologique de la plaine de Tensift (les unités sont précisées en annexe 2).

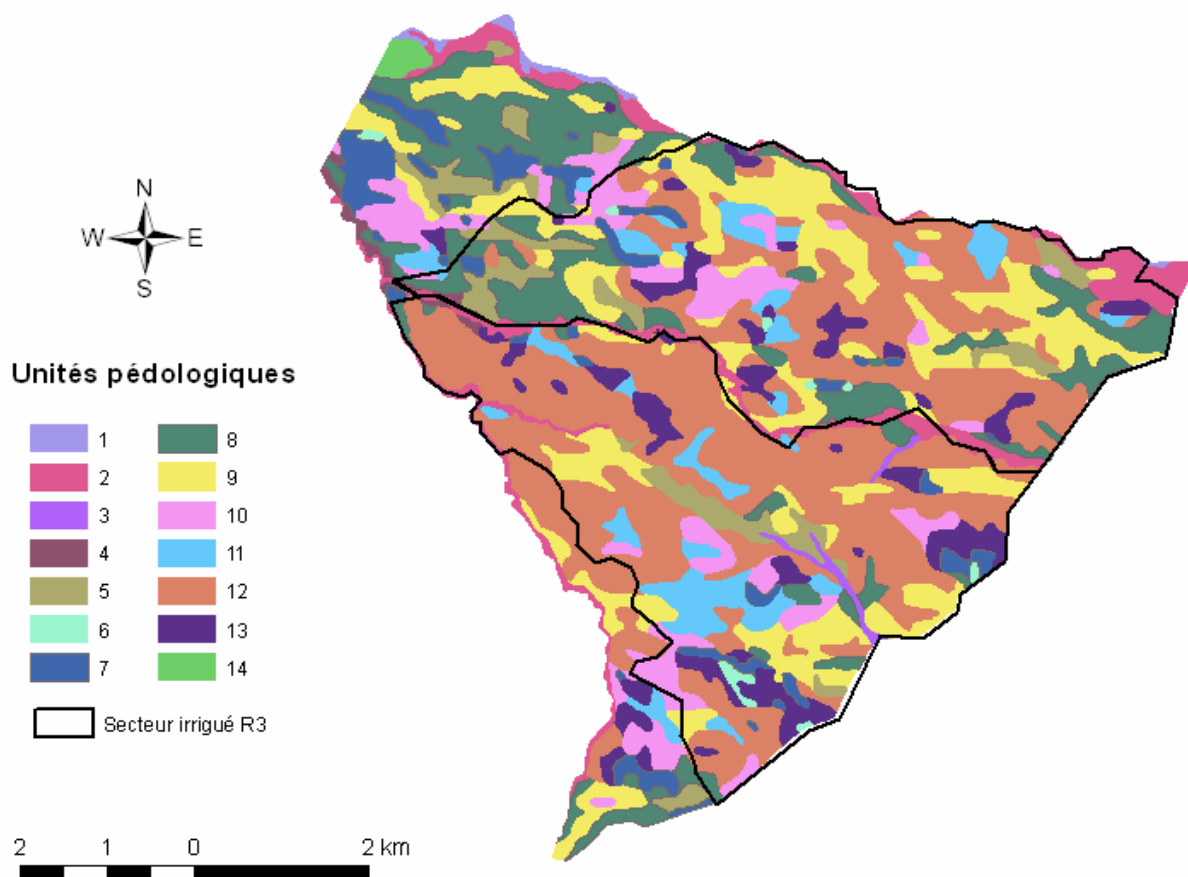


Figure II.30: Carte pédologique du secteur irrigué R3 (les unités sont précisées en annexe 2).

II-3.4 Relevé de l'occupation du sol

Les données d'occupation du sol ont été collectées durant deux campagnes expérimentales menées dans le cadre du projet SudMed (saisons agricoles 2002-2003 et 2005-2006). Nous avons mené des enquêtes de terrain pour identifier les types et classes de cultures. Les critères de choix des parcelles concernent leur représentativité (diversité des comportements phénologiques) et leur étendue (localisation sur les images satellites). Les protocoles de collecte sont de deux types : (1) un ensemble de parcelles non contiguës est échantillonné sur toute la zone d'étude pour diversifier les types de cultures et leur environnement agro-climatique ; (2) une partie du secteur R3 (environ 10 km²) est étudiée de manière exhaustive, comme support à la spatialisation.

En pratique, chaque parcelle visitée a été tout d'abord géographiquement localisée sur un support cartographique réalisé à partir des images à haute résolution spatiale. Les systèmes de positionnement GPS ont été utilisés lorsque la localisation était incertaine ou lorsqu'on se trouvait dans un milieu hétérogène. Une série de photos numériques ont été prises en complément des fiches descriptives.

Durant la saison 2002-2003, deux jeux de données ont été collectés. La première collecte, réalisée à la mi-mars 2003 dans le cadre du programme VALERI (<http://www.avignon.inra.fr/valeri/>), a permis d'échantillonner la partie centrale du secteur irrigué R3 (carré de 3 km x 3 km Figure II.31). L'ensemble des données comprenait 312 parcelles (Tableau II.7) constituées majoritairement de cultures céréalières (blé et orge, 60 % de la surface) et de jachère (20 % de la surface). Le deuxième jeu (Simonneaux et al. 2008) comprend environ 140 parcelles réparties sur toute la plaine, avec une majorité de vergers ayant des caractéristiques diverses en termes de types d'arbres, de densité de plantation et de végétation annexe (cultures concroisées ou herbacées « naturelles »).

En 2005-2006, deux jeux de données de vérité de terrain ont également été collectés. Une première enquête exhaustive a été menée sur le périmètre irrigué R3 avec plus de 400 parcelles renseignées (Tableau II.8). Cette enquête de terrain intensive a été réalisée par le biais de fiches techniques. Le deuxième jeu de données a été collecté en février 2006 sur une centaine de parcelles réparties autour du périmètre R3 sur la scène FORMOSAT-2 (Figure II.32).

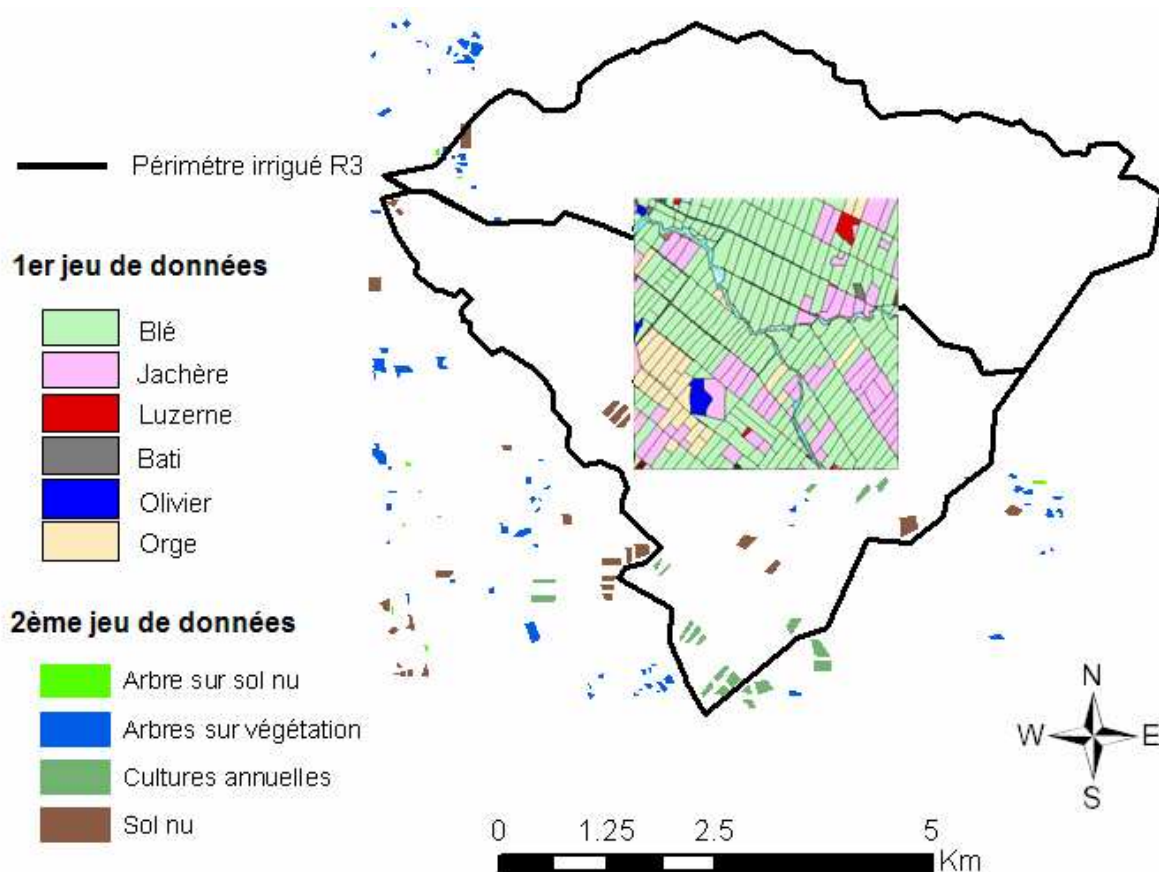


Figure II.31: Relevé d'occupation du sol en 2002-2003.

Tableau II.7: Echantillonnage de l'occupation du sol en 2002-2003.

Type de culture	Nombre de parcelle		
	R3	Reste zone	Total
Céréales	212	22	234
Orges	29	0	29
Jachère/non cultivé	59	0	59
Luzerne	4	0	4
Olivier	5	0	5
bâti	3	0	3
Arbre sur sol nu	0	11	11
Arbre sur végétation	0	77	77
sol nu=jachère	0	28	28
Total	312	138	450

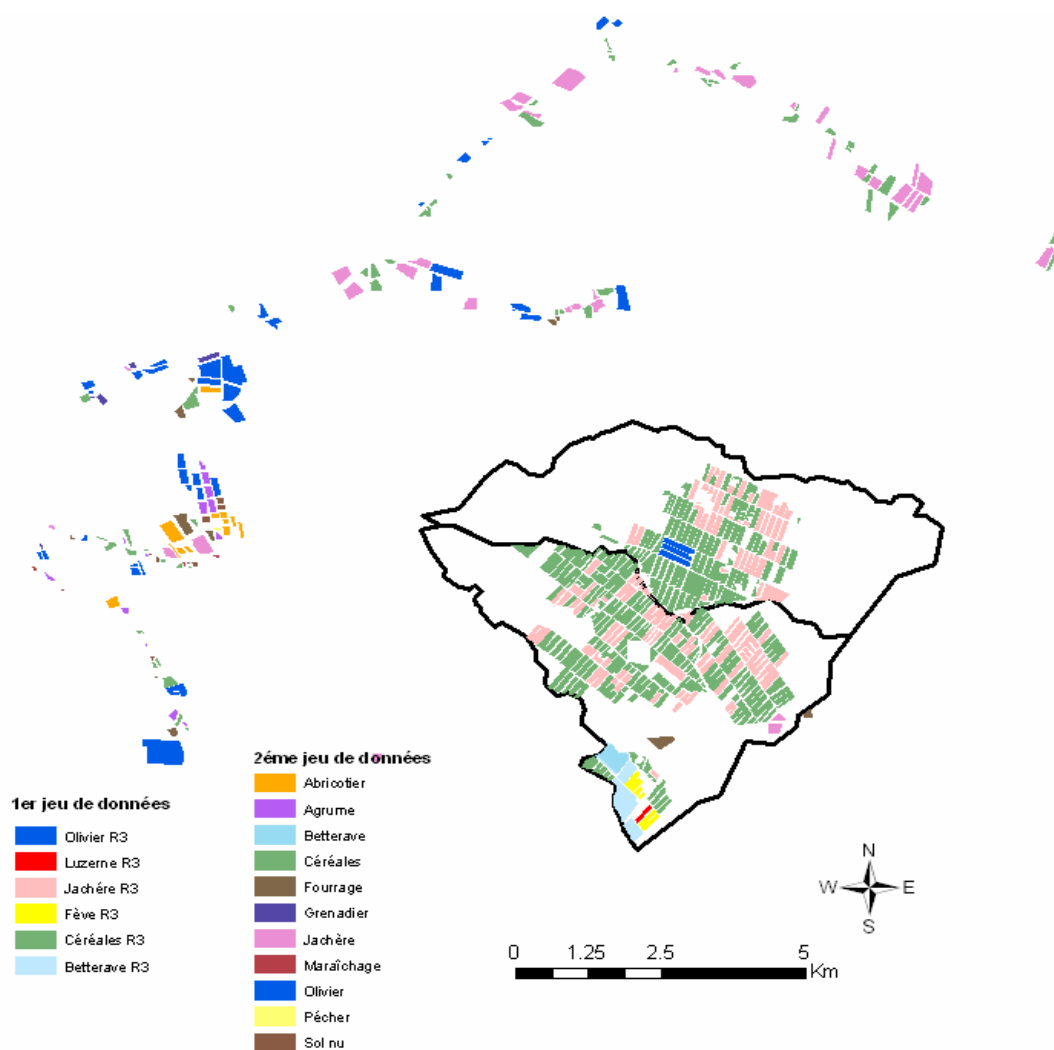


Figure II.32: Relevé d'occupation du sol en 2005-2006.

Tableau II.8: Echantillonnage de l'occupation du sol en 2005-2006.

Type de culture	Nombre de parcelle		
	R3	Reste zone	Total
Betterave	4	1	5
Céréales	281	92	373
Fève	6	0	6
Jachères/sol nu	124	55	179
Luzerne	1	0	1
Olivier	3	47	50
Serre	5	0	5
Abricotier	0	12	12
Agrume	0	13	13
Fourrage	0	20	20
Grenadier	0	5	5
Maraîchage	0	4	4
Pécher	0	1	1
Total	424	250	674

II-3.5 Variables biophysiques sol-plante et flux d'évapotranspiration

Ces variables ont été collectées sur plusieurs sites intensifs de mesures (une dizaine depuis 2002 sur oranger, oliviers et blé, cf. Chehbouni et al. 2008, Duchemin et al. 2006 et 2008). Certaines parcelles sont équipées de tours de mesures et de fosses-sol pourvus de capteurs électroniques pour le suivi des principaux termes des bilans hydrique et énergétique au pas de temps demi-heure: flux conductifs (plaquettes de flux), radiatifs (capteurs de rayonnement) et convectifs (anémomètre sonic 3D et hygromètre à très haute fréquence) au sein du système sol-plante-atmosphère; profil d'humidités du sol (sondes TDR : *Time-Domain-Reflectancy*). Les parcelles de céréales sont suivies en terme de radiométrie (réflectances à différentes longueurs d'onde à l'aide d'un radiomètre portable), de phénologie (développement, indice foliaire ou LAI, rendement...) et d'itinéraire technique (semis, irrigation...). Enfin, une station météorologique classique est installée pour obtenir le forçage climatique. Nous détaillons ci-dessous la mesure du LAI (sur céréales) et celle des flux d'évapotranspiration.

La technique utilisée pour déterminer cette variable repose sur l'acquisition et le traitement de photographies hémisphériques (Figure II.33). Elle présente de nombreux avantages : faible coût de l'instrument (environ 1 k€), facilité et rapidité d'utilisation sur le terrain, représentativité spatiale, mémoire visuelle du système étudié. Le système de mesure est composé d'un simple appareil photographique numérique muni d'un objectif grand angle (180°). Lorsque les prises de vue sont verticales, ce système permet d'appliquer une théorie développée par Warren-Wilson (1959) pour les couverts homogènes (voir également la revue de Weiss et al. (2003), que l'on résumera par l'équation suivante :

$$LAI = 2 \times \int_0^{\frac{\pi}{2}} K \times w(\theta) \times d\theta \quad (\text{Eq. II.3})$$

Où K dépend du taux de couvert directionnel et θ est l'angle de visée.

Le principe de traitement des photographies - matrices de dimension 3 : hauteur, largeur et couleur (canaux rouge, vert et bleu) de la scène - est résumé en Figure II.33. Il s'agit : 1) d'extraire la partie utile de la matrice (masquer l'opérateur et les forts angles qui sont hors du système étudié) ; 2) de procéder à une classification binaire sol/végétation; 3) d'extraire les taux de couverture du sol par la végétation sur des anneaux concentriques associés à des angles de visée fixes ; 4) de calculer les taux de couvertures directionnel moyen sur les clichés pris pour un échantillon (environ 10 à 15 photographies). L'étape de binarisation repose sur le seuillage d'un indice de verdure, procédure simple qui permet une automatisation complète du traitement une fois le seuil déterminé.

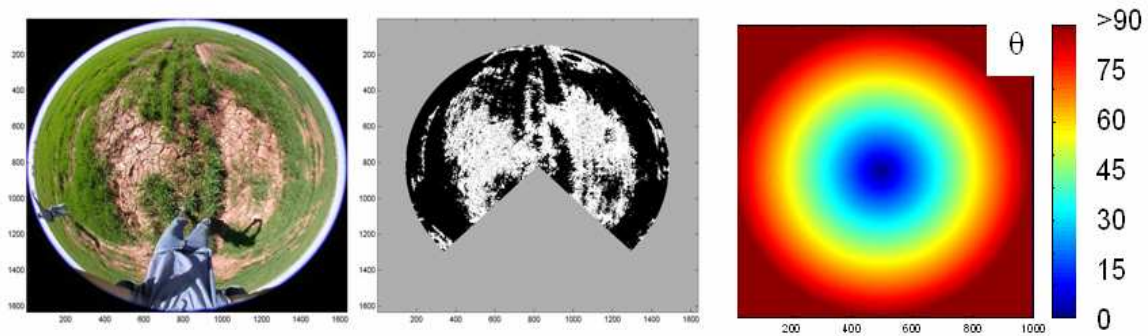


Figure II.33: Exemple de photographie hémisphérique sur un couvert de blé (à gauche), image binaire sol (en blanc)-végétation (en noir) et angle de prise de vue associés (au milieu et à droite).

Le traitement de nombreux clichés est possible car le procédé est entièrement automatisé. Ceci permet de privilégier l'échantillonnage spatial et temporel (1800 photos ont été analysées pour la saison 2002-2003). Le logiciel permet l'obtention du taux de couverture du sol par la végétation (en directionnel) et de l'indice foliaire, variables d'intérêt pour la modélisation du transfert radiatif, de l'activité photosynthétique et de la partition évaporation-transpiration. A titre d'exemple, la relation entre LAI et taux de couverture du sol par la végétation (en visée verticale) est présentée en Figure II.34. La comparaison par rapport aux données allométriques (Figure II.35) a permis une validation du procédé.

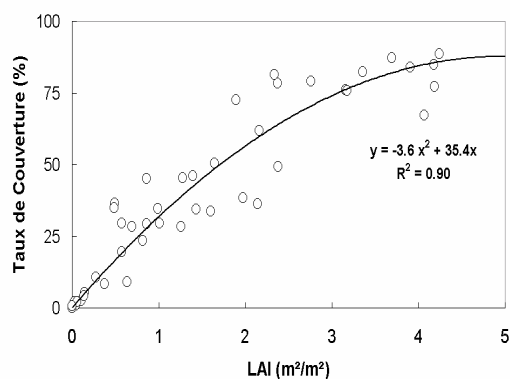


Figure II.34: Relation entre taux de couverture et LAI du blé.

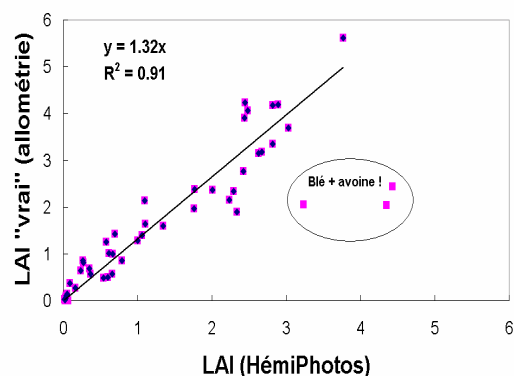


Figure II.35: Comparaison entre le LAI « vrai » et celui dérivé des photographies hémisphériques.

Les traitements des données acquises en 2002-2003 avaient été réalisés avant le début du présent travail. Dans le cadre de cette thèse, j'ai participé à la collecte des données en 2005-2006 (Duchemin et al. 2008) et à leur dépouillement. Ces données ont permis de calibrer la relation entre indices de végétations mesurés par FORMOSAT-2 et indice foliaire.

Les flux d'évapotranspiration ont été mesurés à l'aide de systèmes d'Eddy corrélation installés sur neuf sites (Figure II.36 et Tableau II.9): quatre parcelles de blé durant les saisons agricoles 2002-2003 et 2003-2004, et cinq plantations d'olivier et d'oranger de 2002 à 2006. L'évapotranspiration est déduite de mesures synchrones de la turbulence et de l'humidité de l'air réalisées au moyen d'anémomètres soniques et d'hygromètres à haute fréquence (10 ou 20 hz). La base de données est conséquente, environ 1400 jours de mesures dont le quart sur céréales.



Figure II.36: Localisation des neuf sites d'expérimentations dans la plaine du Tensift.

Tableau II.9: Mesures du flux d'évapotranspiration sur les neuf sites du projet SudMed (N est le nombre de jours de mesures).

Type	Nom du site (Notation)	Type d'irrigation	Période de mesure	Année	N	Evapotranspiration cumulée (mm)
Blé	B130(CA1)	Par inondation	20/03/2003-08/05/2003	2003	44	160.8
Blé	B123 (CA2)	Par inondation	05/02/2003-20/05/2003	2003	71	240.9
Blé	B27 (CA3)	Par inondation	17/03/2003-20/05/2003	2003	55	145.3
Blé	B124 (CA4)	Par inondation	25/12/2003-19/05/2004	2003-2004	147	329.8
Olivier	Agdal (AR1)	Par inondation	01/03/2003-18/11/2003	2003	245	654.6
Olivier	Agdal (AR2)	Par inondation	04/03/2004-26/09/2004	2004	199	620.2
Oranger	Saada (AR3)	Par inondation	01/01/2004-22/12/2004	2004	276	573.8
Oranger	Saada (AR4)	Goutte-à-goutte	24/03/2005-07/11/2005	2005	204	579.6
Olivier	Olivier R3 (AR5)	Goutte-à-goutte	01/03/2006-31/08/2006	2006	178	492.9

II-3.6 Données d'irrigation

Les données d'irrigation ont été collectées auprès des organismes chargés de la gestion de l'eau des barrages (ORMVAH/ABHT). Il s'agit:

- Des volumes mensuels d'irrigation transitant par les prises primaires et alimentant les sous-secteurs irrigués des périmètres NFIS, Haouz central et Tessaout Amont (cf. II.2.4);
- Des données d'irrigation journalières distribuées au niveau des canaux tertiaires au sein du périmètre irrigué R3, acquises lors de l'expérience FORMOSAT/Tensift en 2005-2006 (cf. II.2.5);
- Des résultats d'une enquête de terrain pour localiser les ouvrages servant à prélever l'eau dans la nappe réalisée sur le secteur R3 en 2003-2004 (Carriou 2004).

A l'échelle de la plaine, les données d'irrigation sont disponibles pour la période de notre étude (six années de 2000 à 2006) pour les trois secteurs irrigués présentés précédemment (NFIS, Haouz central et Tessaout Amont). Nous avons recueilli ces données à la maison mère de l'ORMVAH à Marrakech. Il s'agit de volumes mensuels de l'eau d'irrigation distribués au niveau des prises primaires de distribution pour chaque sous secteur. Ces données sont présentées en Figure II.37. On remarque une tendance générale à l'augmentation de 2000 à 2006, avec deux périodes distinctes: 2000-2002 (volumes faibles) et 2003-2006 (volumes élevés). Des différences peuvent être notées au niveau de l'année de transition d'un « régime » à l'autre, l'année pivot étant soit 2002-2003, soit 2003-2004 et plus rarement 2004-2005. On note également

que dans la plupart des cas, la dotation en eau pour l'irrigation pour la saison 2001-2002 est nettement inférieure aux autres années. Ceci est dû essentiellement à la période de sécheresse qu'a enregistrée la région de 1999 à 2001 (pluviométrie à Marrakech autour de 100 mm en 2000-2001 et surtout des précipitations réduites en montagne (Boudhar et al. 2007)).

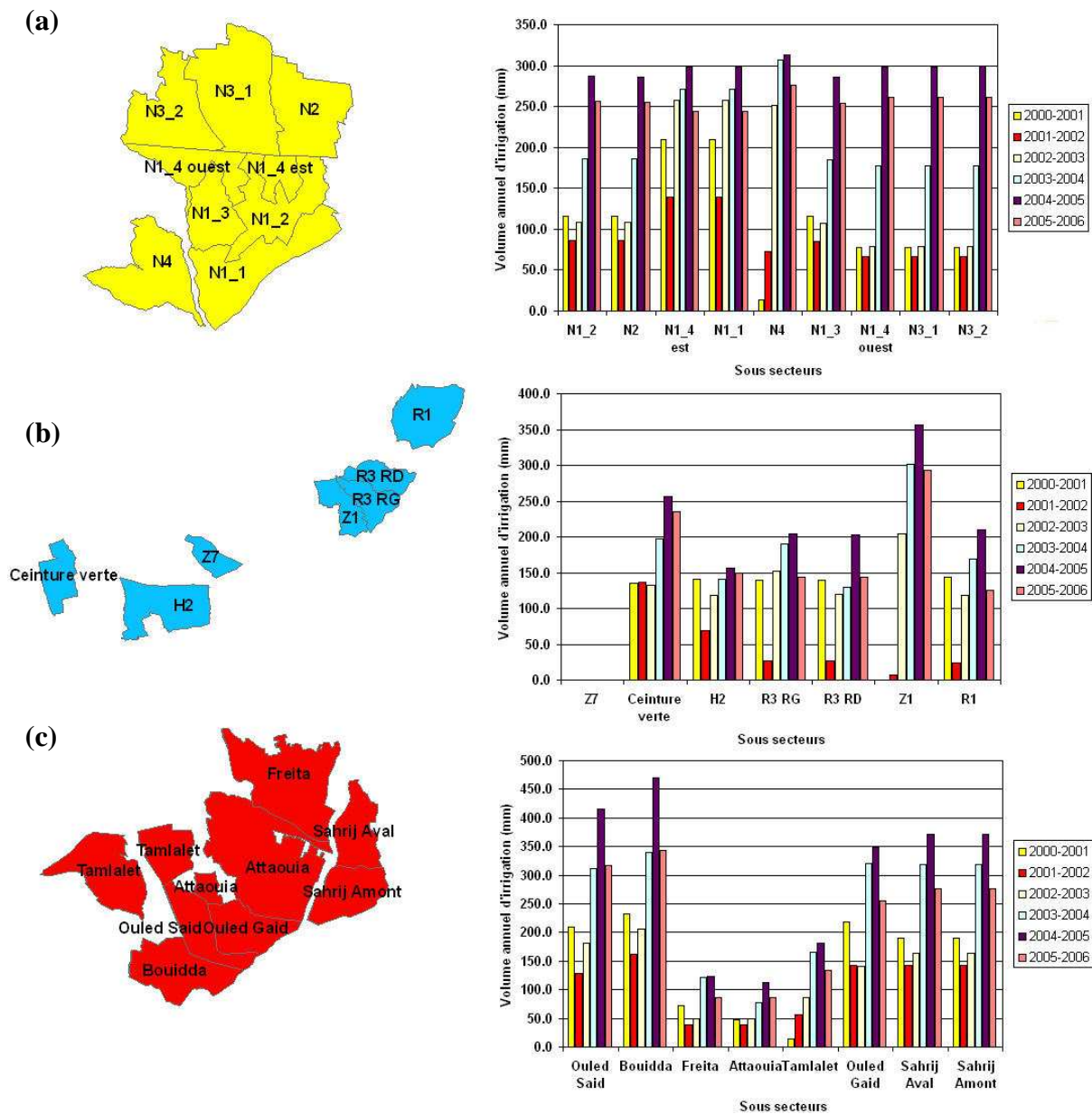


Figure II.37: Sous secteurs irrigués (gauche) et volumes annuels d'irrigation (en mm) par sous secteur (droite) des périmètres du NFIS (a) ; Haouz central¹⁶ (b) et Tessaout Amont (c).

¹⁶ Le sous-secteur Z7 ne reçoit aucune dotation en eau de l'ORMVAH

Durant la saison agricole 2005-2006, nous avons collecté chaque mois des informations sur les périodes des tours d'eau (début et fin en jour et heure) et sur le débit au niveau des différents tertiaires qui forment le secteur R3 (cf. Figure II.14). Ces données ont été récoltées durant la saison de cultures des céréales, de décembre 2005 à mai 2006. Elles ont été ensuite converties en volumes d'eau journaliers en m³. Vu que nous ne disposons d'aucune information sur la manière avec laquelle ces volumes ont été spatialement distribués au niveau des parcelles de chaque tertiaire, nous avons jugé utile de travailler à l'échelle du tertiaire et non de la parcelle.

Sur ce même secteur, une enquête avait été préalablement réalisée pour recenser les puits et forages servant à prélever l'eau dans la nappe (Carriou 2004). L'enquête a été menée auprès de tous les exploitants agricoles du secteur. On a ainsi dénombré 64 ouvrages, répartis en majorité sur la rive droite de R3 (Figure II.38). En plus de la localisation de ces ouvrages par GPS, il a été tenté de collecter des informations relatives à leur usage (propriétaire, date de mise en service, profondeur totale, niveau piézométrique, historique des cultures et des superficies alimentées et débit de la pompe). Ces informations ont cependant été jugées insuffisamment fiables (du fait de la réticence des exploitants à délivrer certaines informations et l'absence de documents relatifs à la gestion des exploitations) pour être exploitées de manière quantitative au cours de cette étude. Seule l'information concernant la localisation des puits a été utilisée pour tenter d'expliquer les écarts possibles entre les volumes d'irrigation estimés à partir des images satellites et les volumes d'eau des barrages (données de l'ORMVAH).

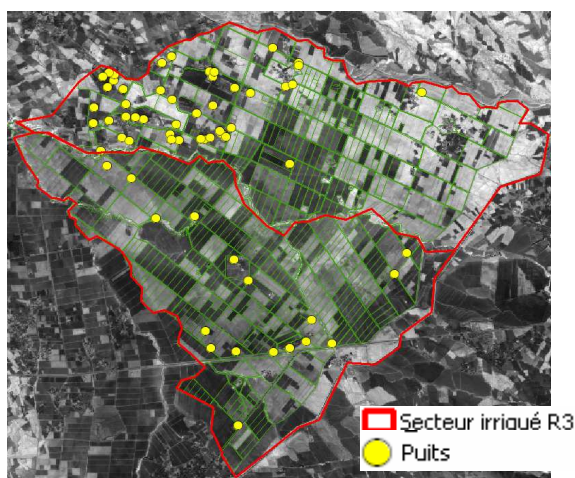


Figure II.38: Localisation des puits sur le secteur irrigué R3.

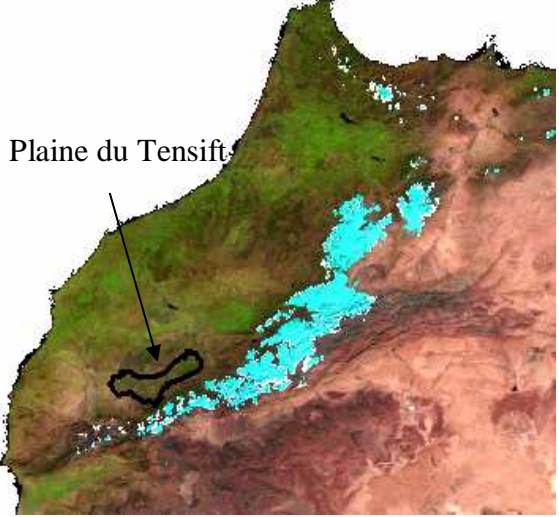
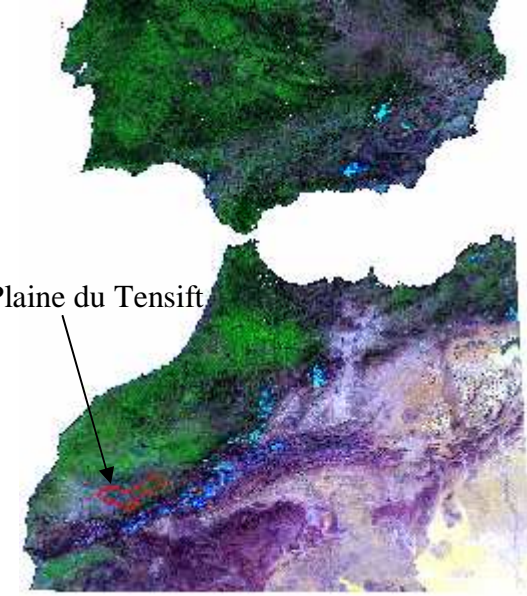
II-4 DONNEES SATELLITES

Nous avons collecté les images MODIS et VEGETATION sur toute la période d'étude, soit six saisons agricoles successives de septembre 2000 à août 2006. Les images MODIS sont des synthèses bi-mensuelles de *NDVI* réalisées par l'algorithme d'assemblage CV-MVC (144 produits MOD13Q1, Huete et al. 1999 et 2000; cf. I.3.1.2). Les images VEGETATION sont des synthèses décennales de *NDVI* générées par la méthode « Maximum Value Composite » (216 produits S10, Maisongrande et al. 2004). Toutes les images ont été vérifiées visuellement. Seules trois images MODIS ont été éliminées car elles présentaient des défauts géométriques évidents. La grande majorité des images paraissait de bonne qualité en première analyse. Ceci n'est pas surprenant étant donné le faible ennuagement de la région d'étude (entre 20 et 45 % selon les saisons, d'après Hadria et al. 2006). Afin d'automatiser les chaînes de traitement, ces images ont été remplacées par interpolation de l'image précédente et suivante. Le prétraitement comprend :

- l'extraction de sous-images correspondant au bassin versant du Tensift;
- le rééchantillonnage bilinéaire à des résolutions multiples de 30 m, soit 270 m pour MODIS et 990 m pour VEGETATION; ce rééchantillonnage a été opéré pour faciliter les opérations de superposition avec les données à haute résolution spatiale;
- L'application d'un masque pour supprimer les pixels qui n'appartiennent pas à notre région d'étude (Tableau II.10);
- La reprojexion des données dans le système cartographique local, Lambert Nord Maroc¹⁷ ;
- La constitution de séries d'images acquises pour une saison agricole (de septembre à août) et l'extraction des profils de *NDVI*.

¹⁷ La projection Lambert Nord Maroc est une projection conique conforme dont le parallèles de référence est à la latitude de 33° 18' et qui repose sur l'ellipsoïde de Clarko 1880;

Tableau II.10: Exemples d'images SPOT VEGETATION et MODIS et localisation de la zone d'étude.

<p><i>SPOT/VEGETATION</i> <i>21/01/2003</i> <i>Bandes (4, 3 et 2)</i></p>	<p>Plaine du Tensift</p> 
<p><i>MODIS</i> <i>17/01/2003</i> <i>Bandes (7,5 et 3)</i></p>	<p>Plaine du Tensift</p> 

En complément des données à basse résolution, on dispose de deux séries de données satellites à haute résolution spatiale SPOT/Landsat et FORMOSAT-2 durant les saisons agricoles de 2002-2003 et de 2005-2006.

Le jeu de données de 2002-2003 a été obtenu par programmation croisée d'acquisition SPOT (4 et 5) et Landsat. Cinq images Landsat TM et cinq images SPOT non nuageuses ont été acquises du 7 novembre 2002 au 20 juin 2003 (Tableau II.11). Pour chacun des capteurs, une image a été géoréférencée sur la base de points d'amers répartis sur la scène et collectés par GPS ; les autres images ont été superposées à l'image de référence par correction image-image. La précision de la correction géométrique a été évaluée à environ 1 pixel. Les images SPOT ont été rééchantillonnées à la résolution de Landsat (30 m). Toutes les images ont été corrigées des effets atmosphériques grâce à un modèle de correction physique développé au CESBIO, SMAC (Berthelot and Dedieu 1997; Rahman and Dedieu 1994). Etant donné les incertitudes sur l'épaisseur optique des aérosols (non mesurée en 2002-2003), cette correction a été complétée par une inter-calibration effectuée à partir de cibles invariantes et de mesures de réflectances de surface (Simonneaux et al. 2008). Ces mesures ont été réalisées le long de transects à l'aide d'un radiomètre portable (Cropscan) dont les bandes spectrales sont similaires à celles de TM (Duchemin et al. 2006). Finalement, le *NDVI* (cf. I-4.2) a été calculé à partir des bandes spectrales dans le rouge et le proche infrarouge (pour SPOT B2 et B3, et pour landsat B3 et B4, cf. I-3.2). Pour finir, des extractions ont été effectuées sur la région d'étude (cf. Figure II.6).

Tableau II.11: Dates de la série temporelle d'images Landsat 7 et SPOT4/5.

Capteur	Date	Résolution spatiale (m)
ETM7	07/11/2002	30
ETM7	25/12/2002	30
ETM7	26/01/2003	30
ETM7	11/02/2003	30
SPOT4	04/03/2003	20
SPOT4	25/03/2003	20
SPOT4	26/04/2003	20
ETM7	18/05/2003	30
SPOT5	26/05/2003	10
SPOT5	20/06/2003	10

La série temporelle d'images FORMOSAT-2 a été collectée pendant la saison agricole 2005-2006 (Duchemin et al. 2008b). De décembre 2005 à juin 2006, une quarantaine d'observations ont été acquises à une résolution de 8 m et avec un angle de prise de vue constant ($18^\circ \pm 1^\circ$). La zone d'acquisition (24x27 km) est centrée sur le périmètre irrigué

R3 à 40 km à l'Est de Marrakech (cf. Figure II.11 et Tableau II.12). Elle inclut une partie des *Jbilet*s au nord et une partie du piémont au sud. On présente la couverture nuageuse associée à ces acquisitions (Figure II.39). Les images étaient programmées tous les quatre jours, mais des problèmes de programmation ont limité le nombre d'acquisition fin janvier/début février ainsi qu'au début et à la fin du mois d'avril. De plus, un fort ennuagement a empêché la production d'images totalement claires entre le 18 janvier et le 8 mars 2006. Au total, dix sept images ont été conservées après l'élimination de deux images (06/05/2006 et 10/05/2006) sur lesquelles on a observé des nuages très fins difficiles à détecter en première analyse.

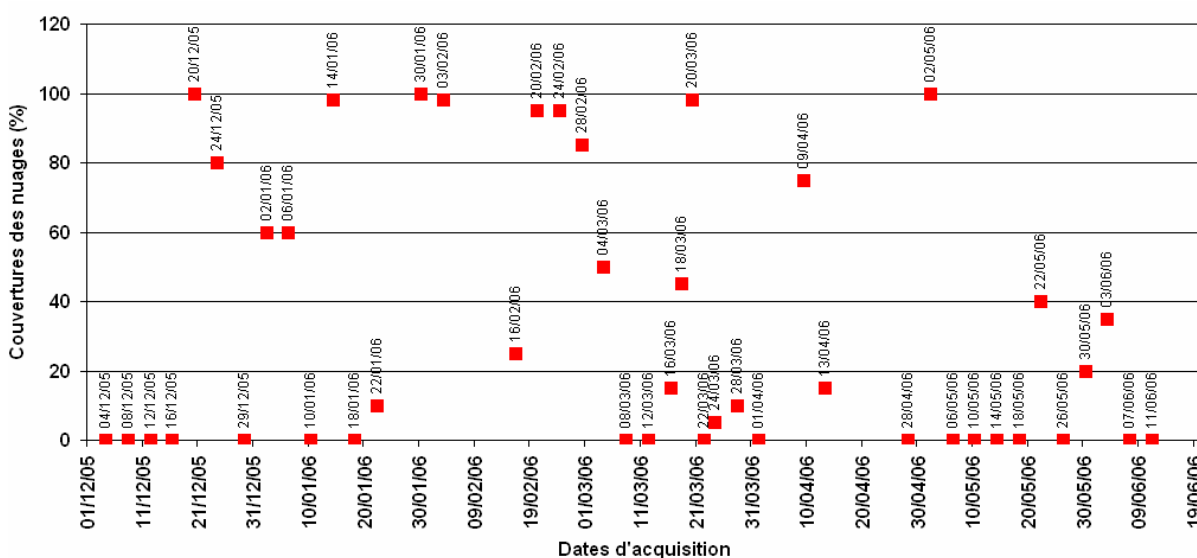





Figure II.39: Couvertures des nuages (%) en fonction des dates d'acquisition.

SPOT-Image a fourni le produit FORMOSAT-2 au niveau 1A (produit étalonné non corrigé géométriquement et non corrigé de l'atmosphère). Le traitement des images FORMOSAT-2 a été réalisé par le CNES avec les outils développés dans le cadre de la préparation de la mission Venus. Les images ont été superposées à une image de référence, préalablement rectifiée à l'aide de points d'amers collectés par GPS et projetés dans le système Lambert Nord Maroc, en utilisant un algorithme de corrélation croisée. La correction atmosphérique a été réalisée à l'aide du modèle SMAC alimenté par des données de vapeur d'eau et d'épaisseur optique des aérosols mesurée par deux

photomètres solaires (CIMEL). La qualité de la correction est discutée par Hagolle et al. (2008). Le produit final est une série temporelle de dix sept images (décembre-juin) de *NDVI* non nuageuses calculées à partir des réflectances dans le rouge et le proche infrarouge.

Tableau II.12: Exemples d'images Landsat 7/ETM, SPOT4/5et FORMOSAT-2. La zone d'étude est délimitée en rouge.

<p><i>Landsat 7/ETM</i> <i>26/01/03</i> <i>(bandes 1, 4 et 5)</i></p>	 A satellite image from Landsat 7/ETM showing a landscape with green vegetation and brownish terrain. A red outline highlights a specific area in the upper right quadrant.
<p><i>SPOT 4/5</i> <i>17/01/2003</i> <i>(bandes 1, 3 et 4)</i></p>	 A satellite image from SPOT 4/5 showing a landscape with green vegetation and brownish terrain. A red outline highlights a specific area in the center-right.
<p><i>FORMOSAT-2</i> <i>08/03/2006</i> <i>(Bandes 3, 1 et 2)</i></p>	 A satellite image from FORMOSAT-2 showing a landscape with green vegetation and brownish terrain. A red outline highlights a specific area in the lower right quadrant.

II-4.1 Segmentation de la série temporelle des images FORMOSAT-2 de *NDVI*

Le traitement des images FORMOSAT-2 est gourmand en temps de calcul du fait de la taille des scènes (4000x4500 pixels) et du nombre important d'acquisitions. Afin de réduire la dimension des données FORMOSAT-2, nous avons appliqué une opération de segmentation. Le but de cette dernière est de partitionner les images en plusieurs régions qui vérifient des propriétés d'uniformité et d'homogénéité au sens de critères caractéristiques donnés. L'algorithme utilisé, développé au sein du CESBIO par Ducrot (2005), est de type « watershed » (en français Ligne des Partages des Eaux LPE) (Beucher 1992). La segmentation est réalisée sur les séries d'images de *NDVI* pour les diviser en unités fonctionnelles de végétation (segments). Les pixels d'une même unité présentent des phénologies comparables. On peut constater sur la Figure II.39 que les segments restituent bien le parcellaire agricole.

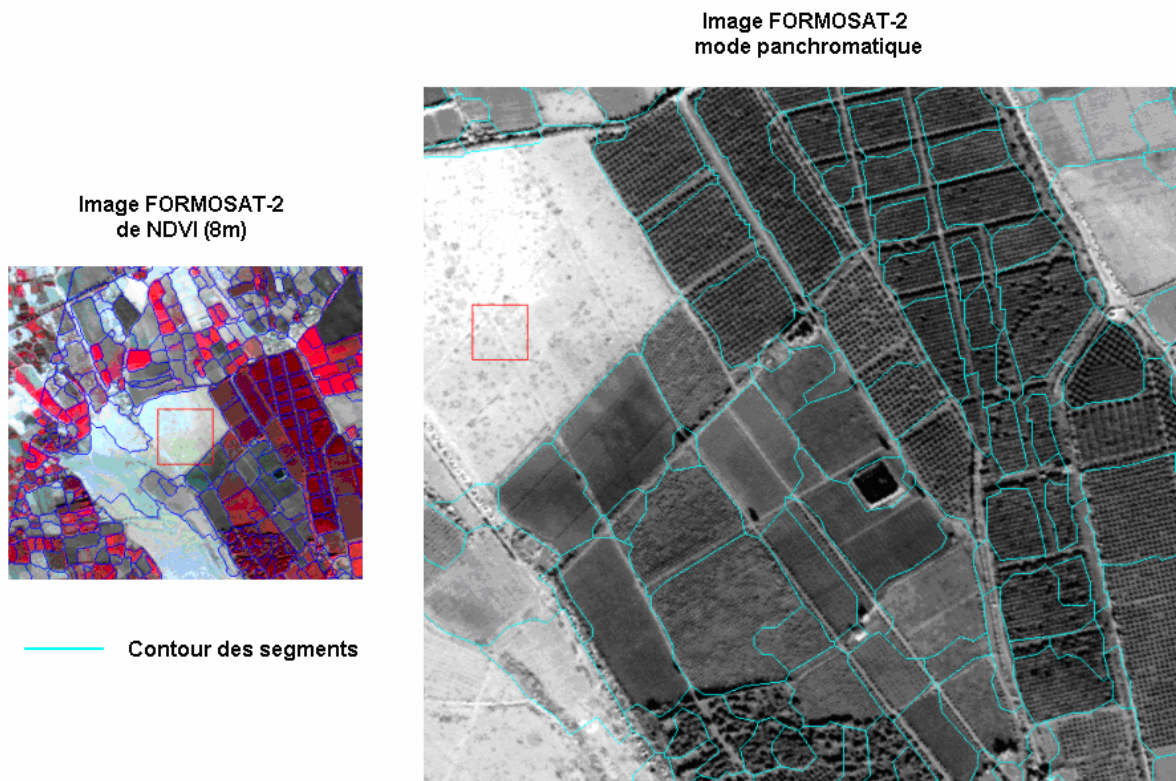


Figure II.40: Exemples de segments obtenus par segmentation des dix sept images de *NDVI* issues de FORMOSAT-2.

II-4.2 Superposition entre données haute et basse résolution

Les données à basse et à haute résolution spatiale ont été co-géoréférencées par application d'un algorithme de corrélation croisée afin de limiter les erreurs liées à un mauvais géoréférencement. Les étapes de l'algorithme sont les suivantes:

- 1- On rééchantillonne les images à basse résolution spatiale à une résolution multiple de la résolution des images Landsat (*e.g.* 270 m = 9x30 m pour MODIS et 990 m = 30x33 m pour VEGETATION) ;
- 2- On choisit sur l'image à haute résolution spatiale de *NDVI* une zone A (Figure II.41);
- 3- On choisit sur l'image à basse résolution de *NDVI* une zone B contenue dans A et initialement géoréférencée lors de l'acquisition ;

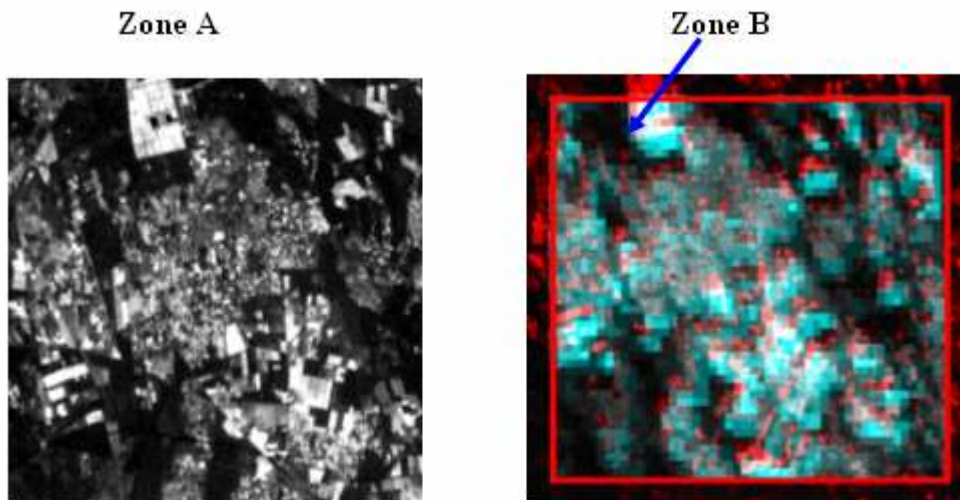


Figure II.41: Choix des images haute et basse résolution spatiale pour l'application de l'algorithme de corrélation.

- 4- on balaye toute la zone (A) avec un pas horizontal et vertical d'un pixel de 30 m et pour chaque balayage, on extrait un block (C) de pixels de la même taille que l'image (B) (Figure II.42a). Ce block sera ensuite rééchantillonné à la résolution de l'image (B) par interpolation bilinéaire, puis le coefficient de corrélation est calculé entre le block (C) et l'image (B). Pour chaque pas de translation

horizontal Dx et vertical Dy du block correspond une mesure de corrélation. Toutes ces mesures sont sauvegardées dans une matrice dont la taille correspond au nombre de translations horizontales Dx et verticales Dy (Figure II.42b) ;

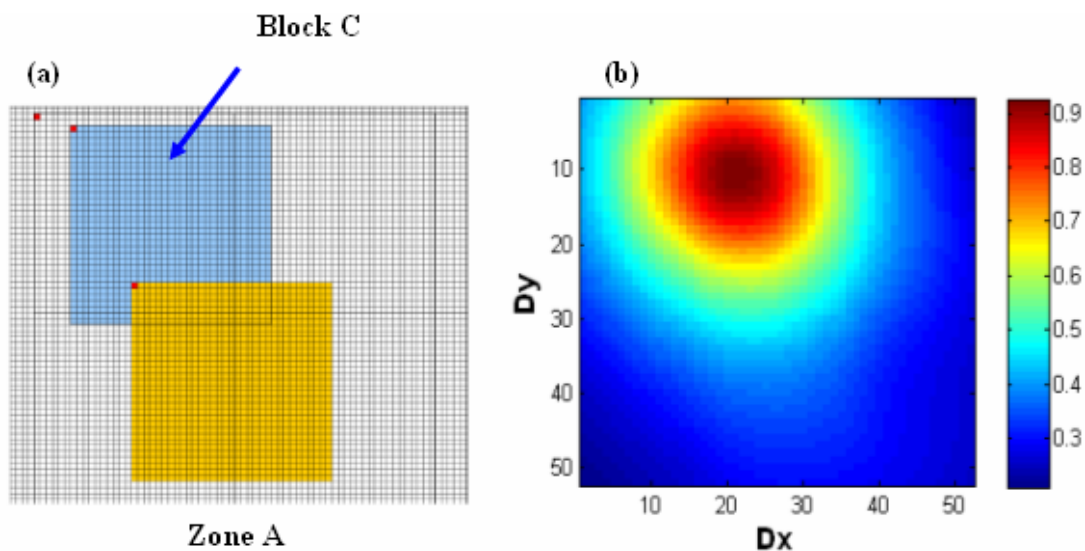


Figure II.42: Principe de balayage (a) et matrice de corrélation en fonction du pas de translation Dx et Dy (b).

- 5- Les pas de translations Dx et Dy pour lesquels le coefficient de corrélation est maximum, sont relevés. Le décalage horizontal et vertical entre l'image (B) et le block est égal à la différence entre les coordonnées en latitude/longitude du coin en haut à gauche de l'image (B) et celles du block (C) ayant le maximum de corrélation.

L'algorithme de corrélation est appliqué à deux images de *NDVI* acquises à la même période: une image MODIS composite de seize jours (entre la date du 09/05/2003 et 24/05/2003) et une image Landsat datée du 18/05/2003. Le décalage horizontal Dx et vertical Dy pour l'image MODIS est respectivement de 330 m et 480 m. La même méthode appliquée aux données VEGETATION, a montré un décalage Dx de 180 m et un décalage verticale de 330 m. On suppose dans la suite que toutes les données haute et basse résolution spatiale sont superposées. Ces décalages sont appliqués aux images à haute résolution spatiale pour les superposer au mieux aux images à basse résolution.

II-4.3 Comparaison des *NDVI* moyens entre les données haute et basse résolution

Les zones communes entre les données haute et basse résolution ont été extraites pour la saison 2002-2003 (entre landsat/SPOT4-5, MODIS et VEGETATION) et pour la saison 2005-2006 (entre MODIS et FORMOSAT-2). Le *NDVI* moyen sur ces deux zones a été calculé à partir des deux types de données et présenté dans la Figure II.43. La comparaison des profils de *NDVI* en 2002-2003 indique une bonne corrélation entre les deux profils moyens issus de MODIS et VEGETATION. Cependant, on constate la présence d'un écart important (~ 0.10) entre ces deux derniers et le profil moyen calculé à partir des données Landsat et SPOT 4-5. Cet écart est maximal pour les acquisitions Landsat autour de la période de janvier-février et décroît à la fin de la saison pour atteindre la valeur de 0.05. Ses causes peuvent être multiples: différence de bandes spectrales, étalonnage, correction atmosphérique et géométrie d'acquisition. En 2005-2006, les profils moyens issus de MODIS et FORMOSAT-2 sont quasiment identiques en début et en fin de saison. La différence maximale (~ 0.05) est constatée pour les fortes valeurs de *NDVI*.

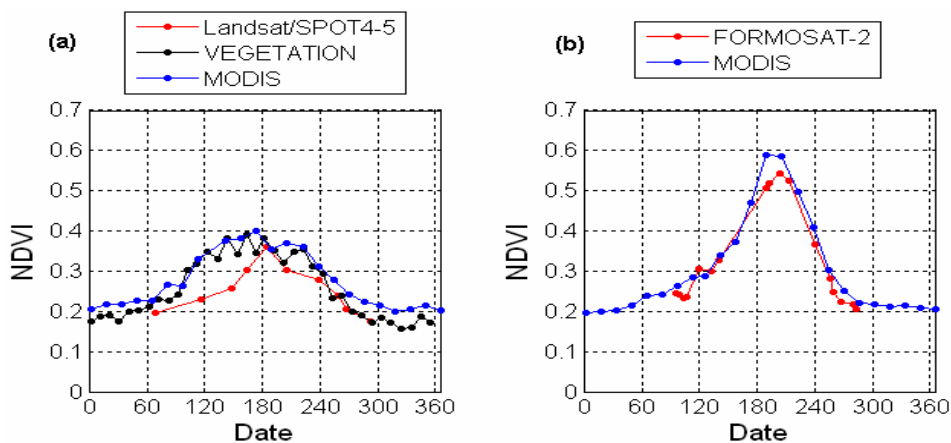


Figure II.43: Profils de *NDVI* moyens calculés pour les deux saisons 2002-2003 (a) et 2005-2006 (b) à partir des données haute et basse résolution spatiale. Les jours sont comptés à partir du 1^{er} septembre.

Afin d'étudier l'effet des différences radiométriques entre les capteurs, ainsi que ceux relatifs aux défauts géométriques des données à large champ, nous avons simulé des

données à la résolution de MODIS et de VEGETATION à partir de la série temporelle SPOT/Landsat constituée sur la saison agricole de 2002-2003. Dans cet objectif, nous avons dégradé ces dernières par moyennage des réflectances sur des fenêtres de 9 x 9 pixels (résolution de 270 m) et 33 x 33 (résolution de 990 m). Ces données sont qualifiées de simulées dans la suite du document.

Références

- Amrhar, H. (2004). Synergie modèle de prévision météorologique et données stationnelles pour spatialiser les paramètres climatiques sur le bassin versant du Tensift. *Rapport de stage de l'Ecole Nationale Hassania des Travaux Publics Maroc*, pp. 62.
- Benabdelouahab, T. (2005). Spatialisation de données pédologiques anciennes et récentes en vue de l'estimation de paramètres hydrodynamiques des sols de la plaine du Tensift. *Rapport de stage de fin d'études d'ingénieurs, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II*, pp. 89.
- Berthelot, B., and Dedieu, G. (1997). Correction of atmospheric effects for VEGETATION data. In: *G.a.P. Guyot, T. (Editor), Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Courchevel, France*, pp. 19-25.
- Beucher, S. (1992). The watershed transformation applied to image segmentation. . . In, *Oth Pfefferkorn Conf. on Signal and Image Processing in Microscopy and Microanalysis*, (pp. 299-314). Cambridge, UK, Scanning Microscopy International, suppl. 6.
- Boudhar, A., Duchemin, B., Hanich, L., Chaponnière, A., Maisongrande, P., Boulet, G., Stitou, J., and Chehbouni, A.G. (2007). Analyse de la dynamique des surfaces enneigées du Haut Atlas marocain à partir des données SPOT-VEGETATION *Science et changements planétaires / Sécheresse*, **18**, pp. 278-288.
- Carriou, J. (2004). Recherche de scénarios optimums de cultures céréalières sous contraintes hydriques. *Rapport de stage de l'Ecole Supérieure d'Agriculture d'Angers*, pp.69.
- Chaponniere, A., Maisongrande, P., Duchemin, B., Hanich, L., Boulet, G., Escadafal, R., and Elouaddat, S. (2005). A combined high and low spatial resolution approach for mapping snow covered areas in the Atlas mountains. *International Journal of Remote Sensing*, **26**, pp. 2755-2777.
- Chebouni, A., Escadafal, R., Duchemin, B., Boulet, G., Simonneaux, V., Dedieu, G., Mougenot, B., Khabba, S., Kharrou, H., Maisongrande, P., Merlin, O., Chaponnière, A., Ezzahar, J., Er-Raki, S., Hoedjes, J., Hadria, R., Abourida, A., Cheggour, A., Raibi, F., Boudhar, A., Benhadj, I., Hanich, L., Bankaddour, A., Guemouria, N., Chehbouni, A., Olioso, A., Jacob, F., and Sobrino, J. (2008). An integrated modelling and remote sensing approach for hydrological study in arid and semi-arid regions: the SUDMED Program. *International Journal of Remote Sensin., Accepted*.
- Duchemin, B., Berthelot, B., Dedieu, G., Leroy, M., and Maisongrande, P. (2002). Normalisation of directional effects in 10-day global syntheses derived from VEGETATION/SPOT: II. Validation of an operational method on actual data sets. *Remote Sensing of Environment*, **81**, pp. 101-113.
- Duchemin, B., Hadria, R., Erraki, S., Boulet, G., Maisongrande, P., Chehbouni, A., Escadafal, R., Ezzahar, J., Hoedjes, J.C.B., Kharrou, M.H., Khabba, S., Mougenot, B., Olioso, A., Rodriguez, J.C., and Simonneaux, V. (2006). Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management*, **79**, pp. 1-27.
- Duchemin, B., Hagolle, O., Mougenot, B., Simonneaux, V., Benhadj, I., Hadria, R., Ezzahar, J., Hoedges, J., Khabba, S., Kharrou, M.H., Boulet, G., Dedieu, G., Er-Raki, S., Escadafal, R., Olioso, A., and Chehbouni, A.G. (2008a). Agrometeorological study of semi-arid areas: an experiment for analysing the potential of FORMOSAT-2 time series of images in the Marrakech plain. *International Journal of Remote Sensing. Accepted*.
- Duchemin, B., Maisongrande, P., Boulet, G., and Benhadj, I. (2008b). A simple algorithm for yield estimates: Evaluation for semi-arid irrigated winter wheat monitored with green leaf area index. *Environmental Modelling and Software*, **23**, pp. 876-892.
- Ducrot, D. (2005). Méthodes d'analyse et d'interprétation d'images multi-sources - Extraction de descripteurs de paysage. *DHR INPT Toulouse*.
- Er-Raki, S., Chehbouni, A., Guemouria, N., Duchemin, B., Ezzahar, J., and 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**, pp. 41-54.
- Hadria, R., Duchemin, B., Lahroun, A., Khabba, S., Er-Raki, S., Dedieu, G., and Chehbouni, A. (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**, pp. 1093-1117.

- Hagolle, O., Dedieu, G., Mougenot, B., Debaecker, V., Duchemin, B., and Meygret, A. (2008). Correction of aerosol effects on multi-temporal images acquired with constant viewing angles: Application to Formosat-2 images. *Remote Sensing of Environment*, **112**, pp. 1689-1701.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., and Ferreira, L.G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, **83**, pp. 195-213.
- Huete, A., Justice, C., and Leeuwen, W.V. (1999). MODIS Vegetation Index (MOD 13): Algorithm Theoretical Basis Document (version 3), (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>), pp. 120.
- Krige, D.G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. 1951. *J. of Chem.Metal. and Mining Soc. of South Africa*, **52**, pp. 119-139.
- Limam, N. (2005). Perspectives de développement des ressources en eau dans le bassin du Tensift. Assemblée générale du Réseau Méditerranéen des Organismes de Bassin REMOB.Marrakech, Maroc, 23-26 mai 2005.
- Maisongrande, P., Duchemin, B., and Dedieu, G. (2004). VEGETATION/SPOT: an operational mission for the Earth monitoring; presentation of new standard products. *International Journal of Remote Sensing*, **25**, pp. 9-14.
- Ouzine, L., and Kharrou, M.H. (2004). Conception participative de projets d'irrigation dans le périmètre du Haouz. *Projet INCO-WADEMED Actes du Séminaire Modernisation de l'Agriculture Irriguée Rabat, du 19 au 23 avril 2004*.
- Plantecoste, M. (2002). Caractérisation des sols et de leurs propriétés hydrodynamiques pour la modélisation hydrologique en milieu semi-aride : Bassin versant du Tensift – Maroc. *Mémoire de fin d'étude de l'ENSAM*, pp. 57.
- Rahman, H., and Dedieu, G. (1994). SMAC: A Simplified Method for the Atmospheric Correction of Satellite Measurements in the Solar Spectrum. *International Journal of Remote Sensing*, **15**, pp. 123-143
- Shepard D. (1968). A two dimensional interpolation function for regularly spaced data. In, *23d National Conference of the Association for Computing Machinery, Princeton, NJ, ACM* (pp. 517-524).
- Simonneaux, V., Duchemin, B., Helson, D., Er-Raki, S., Oliso, A., and Chehbouni, A.G. (2008). The use of high-resolution image time series for crop classification and evapotranspiration estimate over an irrigated area in central Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, **29**, pp. 95-116.
- Warren-Wilson, J. (1959). Analysis of the spatial distribution of foliage by two-dimensional point quadrats. *New Phytol*, **58**, pp. 92-101.
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G.J., Jonckheere, I., and Coppin, P. (2003). Review of methods for in situ leaf area index determination, part II: Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology*, **121**, pp. 37-53.

**CHAPITRE III. Méthodes de
désagrégation et occupation du sol en
plaine du Tensift**

CHAPITRE III. METHODES DE DESAGREGATION ET OCCUPATION DU SOL EN PLAINE DU TENSIFT 145

III-1 Occupation du sol à haute resolution spatiale.....	149
<i>III-1.1 Méthodes de classification.....</i>	<i>149</i>
<i>III-1.2 Analyse qualitative des résultats.....</i>	<i>156</i>
<i>III-1.3 Evaluation quantitative des résultats</i>	<i>160</i>
III-2 Occupation du sol à basse resolution spatiale : Evaluation des méthodes de désagrégation (saison agricole 2002-2003).....	163
<i>III-2.1 Méthode supervisée.....</i>	<i>164</i>
III-2.1.1 Principe.....	164
III-2.1.2 Choix de la zone d'apprentissage	166
III-2.1.3 Profils types de NDVI	169
III-2.1.4 Occupation du sol.....	171
<i>III-2.2 Méthode non supervisée</i>	<i>175</i>
III-2.2.1 Principe.....	175
III-2.2.2 Profils types de NDVI	178
III-2.2.3 Occupation du Sol	181
<i>III-2.3 Effets de co-registration et de résolution.....</i>	<i>185</i>
III-3 Occupation du sol a basse resolution spatiale: application de la méthode non supervisée (periode 2000-2006).....	188
<i>III-3.1 Evaluation à partir des données FORMOSAT-2.....</i>	<i>188</i>
<i>III-3.2 Profils types de NDVI.....</i>	<i>190</i>
<i>III-3.3 Variabilité spatio-temporelle de cartes de l'occupation du sol.....</i>	<i>193</i>
III-4 CONCLUSION	199

La caractérisation de l'occupation du sol est réalisée à partir des données à basse (BR) et haute (HR) résolution spatiale. Il s'agit, avant tout, d'évaluer les potentialités des données BR pour cartographier l'occupation du sol en trois classes: plantations arborées, cultures annuelles irriguées et zones non irriguées. Il est important de noter que ces classes ont été labellisées « arbre », « culture annuelle » et « sol nu », ce qui est parfois réducteur, voire abusif. Ces trois classes ont été retenues car: (1) elles sont dominantes dans la région d'étude; (2) elles correspondent à des besoins en eau très différents; (3) elles sont contrastées en termes de phénologie du couvert végétal et, par conséquent, elles pourront être identifiées sans ambiguïté par désagrégation des données BR. Les réalisations associées à leur identification sont de trois types:

- Cartographie d'une occupation du sol de « référence » à partir de séries d'images HR collectées pendant deux saisons agricoles (2002-2003 et 2005-2006) ;
- Développement/adaptation et évaluation d'algorithmes de désagrégation supervisée et non supervisée des données BR (VEGETATION et MODIS) sur une saison agricole test (2002-2003) ;
- Application d'une méthode de désagrégation non supervisée pour le suivi inter-annuel de l'occupation du sol à partir de l'archive de données MODIS (saisons agricole de 2000-2001 à 2005-2006).

III-1 OCCUPATION DU SOL A HAUTE RESOLUTION SPATIALE

III-1.1 Méthodes de classification

Les travaux menés dans le cadre du projet SudMed (Simonneaux et al. 2008) ont montré la pertinence de l'analyse temporelle des profils de *NDVI* des images Landsat pour établir l'occupation du sol de la plaine du Tensift par rapport à des approches plus classiques de classification non supervisée (*e.g.* k-moyennes) ou supervisée (*e.g.* maximum de vraisemblance). En effet, des sources de confusions importantes existent

du fait des nombreux types de cultures (plantations arborées d'âge et de densité variables, arbres à feuilles caduques ou pérennes, phénologies des cultures annuelles...), de leurs éventuelles associations (cultures concroisées arbres + annuelles) et de la diversité des pratiques culturales. A titre d'exemple, le cycle de culture des plantes annuelles peut varier de deux mois pour les cultures maraîchères à six/sept mois pour les céréales. Pour les premières, plusieurs cultures peuvent se succéder. Pour les secondes, les dates de semis sont étalées entre début novembre et mi-janvier en fonction des variétés utilisées et des pratiques relatives à l'installation de la culture (irrigation pré-semis ou attente des premières pluies significatives). Les plantations arborées peuvent également fortement différer en fonction du type d'arbres, du système d'irrigation et du degré de mécanisation de l'exploitation : certains vergers d'orangers irrigués en goutte-à-goutte peuvent être comparés à des cultures en rang avec un espacement minimal (quatre mètres entre deux rangs et deux mètres entre deux arbres au sein d'un même rang), alors que les oliveraies traditionnelles, irriguées en gravitaire et abritant parfois d'autres types de cultures (céréales, fourragères ou luzernes), ont des faibles densités d'arbre (moins de cent par ha).

Pour restituer l'occupation du sol à haute résolution spatiale, les profils de *NDVI* dérivés des séries d'images HR (10 images Landsat / SPOT4-5 en 2002-2003 et 17 images FORMOSAT-2 en 2005-2006) ont été analysés, en complément d'images panchromatiques à très haute résolution, dont la texture permet de localiser sans ambiguïté les vergers. Ces classifications sont réalisées sur les parties de la plaine du Tensift présentées en Figure III.1.

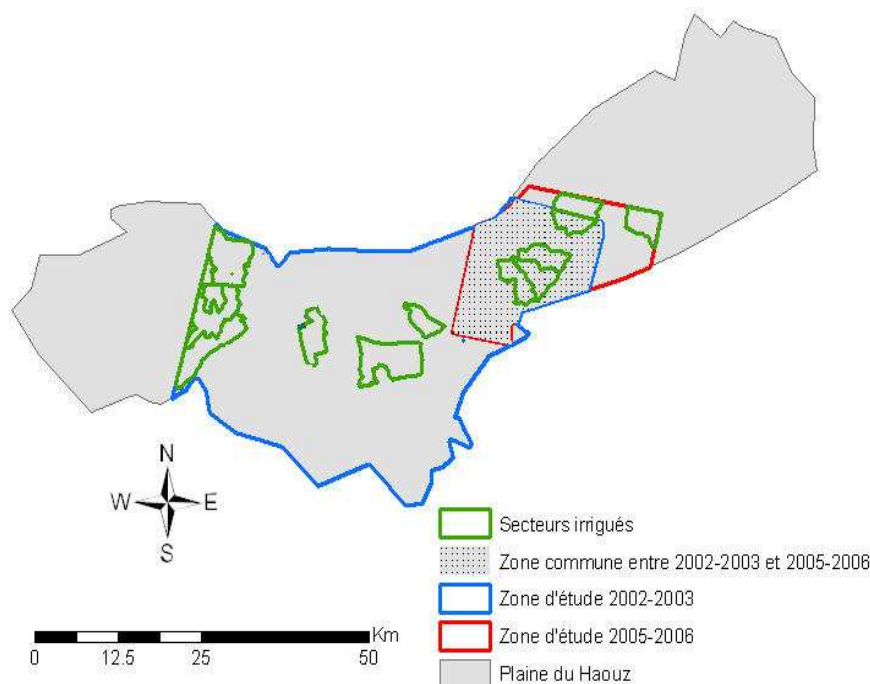


Figure III.1: Régions où l'occupation du sol a été cartographiée en 2002-2003 (série d'images SPOT/Landsat, en bleu) et en 2005-2006 (séries d'images FORMOSAT-2, en rouge).

L'algorithme de classification des données HR est réalisé en deux étapes, pour déterminer la classe « arbre », puis discriminer les cultures irriguées (classe « culture annuelle ») des zones non irriguées (classe « sol nu »).

- *Détermination de la classe « arbre »*

Les vergers sont identifiés sur des images panchromatiques à très haute résolution spatiale (Figure III.2). Pour la saison de 2002-2003, ce travail a été réalisé lors d'un stage (Gauthier 2004) par application du logiciel OLICOUNT (© JRC¹⁸, Giardino 1997; Peedell 1997) sur une image SPOT-5 acquise en supermode panchromatique le 23/07/2002 (Figure III.2a). La méthode utilisée dans OLICOUNT s'appuie d'une part, sur un seuillage radiométrique, et d'autre part sur des critères morphologiques (taille de

¹⁸ Le JRC est le *Joint Research Center* de la Communauté Européenne, localisé à Ispra en Italie (<http://ec.europa.eu/dgs/jrc/>)

la couronne, élongation, densité). En 2005-2006, étant donné la taille relativement petite de la scène FORMOSAT-2 (Figure III.1), nous avons identifié et numérisé les parcelles d'arbres sur l'image panchromatique FORMOSAT-2 acquise le 16/12/2005 à la résolution de 2 m (Figure III.2b).

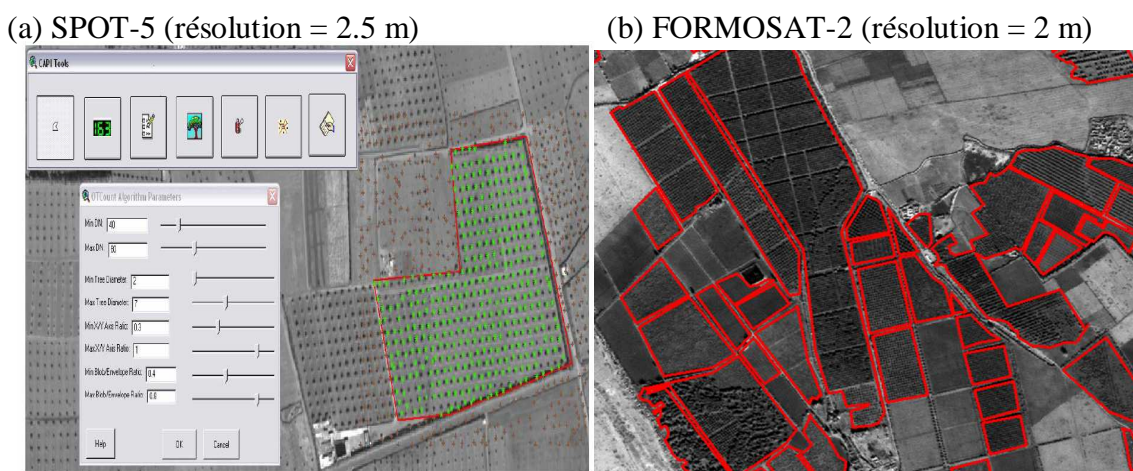


Figure III.2: Détection des arbres à partir des images panchromatiques à très hautes résolutions spatiales en utilisant le logiciel OLICOUNT (a) et par numérisation manuelle (b).

- *Identification de la classe « culture annuelle »*

L'analyse conjointe des données HR et des relevés d'occupation du sol effectués sur le terrain (cf. II-3.4) nous a permis de caractériser la phénologie des différentes cultures annuelles. Cette analyse est réalisée à partir des séries d'images de *NDVI*.

En 2002-2003, nous disposons d'une dizaine de données et nous nous sommes inspirés des travaux de Simonneaux et al. (2008) pour séparer les cultures irriguées et non irriguées par seuillage du *NDVI*. Les profils de *NDVI* qui ont un maximum inférieur à un certain seuil sont considérés comme zones non cultivées et sont classés « sol nu » ; les profils qui ne remplissent pas cette condition sont classés « culture annuelle ». La confrontation des images classées en utilisant différents seuils a permis de fixer le seuil à 0.4.

La disponibilité de données à haute répétitivité temporelle FORMOSAT-2 nous a permis d'étudier plus finement la variabilité spatiale (intra et inter-parcellaire) et temporelle du *NDVI* au cours de la saison agricole 2005-2006.

La Figure III.3 représente les profils de *NDVI* de deux parcelles de R3 issus de la série temporelle de *NDVI* FORMOSAT-2. La première parcelle est une jachère (Figure III.3a) tandis que la deuxième est irriguée de type céréales (Figure III.3b). La variabilité intra-parcellaire est très élevée dans le cas de la parcelle non irriguée notamment entre la mi-décembre (jour 350) et la fin du mois de mars (jour 450). On remarque une forte ressemblance entre le comportement du *NDVI* des céréales et celui de certains pixels de jachère, avec une dynamique autour de 0.6. Cet exemple illustre la difficulté à distinguer, en première analyse et à la résolution du pixel, les céréales des cultures non irriguées. Cependant, si l'on compare les profils moyens de ces deux parcelles, on peut relever des différences notables, particulièrement vers la mi-mai (jours 480 à 500) où la culture de jachère est dans un état de jaunissement bien plus avancé que la culture de blé. Cette figure illustre deux types d'enseignements tirés de l'analyse des données FORMOSAT-2 à pleine résolution: (1) la distinction des classes peut être réalisée à partir de critères locaux, c'est-à-dire dont l'application est limitée dans le temps, (2) il peut être préférable de travailler à l'échelle de la parcelle, c'est-à-dire sur des profils moyens de *NDVI*. C'est aussi pour cette dernière raison que nous avons appliqué une segmentation des images FORMOSAT-2 (cf. II-4.1).

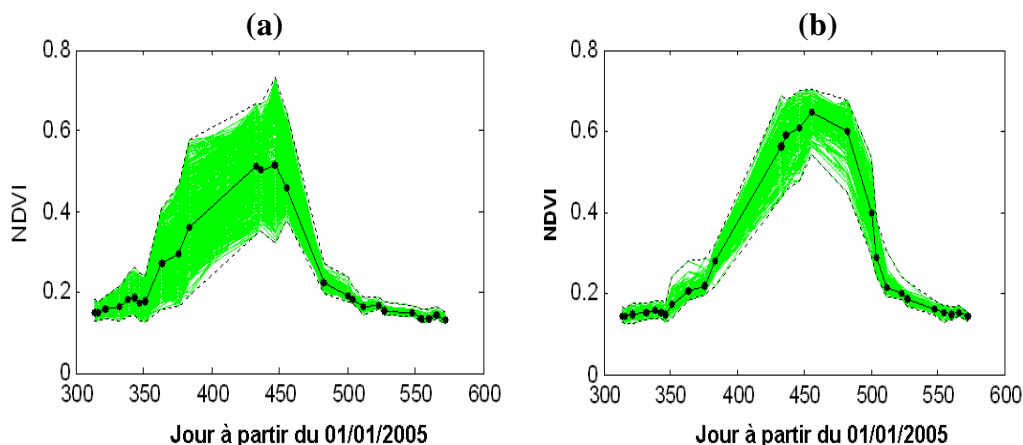


Figure III.3: Faisceaux de profils de *NDVI* sur deux parcelles du secteur irrigué R3: (a) jachère non irriguée; (b) blé irrigué. Les profils moyens et les enveloppes des *NDVI* sont présentés en noir. Ces profils sont issus de la série temporelle d'images FORMOSAT-2 à 8 m de résolution.

L'analyse des profils moyens de *NDVI* sur les unités (segments ou parcelles) fonctionnelles de végétation, nous a permis de caractériser le comportement phénologique de six classes d'occupation du sol : luzerne, betterave, céréale, fourrage, fève et culture non irriguée. Ces profils, montrés en Figure III.4, présentent les spécificités suivantes:

- La luzerne affiche de fortes valeurs de *NDVI* (>0.5) tout au long de la saison sauf à certaines périodes où les agriculteurs procèdent à la coupe;
- Pour la classe « culture annuelle », on enregistre une hiérarchie des valeurs de *NDVI* en début de saison (jours 300 à 350) avec les plus fortes valeurs pour la classe « fourrage », suivies de la classe « fève », « céréale » et « culture non irriguée » ;
- La sénescence de la classe « betterave » est la plus tardive (~ jour 550);
- les deux classes « non irriguée » et « céréale » présentent de fortes similarités, avec une période de développement d'environ deux mois (jours 360 à 450). De plus, ces deux classes sont les plus hétérogènes: en phase de développement, le *NDVI* moyen des parcelles non irriguées varie de ± 0.2 autour du comportement moyen, et cette variation est de l'ordre de ± 0.1 pour la classe « céréale ».

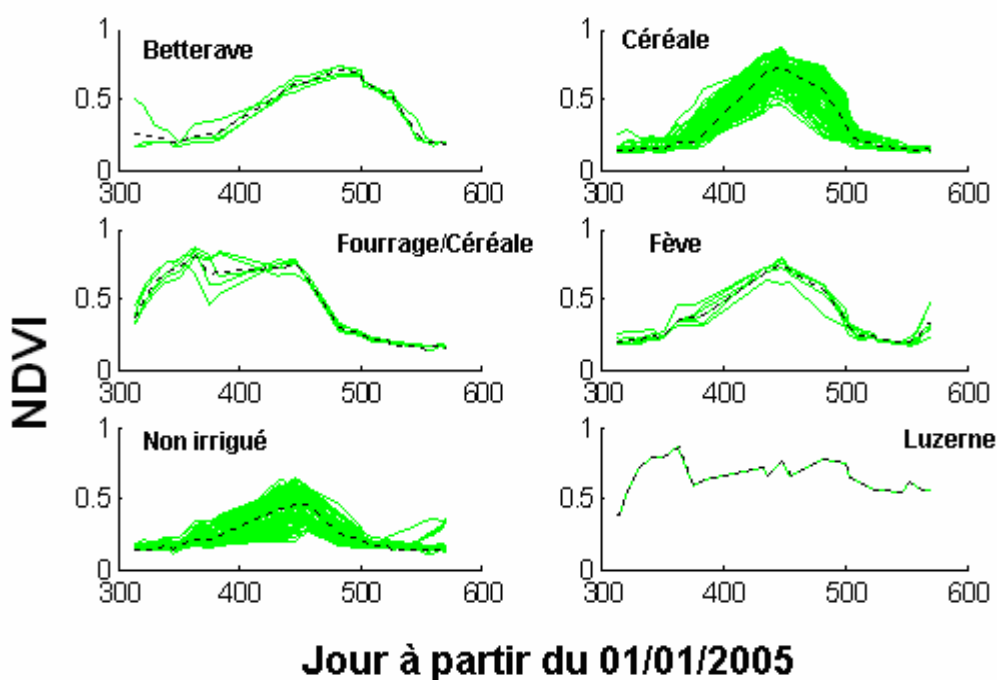


Figure III.4: Profils de *NDVI* des six classes d'occupation du sol. Le faisceau vert est constitué des profils de *NDVI* moyens sur chacune des parcelles renseignées ; le comportement moyen est en noir. Ces profils sont issus de la série temporelle d'images FORMOSAT-2 à 8 m de résolution.

Toutes ces considérations sont à la base de la définition de règles qui nous ont permis de cartographier l'occupation du sol à haute résolution spatiale à partir des séries d'images SPOT/Landsat (2002-2003) et FORMOSAT-2 en (2005-2006). Les arbres de décision correspondants aux processus de classification sont présentés en Figure III.5. Les règles ont été appliquées sur les profils de *NDVI* à la résolution du pixel (30 m) en 2002-2003 et à la résolution du segment (variable, cf. II-4.1) en 2005-2006. Nous obtenons une carte d'occupation du sol des trois classes d'intérêt (« arbre », « culture annuelle », « sol nu ») en 2002-2003 et plus détaillée (cinq types de cultures annuelles) en 2005-2006. Afin de procéder à l'analyse de ces deux cartes conformément aux trois classes d'intérêt et de pouvoir les comparer, nous avons identifié la zone commune (cf. Figure III.1) et réduit le nombre de classes de cultures en 2005-2006 en regroupant les classes « betterave », « fève », « luzerne », « fourrage » et « céréale » en une seule classe nommée « culture annuelle ».

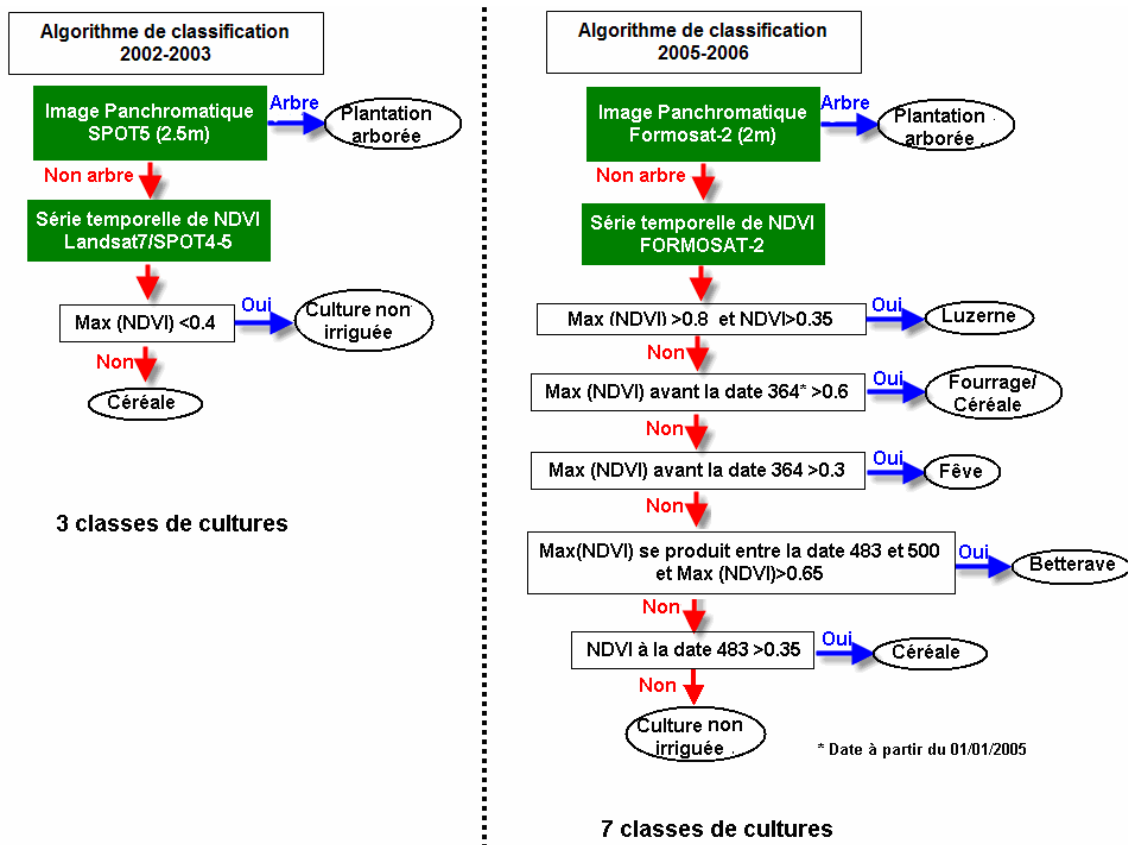


Figure III.5: Algorithmes de classification des images HR (Landsat7, SPOT4-5 et FORMOSAT-2) pour la cartographie de l'occupation du sol pour les saisons agricoles de 2002-2003 et de 2005-2006.

III-1.2 Analyse qualitative des résultats

Les Figure III.6, III.7 et III.8 présentent respectivement les cartes d'occupation du sol pour 2002-2003, pour 2005-2006 à sept classes et 2005-2006 à trois classes. La composition moyenne de l'occupation du sol est indiquée dans le Tableau III.1, en distinguant les régions hors et dans les secteurs irrigués gérés par l'ORMVAH.

La répartition spatiale de l'occupation du sol en 2002-2003 (Figure III.6) est cohérente avec notre connaissance de la région (cf. II-2): Les plantations arborées sont présentes sur toute la zone d'étude avec une densité plus forte dans le secteur irrigué NFIS à l'ouest de la région, ainsi qu'au nord de celle-ci le long de l'oued du Tensift. Les cultures annuelles sont majoritairement présentes dans la partie est de la région, tout particulièrement au sein des secteurs irrigués du Haouz central et de la Tessaout Amont,

ainsi que dans la partie sud aux abords des lits des oueds affluents du Tensift. Il apparaît logiquement que les cultures irriguées (annuelle + arbre) occupent plus de surfaces au sein des secteurs irrigués qu'en dehors (60 % contre 46 %, Tableau III.1). Il est plus surprenant de constater que la classe « sol nu » est partout majoritaire, y compris dans les secteurs irrigués, où elle occupe près de 40 % des surfaces. Cependant, lorsqu'on examine la carte d'occupation du sol, on constate que ces chiffres varient énormément d'un secteur à l'autre, et que certains grands sous-secteurs apparaissent particulièrement sous-cultivés, en particulier les secteurs N2 et H2 situés respectivement au nord du NFIS et au centre de la région d'étude (60 % de surfaces non irriguées). L'analyse des volumes annuels d'irrigation enregistrés en 2002-2003 pour ces deux secteurs (cf. II-3.6) montre de faibles quantités d'irrigation (pour N2, il y a eu 108 contre 228 mm en moyenne pour les autres secteurs sur les trois dernières années 2003-2004, 2004-2005 et 2005-2006) et pour H2, 120 contre 150mm. Ce déficit en irrigation peut expliquer le pourcentage élevé de sol nu dans ces deux secteurs.

La région observée par FORMOSAT-2 en 2005-2006 présente un pourcentage des cultures annuelles élevé, supérieur à 40 % (Tableau III.1), car elle inclut les secteurs irrigués du Haouz central dédiés à la céréaliculture. Dans cette région, le taux d'emblavement est à peu près identique (autour de 60 %) dans et hors secteurs irrigués, mais la composition change avec une proportion plus élevée de cultures annuelles dans les secteurs irrigués.

Ces statistiques sont relativement stables entre les saisons agricoles 2002-2003 et 2005-2006 (Figure III.9 et Tableau III.2). Les cartes d'occupation du sol présentent les mêmes zones avec une concentration de sol nu au nord-est et une concentration de cultures à l'ouest et au centre. Les surfaces occupées par les vergers sont stables (~18 %) tandis que celles classées en sol nu augmentent significativement (de 28 % à 42 %), au détriment de celles cultivées en plantes annuelles, entre 2002-2003 et 2005-2006 (Tableau III.2). Toutefois, l'analyse quantitative qui suit montre qu'il y a une légère surestimation du taux de cultures annuelles en 2002-2003.

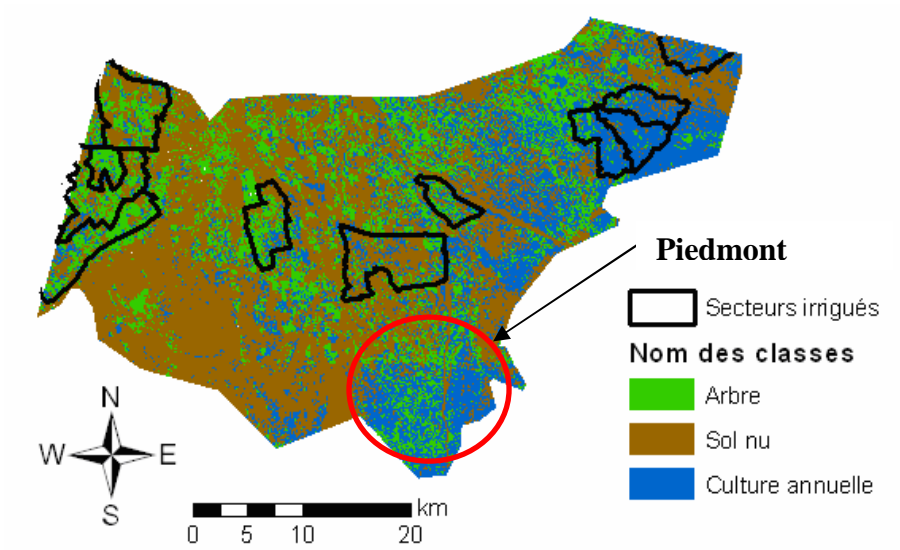


Figure III.6: Carte d'occupation du sol à trois classes (saison 2002-2003) à la résolution spatiale de 30 m.

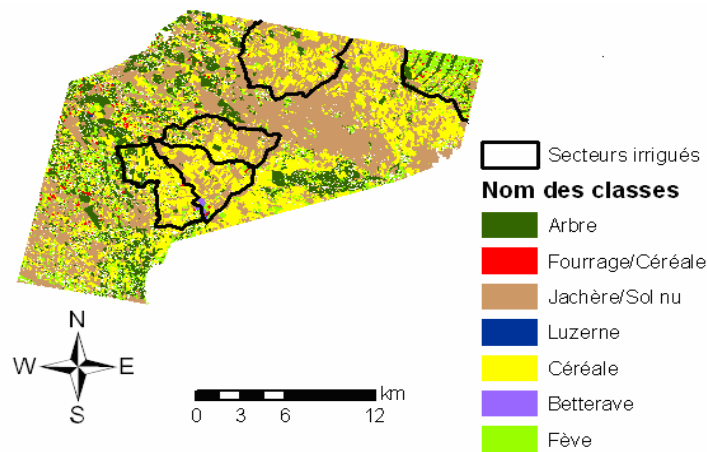


Figure III.7: Carte d'occupation du sol à sept classes (saison 2005-2006) à la résolution spatiale de 8 m.

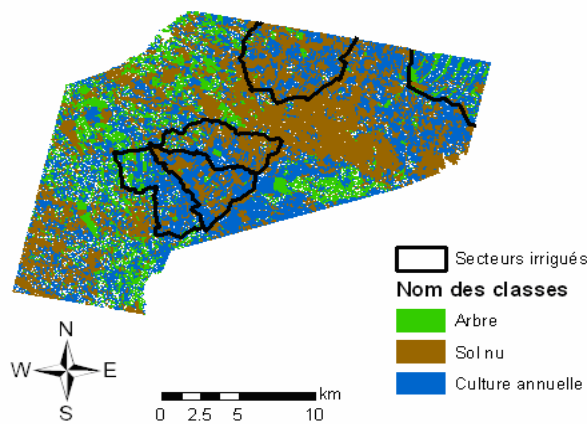


Figure III.8: Carte d'occupation du sol à trois classes (saison 2005-2006) à la résolution spatiale de 8 m. Les zones en blanc représentent les segments non retenus lors de l'opération de segmentation.

Tableau III.1: Moyenne des classes de cultures sur les zones d'étude et sur les secteurs irrigués et non irrigués (saison 2002-2003 et 2005-2006).

	Saison 2002-2003			total
	%Arbre	%Sol nu	% Culture annuelle	
Zone d'étude 2002-2003	22,2	50,9	26,9	100
Secteurs irrigués	29,5	39,3	31,2	100
Hors secteurs irrigués	20,6	53,3	26,1	100
	Saison 2005-2006			total
	%Arbre	%Sol nu	% Culture annuelle	
Zone d'étude 2005-2006	16,0	42,1	41,9	100
secteurs irrigués	9,3	39,5	51,2	100
Hors secteurs irrigués	18,4	42,9	38,7	100

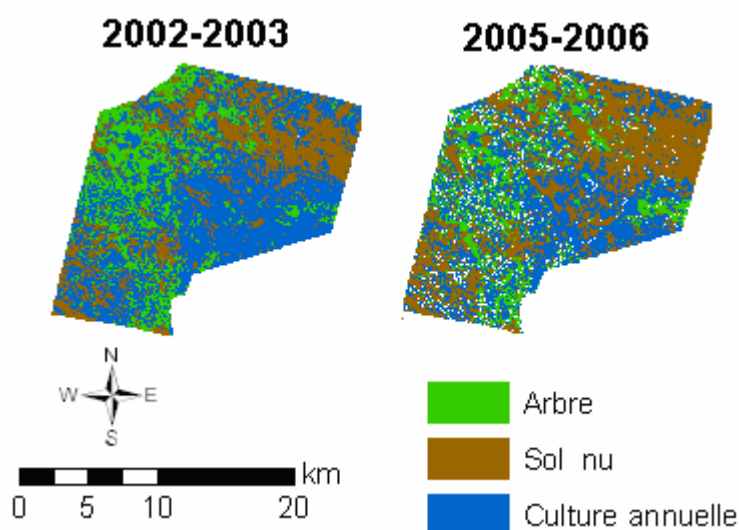


Figure III.9: Cartes des occupations du sol sur la zone commune à la saison 2002-2003 et 2005-2006.

Tableau III.2: Moyenne des cultures sur la zone commune à la saison 2002-2003 et 2005-2006.

	2002-2003	2005-2006
%Arbre	19.4	17.5
%Sol nu	28.2	42.4
%Culture annuelle	52.4	40.1

III-1.3 Evaluation quantitative des résultats

Pour évaluer les cartes d'occupation du sol obtenues par classification, nous les avons comparées aux données d'occupation du sol collectées sur le terrain en 2002-2003 et en 2005-2006 (cf. II-3.4). Les matrices de confusion sont présentées dans les Tableaux III.3 à III.5. La précision globale des classifications pour les deux saisons est d'environ 80 % avec les données à pas de temps « mensuel » (SPOT/Landsat, 2002-2003) et 90 % avec les données à plus haute répétitivité (FORMOSAT-2, 2005-2006). Les erreurs d'omission et de commission sont généralement faibles, inférieures à ou de l'ordre de 10 %, sauf dans trois cas où les confusions sont plus importantes:

- 1- Le premier type de confusion concerne les pixels qui sont classés comme étant « culture annuelle », alors qu'en réalité ce sont des plantations arborées (voir Tableau III.3). Ce type de confusion peut s'expliquer par la présence de jeunes plantations arborées à faible couverture, pour lesquelles la signature des cultures annuelles ou de la végétation herbacées, qui se trouvent entre les rangs, est nettement visible.
- 2- Le deuxième type de confusion est observable entre « culture annuelle irriguée » et « zones non irriguées ». Environ 37 % d'omission est enregistrée pour la classe « culture annuelle » en 2002-2003 (Tableau III.3) et 11 % en 2005-2006 (Tableau III.5). L'explication est liée au développement d'une strate de végétation naturelle sur les zones de jachères, qui peut être dense si les années sont bonnes du point de vue pluviométrique (cf. Figure III.3).
- 3- Des erreurs de commission très élevées sont enregistrées pour trois cas : 41 % pour la classe « culture annuelle » en 2002-2003, 37 % et 77 % respectivement pour les classes « fourrage » et « fève » en 2005-2006. Dans le premier cas, la commission est due à la confusion entre les cultures annuelles et les deux classes « arbre » et « sol nu ». La deuxième commission concerne les céréales fourragères, dont les signatures présentent des recouvrements avec les classes « céréales », « zone non irriguée » et « fève ». Enfin, l'erreur de commission est de 77 % pour la classe « fève » en raison de la confusion avec les plantations arborées. Ces deux dernières erreurs sont à relativiser, car elles concernent des classes faiblement représentées.

Par exemple, la classe « fève » affiche le plus fort taux à la fois de précision globale (99.8 %) et de commission (77.5 %).

La grande majorité des erreurs s'explique par le fait que le comportement phénologique de différentes classes, et en particulier des différentes cultures annuelles en 2005-2006, peut être comparable (Figure III.4). Si l'on regroupe ces dernières en une seule classe, la précision globale de la méthode de classification est de 90 % (Tableau III.5). Les autres confusions sont observées, d'une part entre la classe « arbre » et « culture annuelle », du fait de l'existence de plantations à faible taux de recouvrement, et d'autre part entre la classe « sol nu » et « culture annuelle », du fait de recoupement entre les profils temporels de *NDVI* sur la végétation naturelle bien développée et sur les cultures stressée. On notera également qu'une partie des erreurs peut provenir du caractère non synchrone des données collectées sur le terrain (à une date dans la saison) et des données images (séries temporelles de novembre à juin).

Tableau III.3: Matrice de confusion de la carte d'occupation du sol 2002-2003.

		Données terrains				
		Arbre (%)	Sol nu (%)	Cultures annuelles (%)	Total en pixel	Erreur de commission (%)
Classification	Arbre (%)	76.2	0	3.3	623	2.7
	Sol nu (%)	0.3	62.8	0	282	1.1
	Culture annuelle (%)	23.5	37.2	96.7	850	41.3
	Total (%)	100	100	100		
	Total en pixel	531	444	516	1755	
	Erreur d'omission (%)	30.5	10.2	37.2	3.3	
Précision globale = 78%						

Tableau III.4: Matrice de confusion de la carte d'occupation du sol à sept classes 2005-2006.

		Données terrains								
		Arbre (%)	Betterave (%)	Céréale (%)	Fourrage (%)	Jachères/sol nu (%)	Luzerne (%)	Fève (%)	Total	Erreur de commission (%)
Classification	Non classés (%)	0.9	1.3	0.7	2.7	0.2	0	0	0.6	
	Arbre (%)	85.9	0	0	0.2	0	0	0	12.9	0.1
	Betterave (%)	0.0	95.7	0.2	0	0	0	0.1	3.0	3.4
	Céréale (%)	3.8	1.4	85.7	16.3	2.6	0	0.1	43.6	3.8
	Fourrage (%)	0.6	0.0	0.3	23.8	0	0.6	0	0.6	37.4
	Jachères/sol nu (%)	0.7	1.5	10.9	39.9	95.9	0.0	0	35.4	17.3
	Luzerne (%)	0.2	0	0	0	0	99.4	0	0.2	11.9
	Fève (%)	8.0	0.1	2.3	17.1	1.2	0.0	99.8	3.8	77.5
	Total (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	
	Total en pixel	39682	7992	129651	4210	80832	469	2266		
	Erreur d'omission (%)	14.08	4.3	14.32	76.2	4.08	0.64	0.22		
Précision globale = 88%										

Tableau III.5: Matrice de confusion de la carte d'occupation du sol à trois classes 2005-2006.

		Données terrains				
		Arbre (%)	Sol nu (%)	Culture annuelle (%)	Total (%)	Erreur de commission (%)
Classification	Arbre (%)	85.9	0,01	0	12.9	0.1
	Jachères/sol nu (%)	0.7	95.9	11.0	35.4	17.3
	Culture annuelle (%)	12.5	3.8	88.2	51.2	6.0
	Total (%)	100	100	100	100.0	
	Total en pixel	39682	80832	144588	265102	
Erreur d'omission (%)	13.2	4	11			
Précision globale = 90%						

En dernier lieu, signalons que les cartes d'occupation du sol HR ont été rééchantillonnées à la résolution des données MODIS (270 m) et VEGETATION (990 m) en calculant les pourcentages des trois classes sur, respectivement, des fenêtres de 9x9 et 33x33 pixels. On obtient ainsi des cartes de fractions ou de pourcentages d'occupation du sol, qui serviront à l'évaluation des résultats relatifs à la désagrégation des images BR.

III-2 OCCUPATION DU SOL A BASSE RESOLUTION SPATIALE : ÉVALUATION DES METHODES DE DESAGREGATION (SAISON AGRICOLE 2002-2003)

Nous avons adapté le modèle linéaire de désagrégation (cf. I-4.1.3) aux données basse résolution MODIS et VEGETATION acquises durant une saison agricole test (2002-2003). Le modèle linéaire est appliqué de deux manières qui diffèrent par la méthode d'identification des « signatures pures », profils temporels typiques des trois classes d'occupation du sol que nous recherchons. La méthode supervisée inverse ces profils en utilisant l'occupation du sol dérivée des données HR. En parallèle, nous avons développé une méthode non supervisée, où les signatures sont identifiées (parmi un ensemble de signatures candidates) par une méthode statistique itérative. Les deux méthodes restituent l'occupation du sol sur la plaine du Tensift en termes de fractions de surfaces occupées par chaque classe dans chaque pixel basse résolution, ainsi que les profils temporels de *NDVI* associés à chacune de ces classes. Dans cette section, on compare les deux méthodes et on analyse leur précision.

Plusieurs études (Kerdiles and Grondona 1995; Cardot and Faivre 2003; Ballantine et al. 2005 ; Knight et al. 2006) ont montré que: 1) les pourcentages d'occupation du sol sont mieux restitués lorsque l'indice de végétation *NDVI* est utilisé au lieu des réflectances; 2) l'hypothèse de linéarité du *NDVI* dans l'approche de désagrégation n'engendre pratiquement pas d'erreurs sur le résultat des classifications; 3) le modèle linéaire a tendance à donner de meilleurs résultats quand le nombre de signatures pures

est réduit. Toutes ces considérations ont été retenues dans cette étude. Signalons enfin que les méthodes sont appliquées sous l'hypothèse de la stationnarité spatiale des signatures pures des trois classes recherchées (*i.e* pour chaque pixels à basse résolution, on désagrège en utilisant toujours les mêmes signatures pures).

III-2.1 Méthode supervisée

III-2.1.1 Principe

Cette méthode est dite supervisée car les profils de *NDVI* typiques (signatures pures) des classes sont recherchés sur une petite région « d'apprentissage » où l'occupation du sol est connue à haute résolution spatiale. Il s'agit donc d'étendre l'estimation de l'occupation du sol en dehors de la zone ayant servi à l'apprentissage. La Figure III.10 rappelle le principe de la désagrégation supervisée pour un pixel appartenant à la zone d'apprentissage, comportant trois classes et caractérisé par son profil de *NDVI* moyen. Ce pixel est localisé sur la carte d'occupation du sol à haute résolution spatiale et sa composition (pourcentage de surface occupée par chacune des trois classes) est donc connue. Il reste alors à déterminer les profils de *NDVI* typiques de ces trois classes – les « signatures pures » – en résolvant, à chaque date d'observation, un système linéaire d'équation. Si l'on ne considère qu'un pixel, le nombre d'équations à résoudre est inférieur au nombre d'inconnues à déterminer (T équations contre $3 \times T$ inconnues si l'on a T observations). Si l'on fait l'hypothèse que les signatures pures ne varient pas d'un pixel à l'autre (hypothèse de stationnarité spatiale), on peut augmenter le nombre d'équations du système linéaire en multipliant le nombre de pixels étudiés. Pour déterminer les signatures pures des trois classes, on procède alors par minimisation d'une erreur moyenne calculée sur tous les pixels mixtes de la zone d'apprentissage (Eq. III.1). Cette même équation, permet, une fois que les signatures pures sont identifiées, d'estimer les pourcentages d'occupation du sol π_{ij} sur la région en dehors de la zone d'apprentissage de l'algorithme.

$$RMSE_i = \sqrt{\frac{1}{T} \times \sum_{t=1}^T [Y_i(t) - \pi_{ij} \times y_j(t)]^2} \quad (\text{Eq. III.1})$$

Avec

$Y_i(t)$: indice de végétation *NDVI* du pixel mixte i ;

π_{ij} : surface occupée par la classe j dans le pixel i ;

$y_j(t)$: signature pure *NDVI* attribuée à la classe j ;

T : nombre d'observations des données BR.

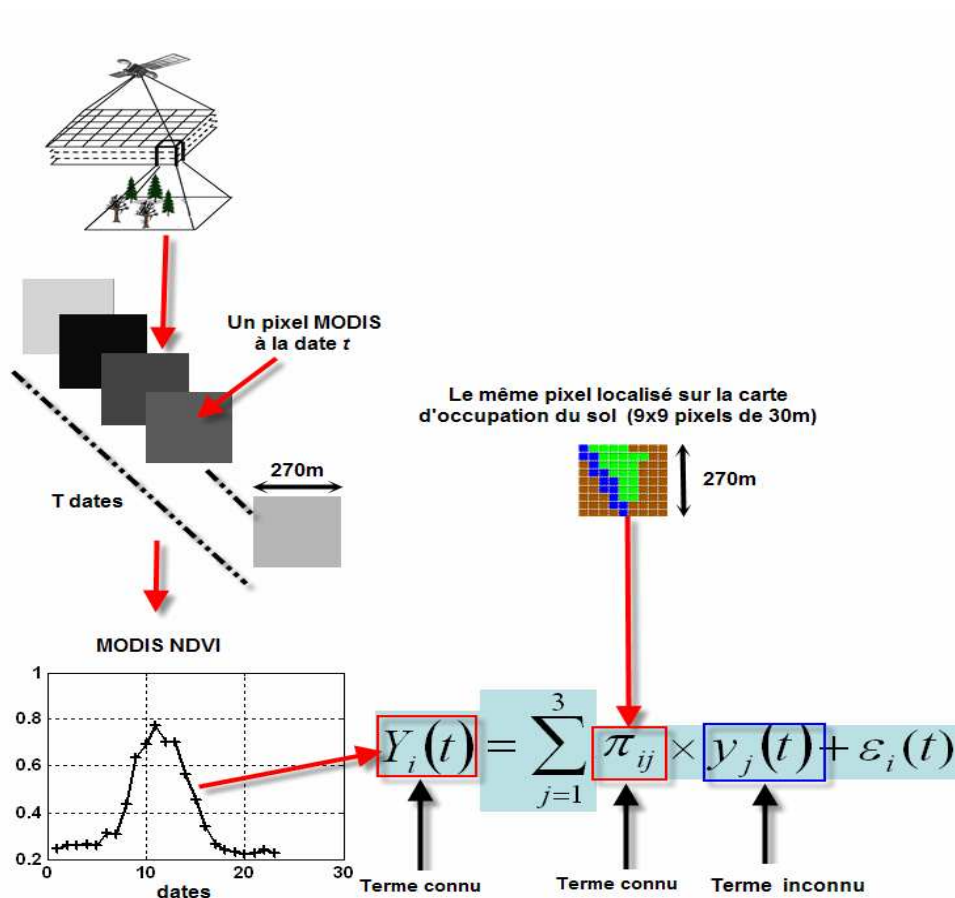


Figure III.10: Principe de la méthode supervisée pour l'identification des signatures pures $y_j(t)$ des classes d'occupation du sol.

III-2.1.2 Choix de la zone d'apprentissage

Une étude spécifique a été menée pour étudier l'influence du choix de la zone d'apprentissage, en utilisant différents échantillons de taille 15 x 15 km (environ 15 % de la scène couverte par les données 2002-2003, cf. Figure III.1). Pour cette étude, nous avons appliqué la méthode supervisée sur des données simulées (cf. II.4.3) à la résolution de VEGETATION (990 m) en utilisant successivement comme zone d'apprentissage tous les carrés de 15 x 15 km inclus dans la zone d'étude. Nous avons procédé par balayage de la zone avec un pas de un pixel (30 m). En tout, nous avons testé 589 zones d'apprentissage, à chacune desquelles correspond un triplet de signatures pures et une carte d'occupation du sol. Ces différents triplets sont analysés, ainsi que l'erreur moyenne sur la restitution de l'occupation du sol (Eq. III.2) sur la zone non utilisée pour l'apprentissage.

$$RMSE = \frac{1}{3} \times \sum_{j=1}^3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nbpixel} (\pi_{ij}^{est} - \pi_{ij}^{obs})^2}{nbpixel}} \quad (\text{Eq. III.2})$$

Avec

$nbpixel$: nombre de pixels mixtes traités;

π_{ij}^{est} : pourcentages de classes estimés par la méthode;

π_{ij}^{obs} : pourcentages de classes déterminés à partir de la carte de l'occupation du sol à 30 m (2002-2003).

Les faisceaux de signatures identifiées (Figure III.11) sont étroits et cohérents avec le comportement phénologique de chacune des classes d'intérêt. Le premier type de signatures (Figure III.11a) correspond aux arbres car les valeurs sont stables et relativement élevées (autour de 0.5). Les signatures de la classe « sol nu » présentent un maximum de $NDVI$ qui ne dépasse pas 0.2 (Figure III.11b). Enfin, les signatures de la classe « culture annuelle » (Figure III.11c) comportent la dynamique saisonnière la plus

élevée, avec un minimum en début et fin de saison et un maximum autour du jour 180 (mois de février).

En première analyse, la Figure III.11 montre également que toutes les zones d'apprentissage testées fournissent approximativement les mêmes jeux de signatures pures. Les plus fortes variations locales sont observées pour la classe « arbre » en mars-avril (Figure III.11a, jours 180 à 240), du fait de l'hétérogénéité de la végétation basse à cette période de l'année (maximum de développement des herbacées et des cultures céréalières). Ces variations n'ont en premier ordre pas d'impact significatif sur la restitution de l'occupation du sol. L'erreur associée (RMSE, Eq. III.2 et Figure III.12) est comprise entre 0.09 et 0.13, et sa variation n'est pas très clairement dépendante de la composition de la zone d'apprentissage. On notera toutefois que l'erreur est minimale lorsque la représentativité des classes est maximale (autour de 20 % d'arbre, 45 % de sol nu et 35 % de culture annuelle) et qu'elle augmente systématiquement lorsque cette représentativité n'est plus assurée (pourcentage de sol nu supérieur à 80 % ou inférieur à 20 %, pourcentage d'arbre et de culture annuelle inférieurs à 10 %).

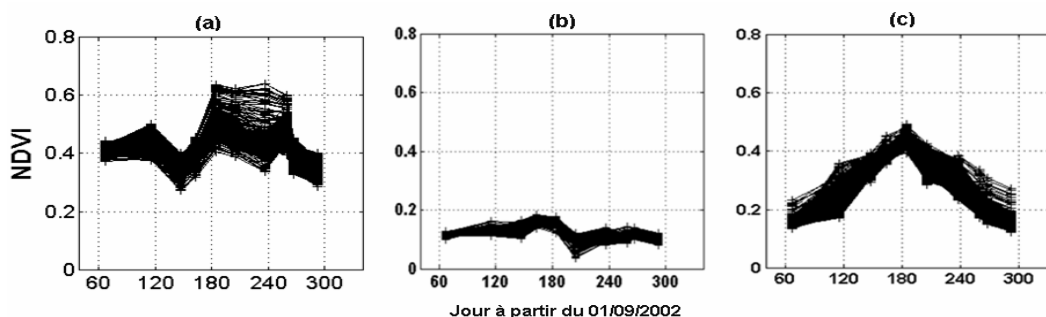


Figure III.11: Faisceaux de signatures des classes : (a) « arbre », (b) « sol nu » et (c) « culture annuelle » estimés à partir de toutes les zones d'apprentissage testées.

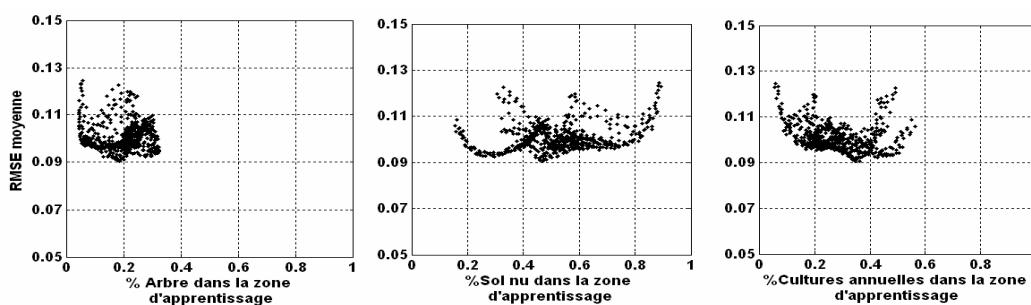


Figure III.12: Variation de l'erreur sur l'occupation du sol en fonction de la composition de la zone d'apprentissage.

Ces premiers résultats soulignent la robustesse de la méthode dans les conditions de mise en œuvre spécifique à cette étude, où l'on cherche à cartographier les trois classes dominantes en plaine du Tensift, qui possèdent des comportements phénologiques très contrastés, à partir de séries temporelles de *NDVI*. Ils illustrent également la possibilité d'utiliser conjointement les données HR et BR pour étendre spatialement la connaissance de l'occupation du sol, avec une précision attendue de l'ordre de 10 %. Dans ce qui suit, on cherche à conforter ces premiers résultats et à étudier l'impact de la résolution des images et des effets géométriques. La méthode a ainsi été testée sur des données réelles et sur des données simulées à la même résolution (270 et 990 m). Dans tous les cas, on a utilisé la meilleure zone d'apprentissage, c'est-à-dire celle qui engendre l'erreur la plus faible. Pour les données simulées à 990 m de résolution, manipulées dans cette section, cette meilleure zone est localisée sur la Figure III.13 et est associée à des erreurs de prédiction de l'occupation du sol inférieures d'environ 0.09 (voir la Figure III.12).

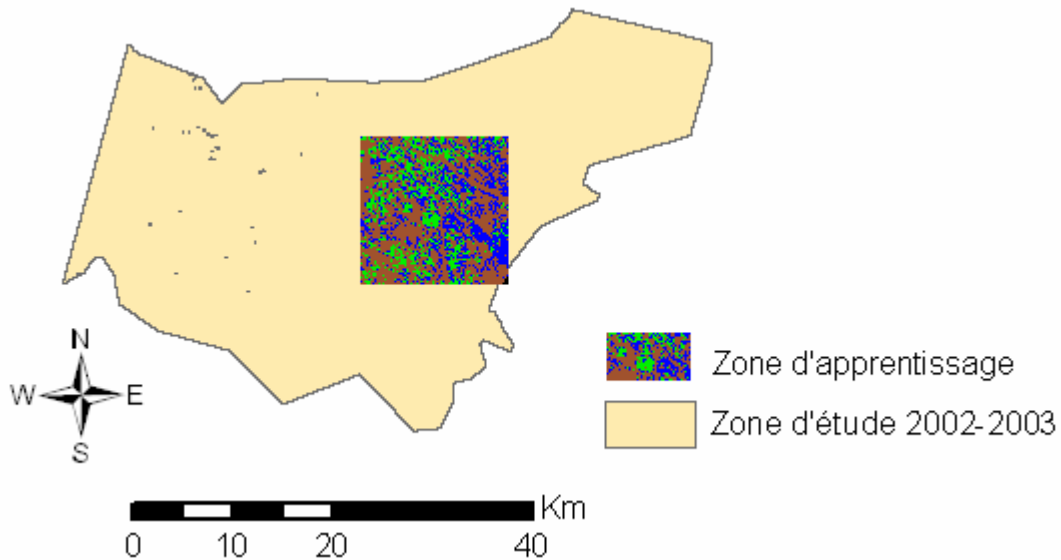


Figure III.13: Zone d'apprentissage pour laquelle l'erreur sur l'occupation du sol est minimale.

III-2.1.3 Profils types de *NDVI*

On présente ici une comparaison des signatures pures restituées par la méthode supervisée appliquée sur les données simulées et réelles acquises de septembre 2002 à août 2003. La méthode a été appliquée à quatre jeux de données:

- 1- 24 synthèses *NDVI* issues de MODIS à la résolution de 270 m;
- 2- 36 synthèses *NDVI* issues de VEGETATION à la résolution de 990 m;
- 3- Deux jeux de 10 images simulées à ces mêmes résolutions (270 m et 990 m) en dégradant les données Landsat et SPOT 4-5 (cf. II-4).

Pour ces quatre jeux de données, nous analysons les résultats en deux temps, en regardant tout d'abord le comportement phénologique des classes (signatures pures), puis en discutant les erreurs associées à la restitution de l'occupation du sol. Ces erreurs sont calculées à différentes échelles en confrontant les pourcentages d'occupation du sol estimés par désagrégation avec ceux dérivés des données HR.

Les signatures pures des trois classes sont représentées par la Figure III.14 (résolution de MODIS) et la Figure III.15 (résolution de VEGETATION). Dans tous les cas, les signatures apparaissent bien représentatives des trois classes: un *NDVI* stable autour de 0.4 pour les arbres, de faibles valeurs de *NDVI* pour les « zones non irriguées » qui ne dépassent pas 0.3 et enfin un profil de *NDVI* avec une amplitude significative pour les cultures annuelles. En première analyse, il n'y a pas d'effet notable de la résolution sur ces signatures. En revanche, l'examen des Figure III.14 et III.15 montre l'existence d'un biais (d'environ ~0.15) entre les profils de *NDVI* restitués à partir des données simulées et ceux restitués à partir des données BR. Ce biais est particulièrement visible pour les données MODIS (Figure III.14) et pour les classes « culture annuelle » et « sol nu » au début et au milieu de la saison agricole (entre octobre 2002 et mars 2003). Cette tendance se retrouve également, mais dans une moindre mesure, pour les données VEGETATION (Figure III.15). Ce biais est en premier lieu attribuable aux différences radiométriques observées entre les différents jeux de données (cf. II-4.3). Son existence confirme qu'il aurait été difficile d'utiliser le signal radiométrique issu d'un jeu de

données pour déconvoluer le signal issu d'un autre jeu de données. Cela concerne en particulier la démarche, *à priori* naturelle, de définition de signatures pures à partir des images à haute résolution spatiale.

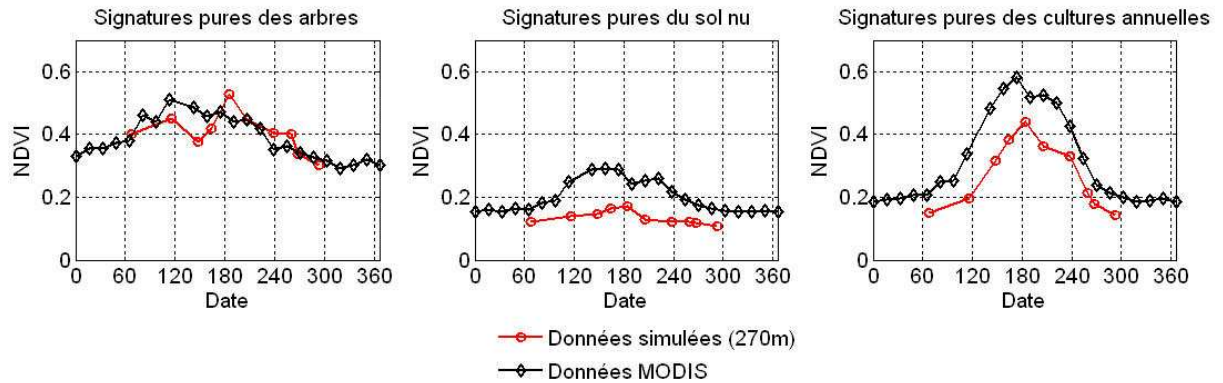


Figure III.14: Signatures pures des classes « arbre », « sol nu » et « culture annuelle » calculées par la méthode supervisée à partir des données simulées (270 m) et des données MODIS. Les jours sont comptés à partir du 1^{er} septembre 2002.

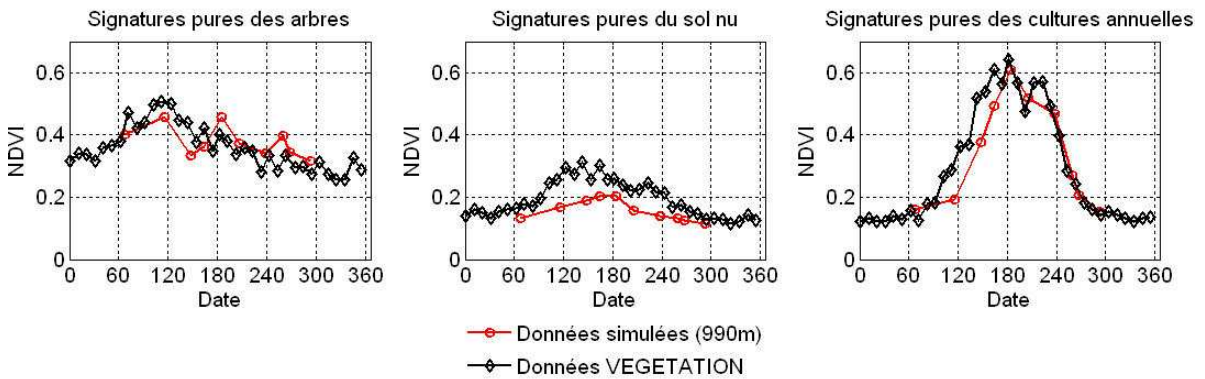


Figure III.15: Signatures pures des classes « arbre », « sol nu » et « culture annuelle » calculées par la méthode supervisée à partir des données simulées (990 m) et des données VEGETATION. Les jours sont comptés à partir du 1^{er} septembre 2002.

III-2.1.4 Occupation du sol

L'occupation du sol restituée par la méthode supervisée est confrontée aux données de références (cf. Figure III.6). Les estimations des pourcentages des trois classes sont effectuées par déconvolution du signal réel (MODIS ou VEGETATION) ou simulé (à partir des données HR). Cette comparaison fait l'objet du tableau III.6 et des Figure III.16 et III.17. L'examen visuel de ces figures montre que les zones à fortes et à faibles pourcentages de chacune des classes sont bien détectées par la méthode. Ce résultat est vérifié pour les trois classes avec: (1) un fort pourcentage de sol nu en dehors des secteurs irrigués, en particulier dans la moitié ouest de la région d'étude, (2) une forte présence de culture annuelle dans les secteurs aménagés de la partie orientale, ainsi que dans le piémont atlasique, et (3) un fort pourcentage de vergers dans les zones qui bordent l'oued du Tensift au nord et dans le secteur irrigué NFIS à l'ouest. Cette distribution spatiale est réaliste. En effet, les tendances visibles sur les cartes d'occupation du sol de référence sont comparables à celles restituées par déconvolution, et l'écart entre les surfaces occupées par chacune des grandes classes d'occupation du sol apparaît globalement limité (4 % au maximum, Tableau III.6).

Tableau III.6: Composition moyenne de la zone étudiée.

	carte référence	supervisée
% arbre	23,1%	26,9%
% sol nu	50,8%	50,2%
% culture annuelle	26,1%	22,9%

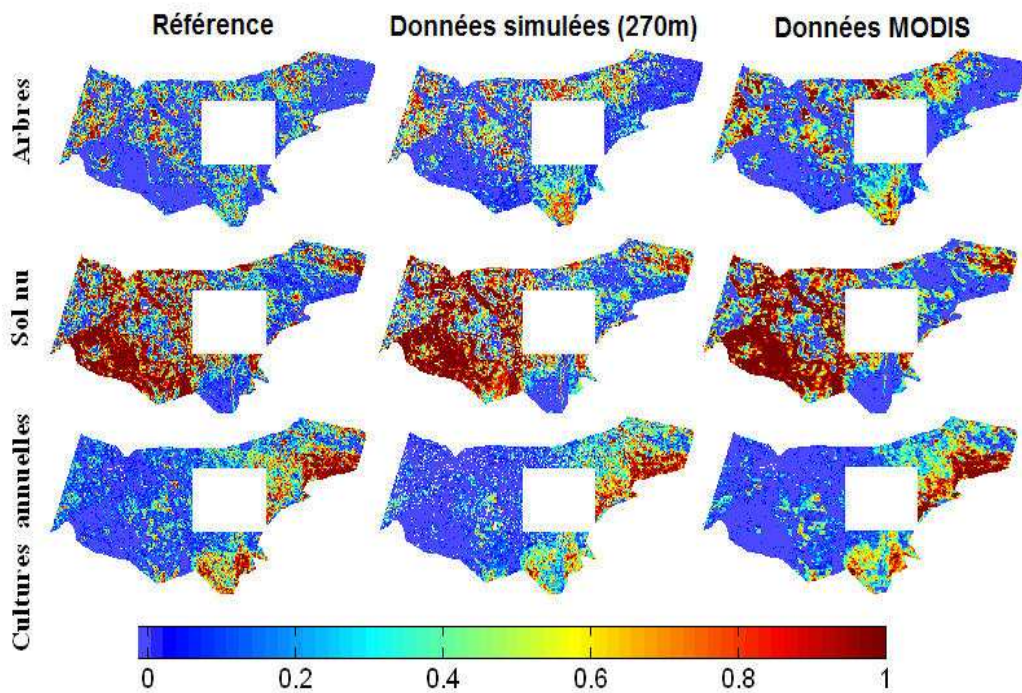


Figure III.16 : Occupation du sol à la résolution de 270 m calculée à partir des données HR (à gauche) et en appliquant la méthode supervisée avec des signatures pures identifiées à partir de données simulées (au milieu) et de données MODIS (à droite).

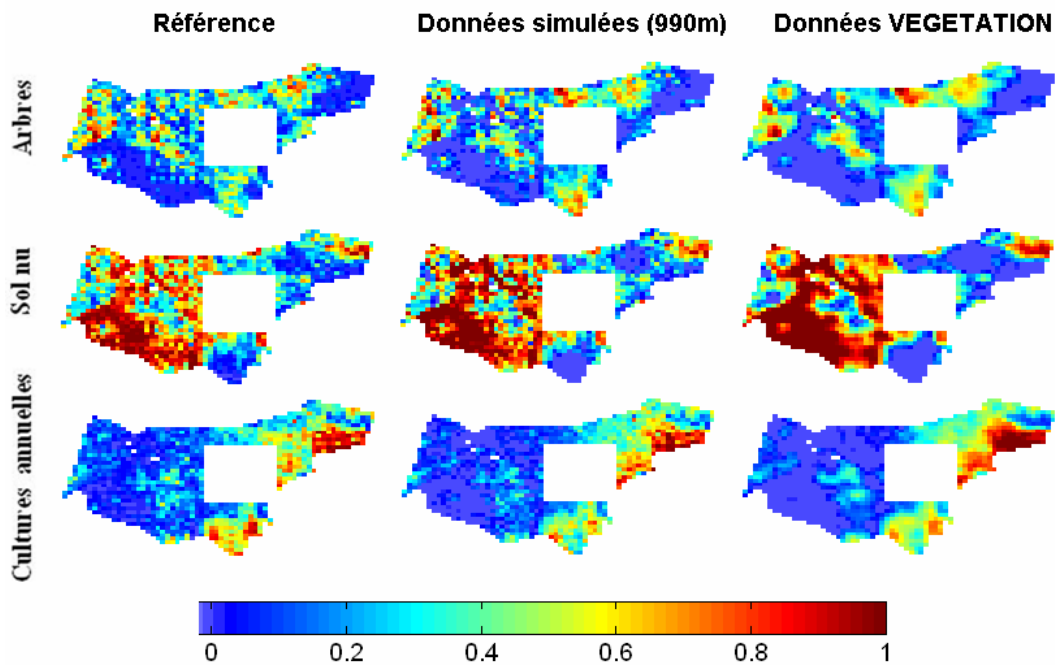


Figure III.17: Occupation du sol à la résolution de 990 m calculée à partir des données HR (à gauche) et en appliquant la méthode supervisée avec des signatures pures identifiées à partir de données simulées (au milieu) et de données VEGETATION (à droite).

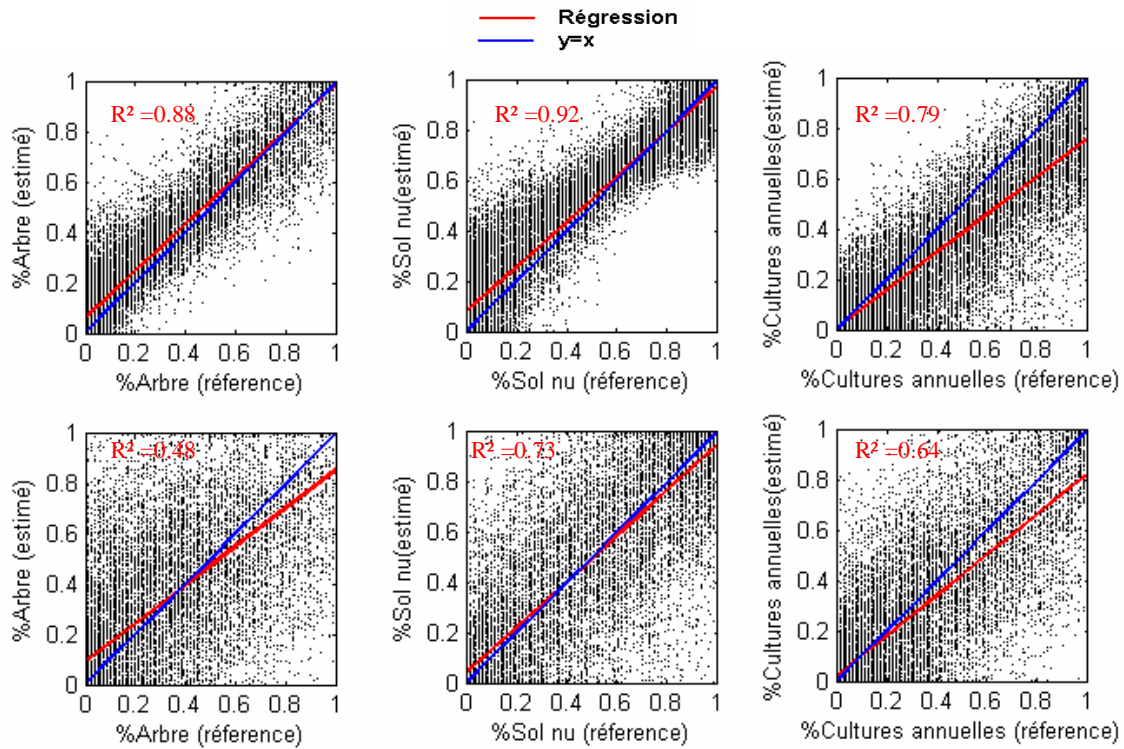


Figure III.18: Occupation du sol estimée par la méthode supervisée en fonction de l'occupation de référence. Données simulée à 270 m (en haut) et MODIS (en bas).

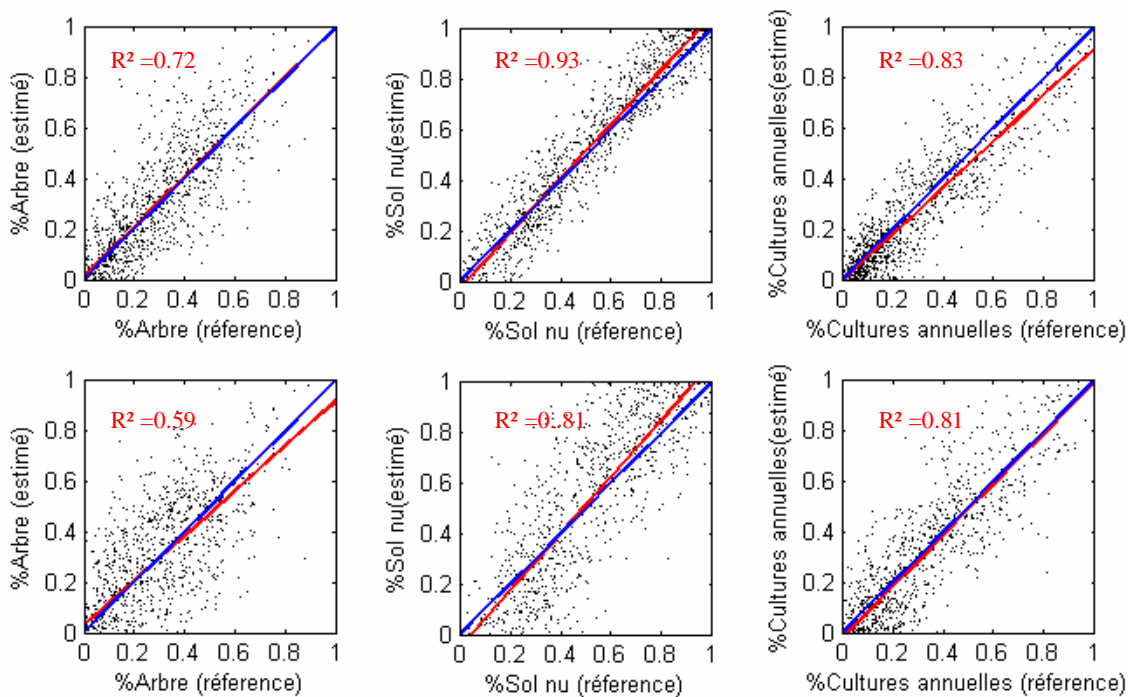


Figure III.19: Occupation du sol estimée par la méthode supervisée en fonction de l'occupation de référence. Données simulée à 990 m (en haut) et VEGETATION (en bas)..

Cette première analyse qualitative est complétée par l'analyse des erreurs entre l'occupation du sol de référence et celle restituée par la méthode de désagrégation appliquée aux quatre différents jeux de données (Figure III.18 et III.19). On constate en premier lieu que la méthode supervisée donne de meilleures estimations lorsque les données simulées sont utilisées, la dispersion du nuage de point autour de la 1^{ère} bissectrice étant dans ce cas plus faible (comparer les parties supérieures et inférieures des Figure III.18 et III.19). De plus, il semble que cette réduction de la dispersion entre les données réelles et simulées soit plus significative pour MODIS que pour VEGETATION. Il y a deux explications à ceci: (1) un effet de lissage des erreurs à faible résolution spatiale et (2) une meilleure qualité géométrique des données VEGETATION.

Ces remarques sont confirmées par l'analyse des variables statistiques classiques (cf. annexe 3) entre estimations et référence (RMSE, corrélation et biais, Tableau III.7). On remarque en premier lieu que les écarts entre l'occupation du sol à haute et basse résolution spatiale sont du même ordre que ceux enregistrés lors de la validation des cartes à haute résolution spatiale à partir des données de terrain. On constate cependant, que les biais restent faibles quelque soit le jeu de données utilisé. Le niveau d'erreur enregistré lorsque les données simulées sont utilisées est de l'ordre de 0.1. Il s'agit de la part de l'erreur, incompressible, qui s'explique par le caractère réducteur de la méthode dans la recherche des trois grandes classes d'occupation du sol sur une région d'étude beaucoup plus riche en termes de types de cultures et de comportements phénologiques. D'autre part, les performances de la méthode de désagrégation diminuent lorsque l'on passe des données simulées aux données réelles: la RMSE augmente de 0.1 à 0.2 pour MODIS et de 0.1 à 0.15 pour VEGETATION et R^2 diminue sensiblement, surtout pour MODIS. Dans le cas de données réelles, une part de l'erreur est imputable à la qualité de ces données, et en particulier à la qualité de superposition des images avant le procédé de synthèses temporelles des données. D'après cette analyse, cette part d'erreur est à peu près du même ordre que celle de l'erreur incompressible précitée; elle est légèrement supérieure pour MODIS que pour VEGETATION.

Enfin, on signale que les performances de la méthode supervisée varient sensiblement d'une classe à l'autre. En particulier, les pourcentages de la classe « arbre » restitués à haute et basse résolution spatiale apparaissent nettement moins corrélés que ceux des deux autres classes. L'explication tient pour partie au fait qu'il n'existe pas de grandes régions dédiées à l'arboriculture (voir les cartes Figure III.16 et III.17) mais que les plantations sont réparties plus uniformément sur la région d'étude. On peut également invoquer la précision du comptage automatique par le logiciel OLICOUNT (Gauthier 2004) et la forte hétérogénéité de cette classe (espacement des arbres, taille et densité de leurs couronnes....).

Tableau III.7: Variables statistiques (RMSE, R², biais) par jeux de données et par classes d'occupation du sol.

	RMSE			R ²			Biais		
	% arbre	% sol nu	% culture annuelle	% arbre	% sol nu	% culture annuelle	% arbre	% sol nu	% culture annuelle
Données simulées (270m)	0.11	0.12	0.18	0.88	0.92	0.79	0.05	0.03	-0.08
Données MODIS	0.24	0.21	0.19	0.48	0.73	0.64	0.04	-0.01	-0.03
Données simulées (990m)	0.12	0.10	0.11	0.72	0.93	0.83	0.01	0.02	-0.02
Données VEGETATION	0.15	0.17	0.12	0.59	0.81	0.81	0.00	0.01	-0.02

III-2.2 Méthode non supervisée

III-2.2.1 Principe

La méthode non supervisée rend le processus d'estimation des signatures pures quasi-automatique et ne nécessite aucune information d'apprentissage autre que le nombre de classes que l'on recherche. Le principe de la méthode, illustré en Figure III.20, comprend deux phases : une phase de compression de l'information et une phase d'identification des signatures pures des classes recherchées. La phase de compression de l'information est une classification non supervisée qui tend à regrouper les pixels

ayant des profils temporels comparables. La phase d'identification des signatures est basée sur un algorithme de recherche statistique et itératif, qui opère sous l'hypothèse qu'il existe des pixels purs (ou très dominés par une classe d'intérêt) au sein de l'image à basse résolution. L'algorithme identifie les pixels purs comme étant ceux dont les profils temporels expliquent au mieux les profils de tous les autres pixels (en majorité mixtes) extraits de la série d'images considérée. Nous avons appliqué cette méthode aux données BR à la résolution la plus fine (MODIS, 270 m) pour que l'hypothèse précitée ait le maximum de chance d'être vérifiée. Afin de procéder à une étude comparative avec la méthode supervisée, nous avons considéré la série de synthèses de *NDVI* MODIS collectée sur la saison agricole 2002-2003 et nous avons fixé le nombre de classes d'occupation du sol recherchées à trois.

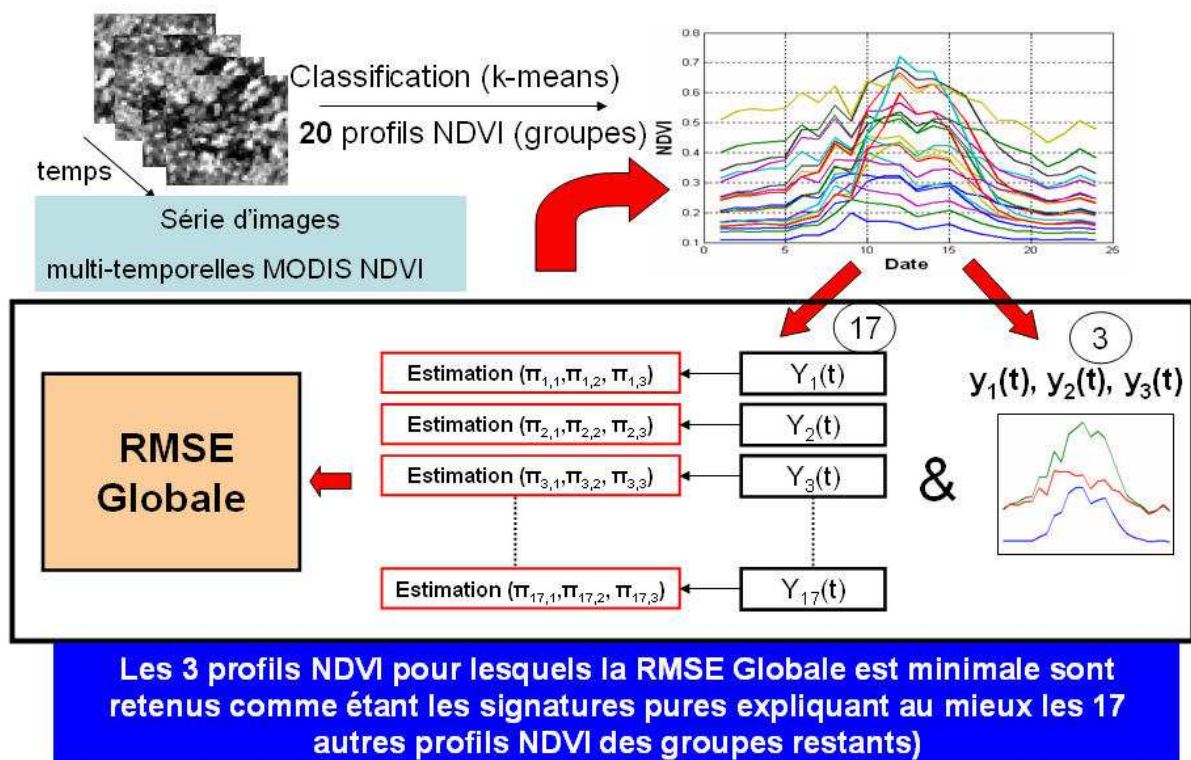


Figure III.20: Principe de la méthode non supervisée pour l'identification des signatures pures. Le principe est illustré pour la recherche de trois classes parmi vingt possibles. Y_i représentent les profils de *NDVI* mixtes et π_{ij} représentent les pourcentages de la classe j au sein du pixel i .

L'algorithme de classification non supervisée choisi pour comprimer l'information est de type k -moyennes ou k -means (Tou and Gonzalez 1974). Il est appliqué sur les

données MODIS acquises de septembre 2002 à août 2003 pour regrouper les pixels ayant des profils de *NDVI* similaires et dégager des « classes phénologiques » ou classes de fonctionnement dynamique de la végétation. Après de multiples essais, le nombre de groupes a été fixé à vingt, nombre représentant un bon compromis pour limiter le coût de mise en œuvre de la phase (suivante) d'identification des signatures pures tout en conservant un niveau de détails suffisant pour décrire la variabilité spatiale et temporelle de la végétation dans la région d'étude.

L'identification des signatures pures est réalisée sur les profils moyens associés aux vingt groupes issus de la classification « k-moyennes ». Il s'agit d'un test itératif appliqué successivement à tous les triplets de profils que l'on peut extraire des vingt groupes précédemment définis. Le nombre total de test est égal au nombre de triplets différents que l'on peut générer à partir d'un groupe de vingt individus, soit C_{20}^3 . Chaque triplet de profils de *NDVI* est considéré comme un candidat potentiel représentant les signatures pures des trois classes recherchées. Ce triplet candidat est utilisé pour estimer une occupation du sol pour les dix sept groupes restants par déconvolution, en procédant, comme dans le cas de la déconvolution supervisée, par minimisation de la RMSE (Eq. III.3) entre chacun des dix sept profils de *NDVI* de ces groupes et les profils reproduits à partir des trois signatures considérées comme pures associées à différentes occupations du sol. Après cette minimisation, une erreur globale est calculée M_k (Eq. III.4), qui caractérise la capacité de ce triplet à reproduire les profils moyens de *NDVI* des dix sept groupes. Enfin, les triplets sont triés par ordre croissant d'erreur globale et le triplet qui affiche la valeur minimale est considéré comme le meilleur candidat pour représenter les signatures pures. Ce triplet est qualifié de rang 1, le triplet qui le succède de rang 2 etc.

$$RMSE_i = \sqrt{\frac{1}{T} \times \sum_{t=1}^T [\varepsilon_i(t)]^2} \text{ Avec } \pi_{ij} \geq 0 \text{ and } \sum_{j=1}^3 \pi_{ij} = 1 \quad (\text{Eq. III.3})$$

$$M_k = \sqrt{\frac{1}{[(N-3) \times T]} \times \sum_{i=1}^{N-3} \sum_{t=1}^T [\varepsilon_i(t)]^2} \quad (\text{Eq. III.4})$$

$$\text{Avec } k \in [1, nb] \text{ et } nb = C_N^3 = \frac{N!}{3 \times (N-3)!}$$

Où :

π_{ij} : pourcentage de la classe j dans le pixel i ;

ε_i : différence entre le profil mixte i et le profil reproduit par la combinaison des signatures pures et les pourcentages d'occupation du sol π_{ij} ;

i : indice sur le pixel;

t : date;

T : nombre d'observations MODIS;

k : indice sur le nombre de triplet possible;

N : nombre de groupe ($N=20$);

nb : nombre total de triplet.

Une fois que les signatures pures sont identifiées, les pourcentages d'occupation du sol sont estimés par déconvolution du signal mixte, c'est-à-dire minimisation de l'erreur (Eq. III.3) entre les profils de *NDVI* MODIS et les profils reproduits à partir de ces signatures sous différentes hypothèses d'occupation du sol. Cette opération de minimisation est appliquée pixel par pixel sous la contrainte que les pourcentages des classes soient positifs et compris entre 0 et 1 et que leur somme soit égale à 1.

III-2.2.2 Profils types de *NDVI*

La méthode non supervisée est appliquée sur la zone où l'on dispose de la carte d'occupation du sol à 30 m pour la saison agricole 2002-2003. Les profils de *NDVI* des

vingt groupes issus de la classification « k-moyennes » sont présentés en Figure III.21. L'algorithme « k-moyennes » tend à grouper les pixels selon deux critères :

- 1- La densité de végétation pérenne, dont la variation est clairement visible sur le niveau des profils « plats » (*NDVI* moyens de 0.15 à 0.55);
- 2- La présence de culture annuelle, dont le cycle de croissance/sénescence est restitué par l'amplitude des profils, soit la différence entre les valeurs de *NDVI* en milieu de saison et celles en début et fin de saison (d'environ 0.15 à 0.75).

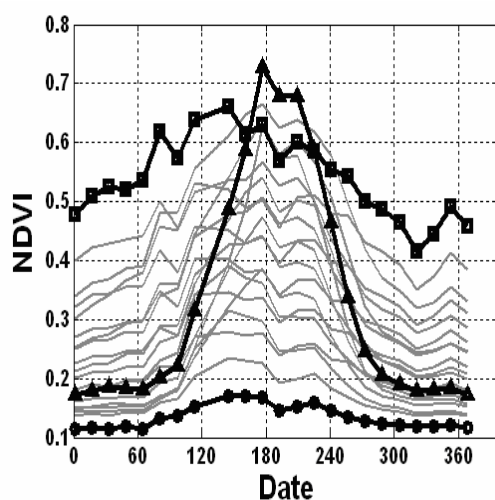


Figure III.21: Profils de *NDVI* issue de la classification «k-moyennes » pour la saison 2002-2003 (traits gris) appliquée la « zone référence ». Les trait épais représentent les signatures pures de *NDVI* des trois classes étudiées: « arbre » (■), « sol nu » (●) et « culture annuelle » (▲). Les jours sont comptés à partir du 1^{er} septembre 2002.

L'analyse des trois signatures retenues par la méthode d'identification des signatures pures en Figure III.21 montre que la méthode non supervisée tend à sélectionner les profils de *NDVI* qui affichent des valeurs extrêmes et à rejeter les profils ayant des valeurs intermédiaires. Ces signatures semblent décrire au mieux le comportement et le cycle de croissance des trois classes recherchées :

- la première signature montre de fortes valeurs de *NDVI* tout au long de la saison (entre 0.45 et 0.65) et apparaît comme représentative d'une végétation pérenne dense (classe « arbre ») ;

- la deuxième signature affiche des valeurs de *NDVI* dont le maximum ne dépasse pas 0.2 et semble caractériser au mieux la classe « sol nu » ;
- la troisième signature possède l'amplitude saisonnière maximale, avec un minimum en novembre pour la période de semis, un maximum autour de mi-mars, lorsque les cultures céréalières sont en plein développement végétatif et enfin une décroissance du *NDVI* en fin saison correspondant à la période de la sénescence.

Afin d'analyser plus profondément ces résultats, nous avons calculé les compositions de chacun des vingt groupes restitués par l'algorithme de classification « k-moyennes ». Il s'agit d'extraire, à partir de la carte d'occupation du sol de référence, la composition de chaque groupe. Cette composition est définie par les proportions des trois classes d'intérêt : « sol nu », « culture annuelle » et « arbre » (Tableau III.8). Les trois groupes sélectionnés par la méthode non supervisée pour représenter les signatures pures affichent les plus forts pourcentages de chacune des trois classes par rapport aux dix sept groupes restants (non sélectionnés par la méthode). La pureté des trois groupes de rang 1 est de l'ordre de 71 % pour la classe « arbre », 88 % pour la classe « culture annuelle » et 98 % pour la classe « sol nu ». Au premier ordre, on pourra donc considérer que: 1) notre hypothèse d'étude, c'est-à-dire que les pixels purs existent à la résolution spatiale de 270 m, est valable; 2) la méthode que nous avons développé arrive à identifier les signatures associées à ces pixels. Cependant, le groupe sélectionné pour représenter les arbres n'est pas complètement pur, puisqu'il comporte 25 % de culture annuelle. On notera toutefois que des erreurs de classifications des plantations ont été observées, en particulier pour les jeunes arbres peu couvrants (confusion avec la classe « culture annuelle », cf. III-1.3).

Tableau III.8: Composition des vingt groupes de pixels produits par la classification « k-moyennes » des données MODIS 2002-2003. Les trois premiers groupes (couleur grise) sont les groupes sélectionnés par la méthode non supervisée pour représenter les signatures pures. Les nombres en gras représentent le pourcentage le plus élevé de chaque classe.

Groupe	Arbre	Sol nu	Culture annuelle
1	71.1	3.7	25.2
2	1.4	98.2	0.4
3	8.8	2.9	88.3
4	19.4	16.2	64.4
5	54.0	9.2	36.8
6	3.1	88.6	8.3
7	29.4	57.6	13.0
8	40.2	20.9	38.9
9	4.3	93.1	2.5
10	55.3	25.5	19.3
11	3.5	10.7	85.8
12	53.5	3.4	43.1
13	65.5	12.3	22.2
14	2.9	67.0	30.1
15	24.8	41.5	33.7
16	16.9	76.1	7.0
17	33.7	4.4	62.0
18	5.6	39.8	54.6
19	15.4	65.0	19.5
20	41.9	41.9	16.1

III-2.2.3 Occupation du Sol

Les cartes de pourcentages d'occupation du sol estimées à partir des données MODIS avec la méthode non supervisée sont comparées à celles calculées à partir de l'occupation du sol de référence à 30 m en Figure III.22. On constate que la méthode non supervisée a tendance, comme la méthode supervisée, à reproduire les mêmes distributions spatiales des pourcentages au sein de la zone d'étude: forte proportion de « sol nu » dans la partie ouest ; de « culture annuelle » dans les secteurs irrigués du Haouz central et le piedmont de l'Atlas; plantations arborées majoritairement localisées au nord, le long de l'oued Tensift, et dans le secteur irrigué du NFIS à l'ouest. Les occupations du sol de référence et estimées sont, en moyenne sur la zone d'étude, comparables (Tableau III.9).

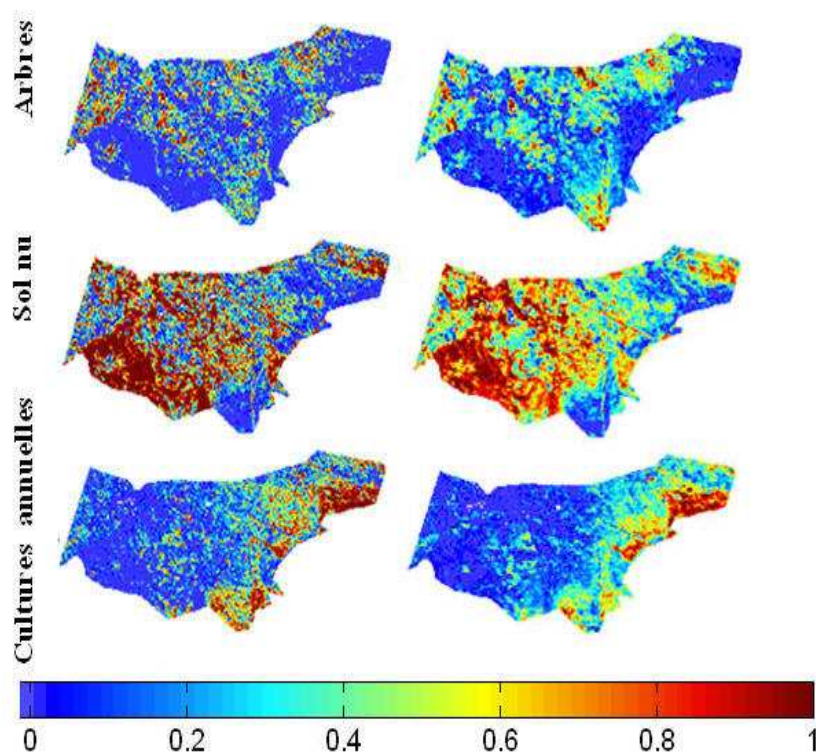


Figure III.22: Occupation du sol à la résolution de 270 m à partir des données à haute résolution spatiale (à gauche) et en appliquant la méthode non supervisée aux données MODIS (à droite).

Tableau III.9: Composition moyenne de la zone étudiée.

	carte référence	Non supervisée
% arbre	22,3%	23,1%
% sol nu	50,9%	53,1%
% culture annuelle	26,8%	23,7%

L'analyse quantitative des résultats présentée en Figure III.23 et Tableau III.10 est réalisée à la résolution du pixel MODIS (270 m) et à la résolution de 4x4 pixel (~1 km). Les tendances sont comparables à celles observées à partir des résultats de la méthode supervisée : (1) les indicateurs statistiques indiquent un niveau de performance semblable ; (2) les résultats à la résolution de 270 m sont nettement moins bons qu'à la résolution de 1 km ; (3) les estimations sont meilleures pour les classes « culture

annuelle» et « sol nu » que pour la classe arbre car la signature type de cette dernière classe n'est pas tout à fait pure.

Tableau III.10 : Variables statistiques calculées entre les pourcentages estimés et ceux de références (2002-2003) à la résolution 270 m et 1 km (4x4pixels).

Classes	A la résolution 270 m					A la résolution ~1 km				
	RMSE	R ²	Biais	a	b	RMSE	R ²	Biais	a	b
% Arbre	0.20	0.48	0.02	0.50	0.13	0.1	0.71	-0.01	0.78	0.05
%Sol nu	0.21	0.71	0.02	0.62	0.22	0.1	0.9	-0.02	0.80	0.12
%Culture annuelle	0.19	0.61	-0.04	0.64	0.05	0.1	0.82	0.03	0.83	0.01

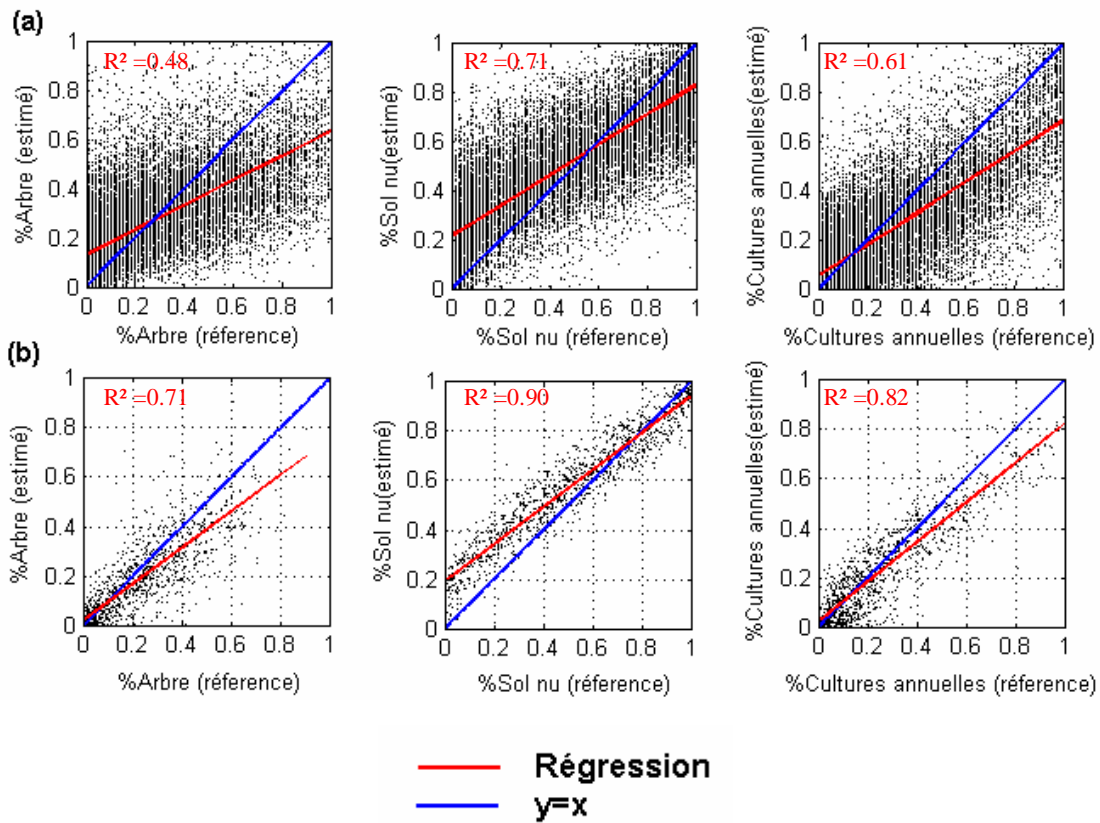


Figure III.23: Comparaison de l'occupation du sol estimée par la méthode non supervisée et de l'occupation du sol de référence à la résolution de 270 m (en haut) et à la résolution de ~1km (en bas).

La principale différence entre les deux méthodes est l'existence d'un biais (comparer les droites de régression des Figure III.23, et Figure III.18). Ces différences sont dues au principe d'identification des signatures. La méthode supervisée produit des signatures pures moyennes sous l'effet d'apprentissage, tandis que la méthode non supervisée tend à choisir des signatures pures extrêmes. Les différences apparaissent clairement entre les niveaux moyens de *NDVI* pour les classes « arbres » et « sol nu » (Figure III.24). L'amplitude du *NDVI* de la signature de la classe « annuelles » est plus élevée dans le cas de la méthode non supervisée.

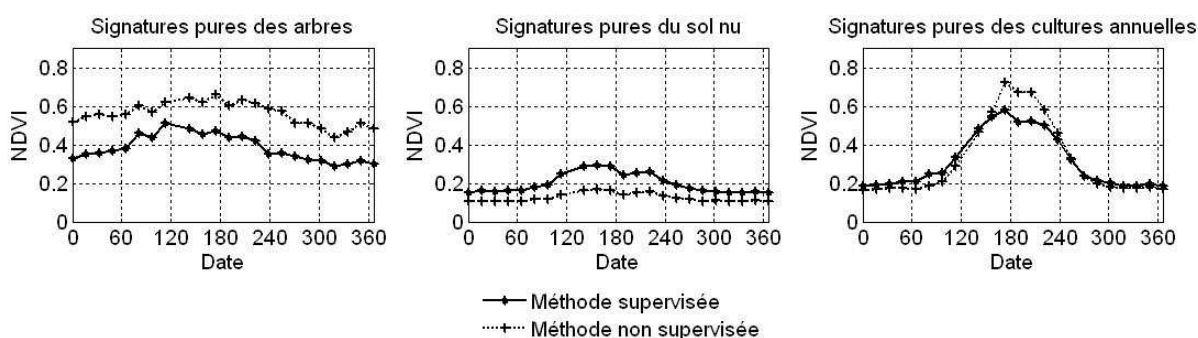


Figure III.24: Comparaison des signatures pures estimées par les deux méthodes de désagrégation. Les jours sont comptés à partir du 1^{er} septembre 2002.

Malgré ces différences, on peut constater que l'occupation du sol est globalement reproduite de manière équivalente par les méthodes supervisée et non supervisée (Tableau III.11). Les erreurs des deux méthodes sont comparables (autour de 0.2, Tableau III.12 **Error! Reference source not found.**) et en moyenne, la composition de l'occupation du sol de la zone est bien restituée dans les deux cas.

Tableau III.11: Moyenne des classes sur la zone d'étude de 2002-2003.

	carte référence	supervisée	non supervisée
% arbre sur toute la zone	23,1%	26,9%	23,8%
% sol nu sur toute la zone	50,8%	50,2%	53,3%
% culture annuelle sur toute la zone	26,1%	22,9%	22,8%

Tableau III.12: Comparaison des performances des deux méthodes à la résolution de 270 m.

Classe	Supervisée			Non supervisée		
	R ²	RMSE	Biais	R ²	RMSE	Biais
Arbre	0,48	0,24	0,04	0,50	0,20	0,01
Sol nu	0,73	0,21	-0,01	0,75	0,19	0,03
Culture annuelle	0,63	0,19	-0,03	0,63	0,18	-0,03

III-2.3 Effets de co-registation et de résolution

Nous avons étudié la sensibilité de la méthode aux problèmes de superposition/co-registation des données en décalant artificiellement les données de référence par rapport aux données basse résolution. L'effet de ce décalage est étudié dans le cas de la méthode supervisée qui nécessite une zone d'apprentissage à haute résolution. On rappelle ici que ces données à haute résolution avaient été superposées au mieux aux données à basse résolution par un procédé de corrélation croisée (cf. II-4.2). Ici, nous avons testé la méthode supervisée à partir de plusieurs zones d'apprentissage décalées en X et en Y avec des décalages croissants de 30 mètres (1 pixel de 30 m) à 1 kilomètre (30 pixels). Dans chaque configuration, on met en œuvre la méthode de désagrégation et on calcule une erreur entre les pourcentages des classes de cultures estimés et ceux donnés par la carte d'occupation du sol sur la zone d'apprentissage. Cette étude a été menée à partir de données MODIS et VEGETATION. On illustre les résultats pour ce dernier cas.

La carte des erreurs (RMSE) en fonction du décalage géométrique entre données HR et BR est donnée en Figure III.25. On constate que l'erreur augmente avec le décalage, de manière quasi-isotrope et quasi-linéaire; sa valeur pour le décalage maximum considéré ici (1 km, soit 1 pixel VEGETATION) est grosso modo le double de celle enregistrée en l'absence de décalage (données superposées par cross-correlation). On remarquera que l'erreur supplémentaire associée au décalage original constatée sur les données VEGETATION est de l'ordre de 30 % (0.13 contre 0.09 après décalage de $D_x = 180$ m et $D_y = 330$ m, cf. II-4.2). Dans le cas des données MODIS, le décalage de $D_x = 330$ m et $D_y = 480$ m accroît l'erreur d'estimation des proportions d'un facteur 2, de 0.18 à

0.41. Ces résultats confirment que la méthode supervisée est très sensible aux effets de superposition entre les données.

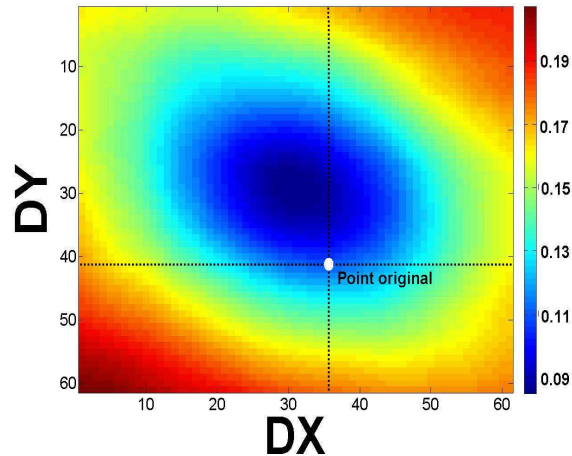


Figure III.25: Variation de la RMSE entre les pourcentages estimés et ceux donnés par la carte d'occupation du sol en fonction des décalages Dx et Dy (Données VEGETATION).

Enfin, nous avons étudié la performance de la méthode en fonction de la résolution spatiale (Figure III.26). Cette étude est également menée dans le cas de la méthode supervisée mise en œuvre à partir de données simulées et réelles (MODIS et VEGETATION), mais nous considérons que ces résultats sont relativement indépendants des conditions de mise en œuvre de désagrégation. Les cartes d'occupation du sol rendues par cette méthode ont été agrégées à différentes résolutions de 1 à 10 pixels (par simple moyennage) et nous avons calculé des statistiques globales sur les données agrégées. Quel que soit le jeu de données utilisé, on constate sur la figure III.26 une nette amélioration des performances de la méthode lorsque la résolution spatiale diminue : l'erreur globale (moyenne des erreurs par classe) diminue de moitié et la corrélation augmente significativement. L'erreur constatée lorsque les données simulées sont utilisées est attribuable à la simplification de la réalité par la méthode (description du signal mixte à partir de seulement trois signatures types). Cette erreur incompressible est de l'ordre de 0.15 à 250 m de résolution et 0.03 à 10 km de résolution. La courbe d'erreur a un comportement asymptotique et le gain de performance est principalement observé lorsque l'on passe de la résolution d'un pixel à

la résolution de 4 pixels, soit environ 1 km pour MODIS et 4 km pour VEGETATION. L'erreur constatée pour MODIS et VEGETATION est supérieure à celle observée pour les données simulées, et cette dégradation des performances peut être imputée aux distorsions ou artefacts de nature radiométrique et géométrique qui entachent les données réelles. Le facteur de dégradation est de l'ordre de 1.5 pour MODIS, avec par exemple à pleine résolution une erreur de 0.21 contre 0.14 pour les données simulées. Il est un peu moindre pour VEGETATION, de l'ordre de 1.35, ce qui est probablement une expression de la meilleure qualité géométrique de ces données.

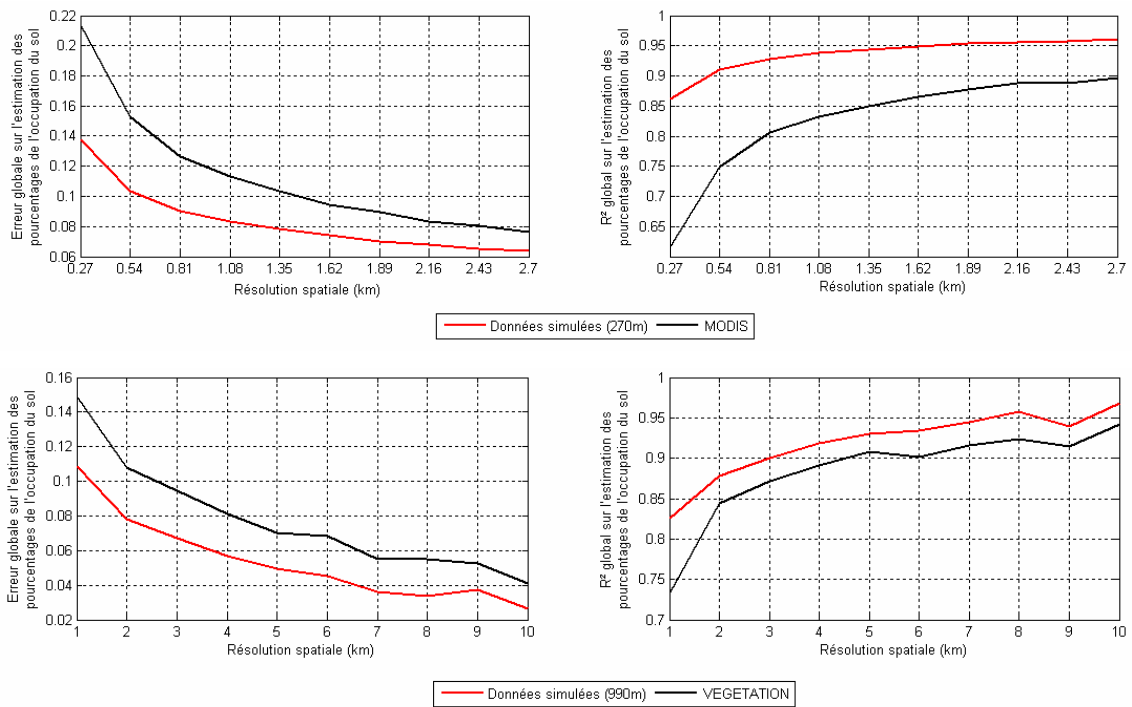


Figure III.26: Variation des statistiques de performances associées à l'estimation de l'occupation du sol en fonction de la résolution spatiale (MODIS en haut et VEGETATION en bas). L'erreur globale et le R² global sont la moyenne des RMSE et du R² sur les trois classes d'occupation du sol.

III-3 OCCUPATION DU SOL A BASSE RESOLUTION SPATIALE: APPLICATION DE LA METHODE NON SUPERVISEE (PERIODE 2000-2006)

La méthode non supervisée n'utilisant aucune connaissance *à priori*, est appliquée sur la période 2000-2006 en utilisant l'archive de données MODIS. Chaque saison agricole est traitée séparément, en considérant la série d'images de *NDVI* acquises de septembre (année N) à août (année N+1). Le nombre de classes recherchées est toujours fixé à trois. On procède tout d'abord à une nouvelle évaluation des résultats de la méthode par confrontation à la carte d'occupation du sol de référence établie en 2005-2006 à l'aide des données FORMOSAT-2. On analyse dans un deuxième temps les variations temporelles (inter-annuelles) des signatures pures et de l'occupation du sol restituées par la méthode.

III-3.1 Evaluation à partir des données FORMOSAT-2

L'analyse quantitative des résultats présentée en Figure III.23 et Tableau III.10 est réalisée à la résolution du pixel MODIS (270m) et à la résolution de 4x4 pixels (~1 km). Les tendances sont comparables à celles observées sur la saison agricole test (2002-2003, III-2.1.4), avec des corrélations moins bonnes (baisse de 0.1 sur R^2) et des erreurs plus fortes d'un facteur 1.5 pour les classes « sol nu » et « culture annuelle » (comparer le Tableau III.13 et Tableau III.7). A la résolution de 270 m, les plus fortes erreurs sont constatées lorsqu'une classe prédomine. Elle est alors sous-estimée, et la principale cause de cette sous-estimation tient à l'utilisation de profils « extrêmes » comme signatures pures lors de la mise en œuvre de la désagrégation. A contrario, une classe très faiblement représentée est surestimée. Cette tendance s'atténue lorsque l'on agrège les données à la résolution kilométrique (4x4 pixels) en raison des compensations des sous-estimations et des sur-estimations (Figure III.27).

Tableau III.13 : Variables statistiques calculées entre les pourcentages estimés et ceux de références (2005-2006) à la résolution de 270 m et 1 km.

Classes	A la résolution 270 m					A la résolution ~1 km				
	RMSE	R ²	biais	a	b	RMSE	R ²	biais	a	b
% Arbre	0.16	0.43	0.01	0.50	0.06	0.05	0.65	0.00	0.63	0.02
%Sol nu	0.25	0.56	-0.03	0.48	0.14	0.16	0.76	-0.06	0.58	0.10
%Culture annuelle	0.28	0.42	0.03	0.42	0.35	0.16	0.74	0.06	0.60	0.25

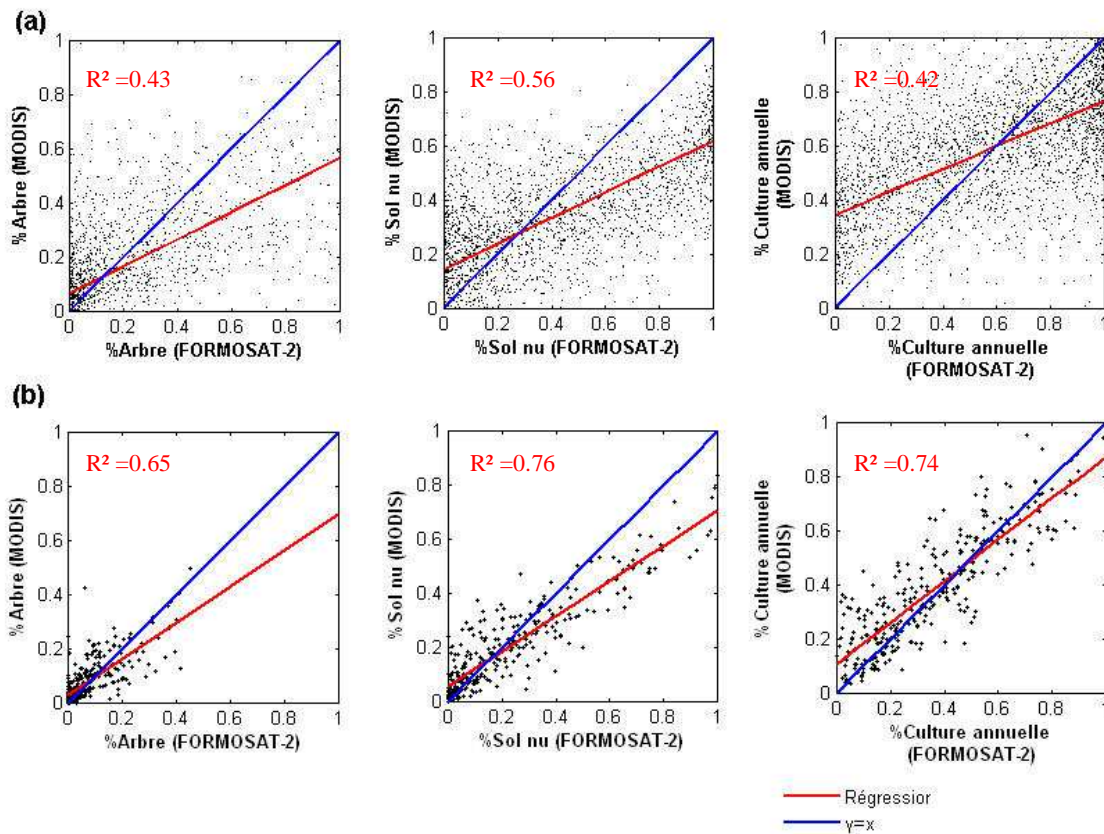


Figure III.27 Comparaison de l'occupation du sol estimée par la méthode non supervisée appliquée aux données simulée à 270 m à l'occupation à haute résolution spatiale (a) à la résolution de 270 m, (b) à la résolution de ~1km (4x4 pixels). (Saison 2005-2006).

III-3.2 Profils types de *NDVI*

Les signatures pures restituées par la méthode non supervisée sont présentées dans les Figures III.28 et III.29. Nous disposons d'un profil type de chaque classe et pour chacune des six saisons agricoles étudiées, de 2000-2001 à 2005-2006. A l'exception de deux cas particuliers discutés ci-dessous, ces profils ont été identifiés de manière totalement automatique (rang 1 dans le procédé de minimisation, cf. III-2.2.1).

Les signatures pures des classes « arbre » et « sol nu » correspondent à nos attentes (Figure III.28a et Figure III.28b, respectivement). Les premières sont relativement stables tout au long de la saison avec des valeurs de *NDVI* assez élevées (>0.4). Les deuxièmes correspondent à la classe « sol nu », avec des *NDVI* presque constants autour de valeurs faibles, en moyenne de 0.15 et toujours inférieures à 0.22. La stabilité inter-annuelle des profils types de ces deux classes est remarquable.

En général, le troisième type de signatures pures présente un pic de *NDVI* très marqué caractéristique des cultures annuelles (Figure III.29). On observe une phase de croissance de décembre à mars suivie presque immédiatement d'une période de sénescence, et des valeurs de *NDVI* proches de celles d'un sol nu en dehors de ces périodes. Cette signature correspond au comportement phénologique des céréales, la principale culture annuelle dans la région d'étude. Pour deux saisons agricoles, les profils de rang 1 identifiés par la méthode sont toutefois atypiques:

- En 2001-2002, le profil présente un pic faible (~0.4) et décalé (fin avril), qui apparaît en relation avec la disponibilité d'eau. Cette saison est en effet caractérisée à la fois par des précipitations tardives (cumul des précipitations de 70 mm en mars et 190 mm en juin, Figure III.30) et par les faibles dotations en eau d'irrigation provenant des barrages (environ 80 contre 180 mm en moyenne sur les cinq autres saisons agricoles de la période 2000-2006, cf. II-3.6). Cette signature, représentative d'une végétation fortement stressée, n'est donc pas adéquate pour représenter le comportement

phénologique « normal » des cultures annuelles. Nous l'avons remplacée par la moyenne des signatures pures identifiées pour les autres saisons (Figure III.29a).

- En 2003-2004, le profil de rang 1 témoigne au contraire d'une phénologie précoce, avec une augmentation de *NDVI* dès le mois de Novembre (Figure III.30). Cette anomalie peut également être attribuée à une pluviométrie excédentaire en début de saison (cumul de 170 mm avant le 10 Décembre, cf. Figure III.30), qui a entraîné l'avance du développement de la végétation naturelle ou du semis des cultures céréalières. En analysant les autres profils de *NDVI*, il est apparu que le profil de rang 2 est comparable aux signatures pures des autres saisons (Figure III.29b). Ce profil a donc été utilisé en substitut du profil de rang 1 comme signatures pures des cultures annuelles en 2003-2004.

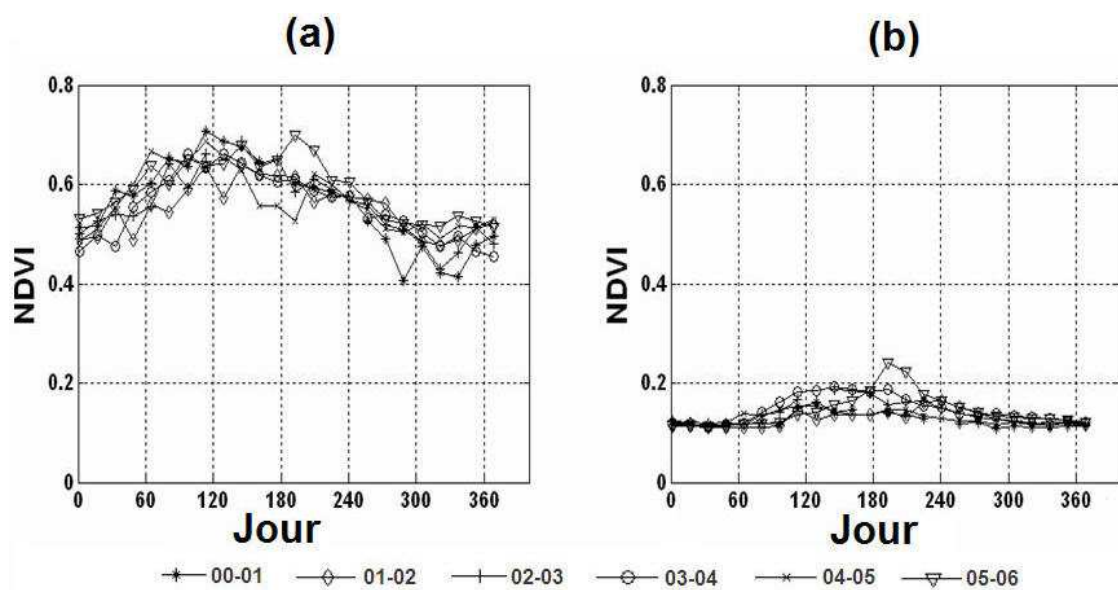


Figure III.28: Signatures pures estimées pour six années (saisons agricoles 2000-2001 à 2005-2006) : classe « arbre » (a); classe « sol nu » (b). Les jours sont comptés à parti du 1^{er} septembre.

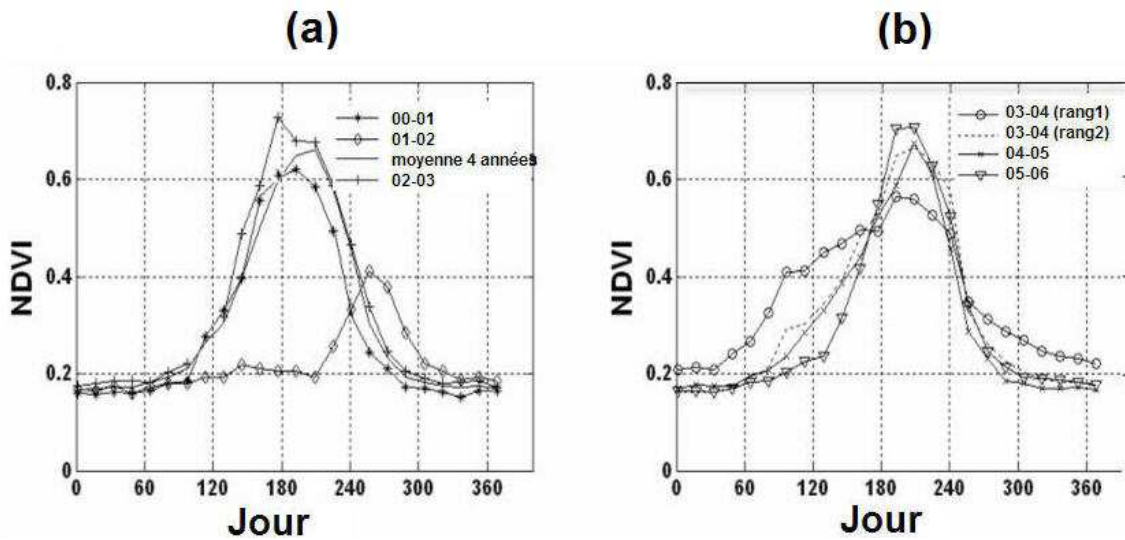


Figure III.29: Signatures pures de la classe « culture annuelle » estimées par la méthode non supervisée sur les 6 années de 2000 à 2006. La signature pure en 2001-2002 a été remplacée par la signature moyenne calculée à partir des saisons 2000-2001, 2002-2003, 2004-2005 et 2005-2006. La signature pure en 2003-2004 a été remplacée par la signature pure de rang 2 dans la procédure d'identification des signatures. Les jours sont comptés à partir du 1^{er} septembre.

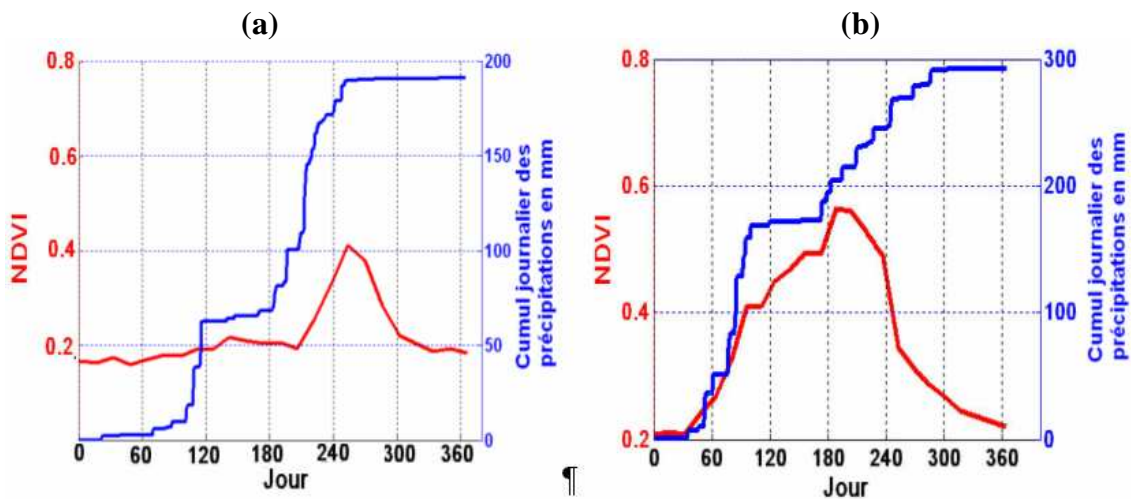


Figure III.30: Signature pure de la classe « culture annuelle » et cumul des précipitations pour la saison 2001-2002 (a) et 2003-2004 (b). Les jours sont comptés à parti du 1^{er} septembre.

III-3.3 Variabilité spatio-temporelle de cartes de l'occupation du sol

L'occupation du sol restituée par la méthode de désagrégation non supervisée à partir des signatures pures précédemment discutées est présentée en Figure III.31. On remarque en premier lieu que les variations spatiales des pourcentages des trois classes sont généralement conservées d'une année sur l'autre. Il y a chaque année un fort taux de sol nu dans la moitié ouest de la région d'étude (en dehors du périmètre irrigué NFIS), un fort pourcentage de culture annuelle dans la moitié est et des vergers concentrés dans le périmètre irrigué du NFIS ainsi qu'au nord de la zone d'étude. En première analyse, on remarquera également que la classe arbre est la plus stabilisée. Ce résultat est encourageant, car ce type de cultures est bien évidemment le plus stable, avec des rotations de quelques décennies (agrumes) à plusieurs centaines d'années (pour certaines oliveraies). En revanche, il y a une plus forte variabilité inter-annuelle du taux d'occupation par les cultures annuelles, avec en particulier le cas de la saison agricole 2001-2002 où l'emblavement apparaît très faible, y compris dans les secteurs irrigués situés à l'est de la région d'étude. Ceci est cohérent avec le caractère très sec de cette saison, avec des pluies faibles et tardives et de fortes restrictions sur les quantités d'eau d'irrigations provenant des barrages.

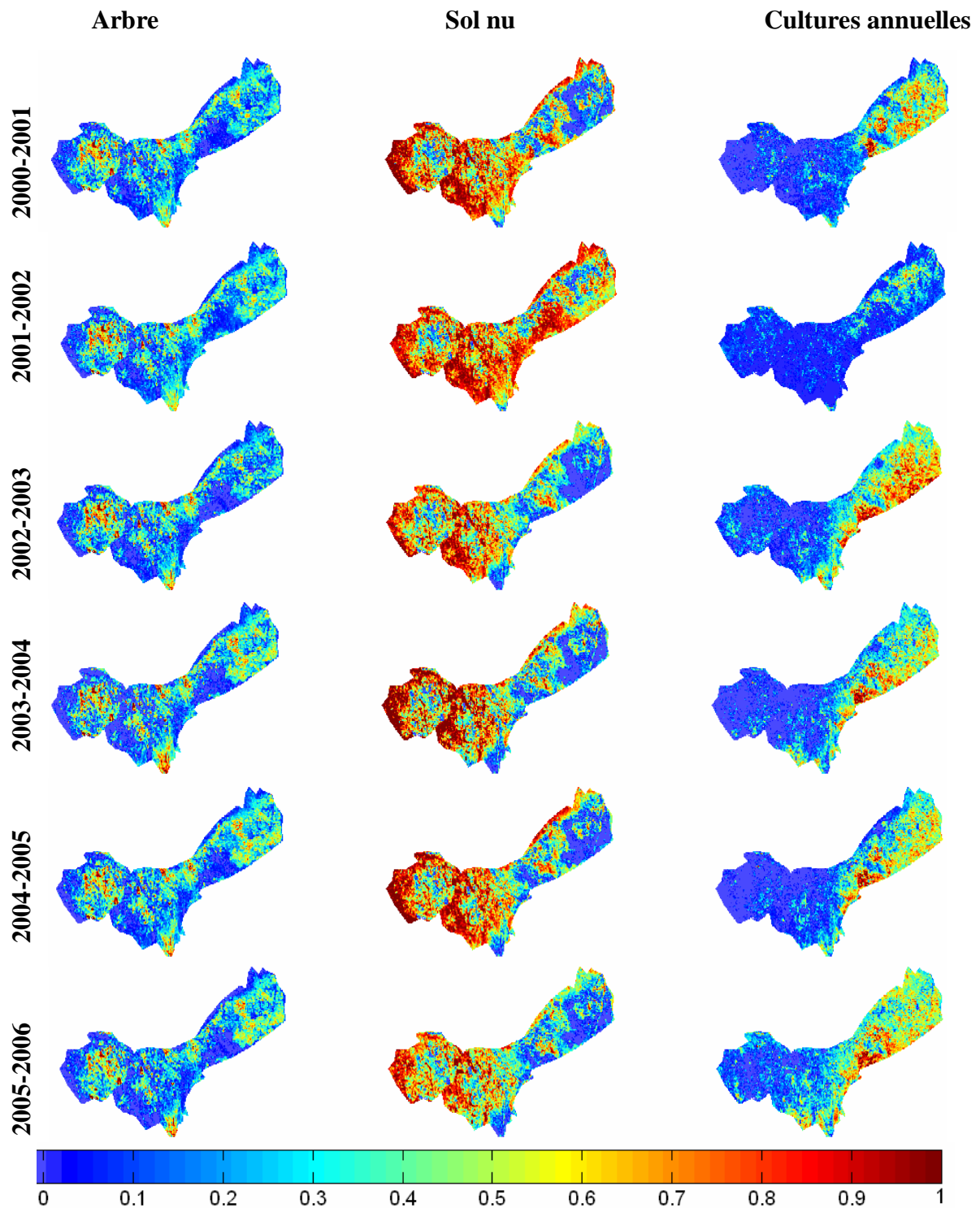


Figure III.31: Occupations du sol restituées par la méthode non supervisée sur la période 2000-2006.

L'évolution de la composition de la région d'étude (Tableau III.14) confirme les premières impressions ressenties à l'analyse des cartes d'occupation du sol. En moyenne sur la région d'étude, la proportion de la classe « arbre » est stable autour de 25.6 % (de 24 % à 29 %). Ces fluctuations minimales peuvent être perçues comme une mesure (relative, d'une année sur l'autre) de la précision de la méthode. En comparaison, la variabilité des deux autres classes est plus forte, avec une sorte de compensation entre « sol nu » et « culture annuelle »: plus le taux d'occupation de l'une de ces deux classes est fort, plus il est faible pour l'autre (et vice-versa). En particulier, le pourcentage de la classe « culture annuelle » régresse fortement en 2000-2001, 2004-2005 et surtout en 2001-2002 (respectivement -14 % et -40 % par rapport à la moyenne 2000-2006) à « l'avantage » de la classe « sol nu », alors qu'il est relativement stable pour les quatre dernières saisons agricoles étudiées.

Tableau III.14: Occupation du sol moyenne en plaine du Tensift (2000-2006).

	2000- 2001	2001- 2002	2002- 2003	2003- 2004	2004- 2005	2005- 2006	Moyenne
% Arbre	24	26.7	23.7	29	26.6	23.7	25.6
% sol nu	55	59.1	46.5	43.8	51	44	49.9
% Culture annuelle	21	14.2	29.8	27.2	22.4	32.3	24.5

Afin d'évaluer les limites de la méthode non supervisée, nous avons calculé les erreurs (Eq III.5) entre les profils observés ($NDVI(t)_{obs}$) et ceux restitués par combinaison linéaire des signatures pures pondérées par leurs pourcentages d'occupation du sol respectifs ($NDVI(t)_{sim}$, Eq. III.6). Cette erreur permet de quantifier la capacité des trois signatures pures à reproduire les variations spatio-temporelles des profils de $NDVI$ issus de MODIS. Les cartes d'erreurs ont été calculées pour chaque année et la carte moyenne sur les six années est donnée en Figure III.32.

$$RMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (NDVI(t)_{obs} - NDVI(t)_{sim})^2}}{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T NDVI(t)_{obs}} \times 100 \quad (\text{Eq. III.5})$$

$$NDVI(t)_{sim} = \sum_{j=1}^3 \pi_{ij} \times \rho_j(t) \quad (\text{Eq. III.6})$$

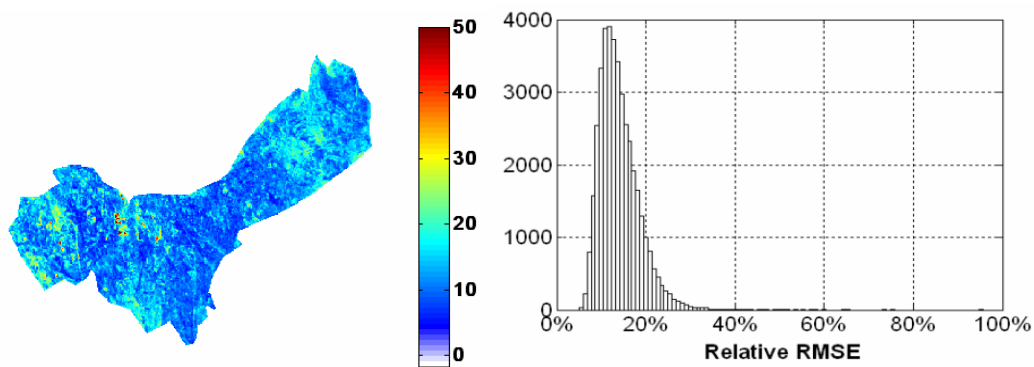


Figure III.32: Carte et histogramme de l'erreur sur la restitution des profils mixtes de *NDVI* sur la plaine du Tensift à l'aide des trois signatures pures de *NDVI*.

La carte d'erreur affiche des valeurs faibles, avec un pic à 12 % sur l'ensemble de la zone d'étude. L'histogramme (Figure III.32) associé à la variation spatiale de l'erreur montre que plus de 90 % des pixels présentent des erreurs inférieures à 20 %. Ces résultats confirment le pouvoir de la méthode non supervisée à reproduire les variations spatio-temporelles du *NDVI* dérivé de MODIS. Toutefois, certains pixels affichent des erreurs fortes. Ceux dont l'erreur est supérieure à 40 % ont été localisés. Ils appartiennent majoritairement au secteur irrigué NFIS à l'ouest de la zone d'étude, où deux cas se présentent.

- **Cas1** (Figure III.33 à gauche)

Le profil de *NDVI* présente deux pics en milieu (janvier, *NDVI* ~0.55) et à la fin de la saison agricole (Avril, *NDVI*~0.7). C'est un cas représentatif d'une succession de cultures maraîchères à cycle court. Ce genre de profil n'est pas reproductible avec les trois signatures pures identifiées par la méthode non supervisée et il est décomposé en 18 % d'arbre 38 % de sol nu et 44 % de culture annuelle.

- **Cas 2** (Figure III.33 à droite)

Le profil de *NDVI* affiche une allure inverse à celle des cultures annuelles avec une large période de croissance entre avril et janvier. Ce genre de profils est typique aux comportements des plantations arborées à feuilles caduques (pêcher, vignes...). Il a été décomposé par la méthode non supervisée en 77 % d'arbre et 23 % de sol nu.

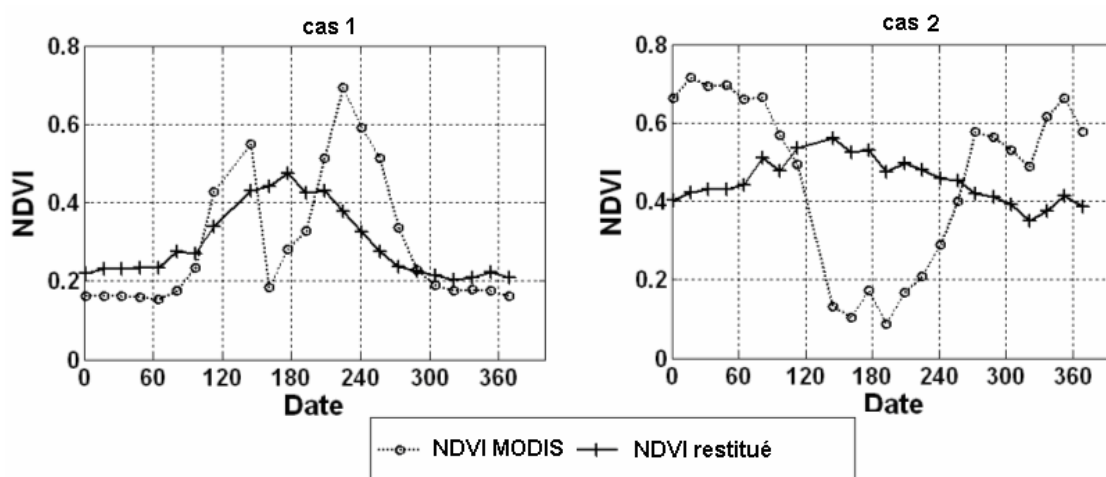


Figure III.33: Profils de *NDVI* incorrectement restitués par la méthode non supervisée (erreurs supérieures à 40%). Les jours sont comptés à partir du 1^{er} septembre 2002.

Pour mieux expliquer la variabilité spatiale et temporelle de l'occupation du sol, nous avons mis en regard les taux d'occupation du sol de chacun des trois grands secteurs irrigués (NFIS, Haouz central, Tessaout amont) avec les données d'irrigation en eaux des barrages (Tableau III.15). On peut constater que, à l'exception de la saison 2001-

2002, les classes « sol nu » et « culture annuelle » occupent des surfaces relativement stables, avec, selon les secteurs, 3 à 5 % de variations autour des valeurs moyennes. La saison 2001-2002 est très particulière. La proportion de plantations apparaît conforme aux valeurs moyennes, mais on observe une baisse importante du pourcentage de cultures annuelles, d'un facteur de 2.5 dans la Tessaout Amont (20 % en 2001-2002 contre 45-50 % pour les autres saisons) et d'un facteur de 5 dans le secteur irrigué du Haouz (7 % contre 37 %). Cette baisse est moins visible dans le NFIS où l'arboriculture domine. Ceci apparaît en première analyse expliqué par la disponibilité d'eau des barrages. En effet, la restriction imposée en 2001-2002 est nette, et elle est d'autant plus nette sur le Haouz (environ 50 mm en 2001-2002 au lieu de 135 mm en moyenne pour les cinq autres saisons) car ce secteur est dédié à la culture céréalière. Les résultats sont cohérents avec le fait que les plantations arborées sont prioritaires en termes d'irrigation.

Tableau III.15: Occupation du sol et irrigation par secteurs irrigués (2000-2006).

Secteurs irrigués	Statistiques	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	Moyenne
NFIS	Arbre (%)	39,7	38,8	40,8	40,4	40,2	38,8	39,8
	Sol nu (%)	51,3	55,0	50,5	50,0	53,9	49,6	51,7
	Culture annuelle (%)	8,9	6,3	8,7	9,6	5,9	11,6	8,5
	Cumul annuel d'irrigation (mm)	104,9	86,3	141,8	213,4	296,8	258,4	183,6
Haouz central	Arbre (%)	15,8	19,6	16,9	20,0	19,3	17,3	18,1
	Sol nu (%)	44,1	73,5	43,0	33,0	40,0	35,6	44,9
	Culture annuelle (%)	40,1	6,9	40,1	47,0	40,7	47,1	37,0
	Cumul annuel d'irrigation (mm)	115,9	47,0	124,1	164,9	200,6	157,4	135,0
Tessaout Amont	Arbre (%)	29,2	31,6	26,8	38,4	37,0	35,3	33,0
	Sol nu (%)	21,7	47,6	16,7	16,5	18,3	18,0	23,1
	Culture annuelle (%)	49,1	20,8	56,5	45,1	44,7	46,8	43,8
	Cumul annuel d'irrigation (mm)	111,3	83,9	104,7	197,7	240,4	177,7	152,6

III-4 CONCLUSION

Dans cette section, nous avons mis en œuvre des méthodes de désagrégation linéaire de données satellites à basse résolution pour restituer l'occupation du sol dans la plaine du Tensift selon trois grandes classes thématiques correspondants aux zones non irriguées, aux cultures annuelles et aux plantations arborées. Des méthodes de désagrégation supervisée et non supervisée ont été développées puis testées sur une saison agricole particulière pour laquelle la partie centrale de la région d'étude avait été intensivement observée à haute résolution spatiale (séries d'images SPOT et Landsat en 2002-2003). Ces méthodes sont appliquées aux séries temporelles de l'indice de végétation *NDVI*, indice le plus couramment utilisé et, dans le cas de MODIS et VEGETATION, distribué gratuitement par internet. Par confrontation à l'occupation du sol déduite des données à haute résolution spatiale, on a montré que les deux types de méthodes ont donné des résultats comparables en termes de précision globale, même si les estimations par la méthode non supervisée sont légèrement biaisées (sous-estimation du taux d'occupation lorsque l'une des classes prédomine). En dépit de cette limitation, l'occupation du sol de la région d'étude apparaît bien restituée (RMSE de l'ordre de 0.1 et biais inférieur à 5 % à la résolution kilométrique) malgré sa représentation fortement réductrice en seulement trois grandes classes. Par comparaison aux résultats obtenus à partir de données simulées, l'étude a également révélé la part des erreurs provenant du caractère imparfait des données réelles, tout particulièrement du point de vue géométrique (biais de géoréférencement et défauts de superposition).

A la différence de la méthode supervisée, la méthode non supervisée de désagrégation de données peut être mise en œuvre en l'absence de toute information complémentaire sur l'occupation du sol et/ou les signatures (profils-types de *NDVI*) de chacune des classes. Il n'est notamment pas nécessaire de disposer de données à haute résolution spatiale, dont la disponibilité n'est pas toujours garantie. La méthode non supervisée a ainsi pu être mise en œuvre sur une période continue constituée de six saisons agricoles successives de 2000 à 2006. La durée relative courte de cette période, la précision des estimations et les fluctuations imputables à d'autres facteurs que l'emblavement (climat), limitent la possibilité de procéder à une analyse des tendances. En revanche,

cette étude pluriannuelle a permis d'une part de conforter la robustesse de la méthode statistique itérative utilisée pour l'identification des signatures pures, et d'autre part de révéler la corrélation entre les fluctuations de l'occupation du sol et les facteurs hydro-climatiques, disponibilité d'eau d'irrigation et pluviométrie en particulier.

Des possibilités d'amélioration de la méthode non supervisée peuvent être envisagées afin de mieux décrire l'occupation de la région d'étude. On peut d'une part augmenter le nombre de classes de fonctionnement (fixé à 20 ici) afin de mieux restituer les variations spatio-temporelle des *NDVI*. Ceci peut être réalisé en augmentant le nombre de groupes lors de l'étape de la classification « k-moyennes » ($N > 20$) dans (Eq. III.4). D'autre part, on pourrait étudier la sensibilité de la méthode non supervisée au nombre de classes que l'on recherche afin d'affiner l'occupation du sol. Ces possibilités n'ont pu être pleinement étudiées dans le temps imparti pour cette étude.

Enfin, il serait également utile de procéder à des études historiques, par exemple à partir de données du capteur AVHRR (archive kilométrique disponible à partir du début des années 90) pour analyser la dynamique de l'occupation sur une plus longue période. Cette analyse permettrait de dégager des tendances à moyen terme sur l'usage des terres de la région. Ce type d'approche pourrait être étendu à l'étude d'autres régions. Outre leur intérêt thématique, ces études devraient permettre de conforter le caractère robuste de la méthode que nous avons développé.

Références

- BALLANTINE, J.A.C., OKIN, G.S., PRENTISS, D.E. and ROBERTS, D.A., 2005, Mapping North African landforms using continental scale unmixing of MODIS imagery. *Remote Sensing of Environment*, **97**, pp. 470-483.
- CARDOT, H. and FAIVRE, R., 2003, Functional approaches for predicting land use with the temporal evolution of coarse resolution remote sensing data. *Journal of Applied Statistics*, **30**, pp. 1185-1199.
- GAUTHIER, Y., 2004, Exploitation d'une image très haute résolution pour la cartographie des plantations et de la végétation naturelle dans la région de Marrakech. *Rapport de stage de l'ENSG*, 56 pages.
- GIARDINO, G., 1997, OTcount / OTvalues technical documentation, version 1.0. Edited by KAY,S. European Commission / Directorate general JRC (Joint Research Centre) / Space Application Institute / Agricultural Information Systems Unit. april 30,1997.
- KERDILES, H. and GRONDONA, M. O., 1995. NOAA-AVHRR NDVI decomposition and subpixel classification using linear mixing in the Argentinean Pampa. *International Journal of Remote Sensing*. **16** 7, pp. 1303–1325.
- KNIGHT, J.F., LUNETTA, R.S., EDIRIWICKREMA, J. and KHORRARN, S., 2006, Regional scale land cover characterization using MODIS-NDVI 250 m multi-temporal imagery: A phenology-based approach. *Giscience and Remote Sensing*, **43**, pp. 1-23.
- PEEDEL, S., 1997, Olicount technical documentation, version 1.0. Edited by KAY,S. European Commission / Directorate general JRC (Joint Research Centre) / Space Application Institute / Agricultural Information Systems Unit, june 1, 1997.
- SIMONNEAUX, V., DUCHEMIN, B., HELSON, D., ER-RAKI, S., OLIOSSO, A. and CHEHBOUNI, A.G., 2008, The use of high-resolution image time series for crop classification and evapotranspiration estimate over an irrigated area in central Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, **29**, pp. 95-116.
- TOU, J.T. and GONZALEZ, R.C., 1974, *Pattern Recognition Principles*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts.

**CHAPITRE IV. Spatialisation du bilan
hydrique et de l'irrigation en plaine du
Tensift**

CHAPITRE IV. SPATIALISATION DU BILAN HYDRIQUE ET DE L'IRRIGATION EN PLAINE DU TENSIFT 203

IV-1 Principes de modélisation et évaluation à l'échelle de la parcelle.....	207
<i>IV-1.1 Dynamique de la végétation</i>	<i>208</i>
IV-1.1.1 Formalismes.....	208
IV-1.1.2 Application et évaluation pour des cultures de blé.....	213
<i>IV-1.2 Module du bilan hydrique sol-végétation atmosphère.....</i>	<i>216</i>
IV-1.2.1 Description du modèle.....	216
IV-1.2.2 Application et évaluation pour des cultures de blé.....	223
IV-2 Spatialisation à partir de données à haute résolution spatiale (formosat-2 saison agricole 2005-2006)	231
<i>IV-2.1 Ajustement spatialisé du modèle de végétation pour les cultures annuelles.....</i>	<i>232</i>
<i>IV-2.2 Application régionale du modèle du bilan hydrique</i>	<i>239</i>
IV-2.2.1 Analyse quantitative (secteur R3).....	243
IV-2.2.2 Analyse qualitative sur la zone FORMOSAT-2	251
IV-3 Spatialisation à partir de données à basse résolution spatiale (MODIS, période 2000-2006)	254
<i>IV-3.1 Approche de spatialisation simplifiée (SIM1).....</i>	<i>254</i>
<i>IV-3.2 Approche par modélisation (SIM2).....</i>	<i>257</i>
<i>IV-3.3 Evaluation des deux approches.....</i>	<i>258</i>
<i>IV-3.4 Application aux saisons agricoles 2000-2001 à 2005-2006</i>	<i>263</i>
IV-4 Conclusion.....	270

Ce chapitre est consacré à l'estimation du bilan hydrique par l'utilisation conjointe d'un modèle agrométéorologique et de données satellites à haute et basse résolution spatiale. Le modèle est composé de deux modules principaux, le premier simulant la dynamique du couvert végétal et le deuxième réalisant le bilan hydrique sol-plante-atmosphère. Dans une première partie, le modèle est présenté, puis évalué à partir de données collectées sur un ensemble de parcelles. Ensuite, on discute le schéma d'ajustement spatialisé du modèle à l'aide des données satellites. Deux tentatives de spatialisation ont été réalisées. La première a permis de confirmer le potentiel des données FORMOSAT-2 acquises durant la saison agricole 2005-2006 pour étudier finement le bilan hydrique et observer les irrigations sur une petite région. Ces résultats ont été utilisés pour évaluer le schéma de pilotage du modèle à partir des produits issus de la désagrégation des images MODIS (occupation du sol et dynamique de la végétation). Dans la dernière partie, on généralise notre étude à l'ensemble de la plaine du Tensift et à la période 2000-2006 en utilisant toute l'archive de données MODIS. On discute les variations spatiales et temporelles des quantités d'eau d'irrigation en fonction des variables hydro-climatiques (disponibilité en eau et demande évaporative). Enfin, on procède à la confrontation de ces résultats aux dotations des secteurs irrigués gérés par l'ORMVAH.

IV-1 PRINCIPES DE MODELISATION ET EVALUATION A L'ECHELLE DE LA PARCELLE

Le modèle utilisé a été développé au CESBIO par Benoît Duchemin et al. (2008). Il fonctionne au pas de temps journalier et comporte un nombre limité de paramètres, ce qui facilite son application à l'échelle régionale. Le modèle est composé de deux modules principaux. Le module « dynamique de la végétation » simule la croissance et la sénescence des feuilles, ainsi que la production de biomasse durant un cycle végétal. Il est calibré à partir de séries temporelles de mesures de l'indice de surface foliaire verte, une de ses variables clefs que l'on désignera également par indice foliaire (vert). Ce premier module est utilisé pour piloter un second module « transfert hydrique », qui calcule les flux d'eau dans le sol et à l'interface sol-plante-atmosphère. Les deux

modules (ou modèles) sont nécessaires pour calculer l'évapotranspiration, principal terme de perte d'eau des systèmes cultivés en plaine semi-aride.

IV-1.1 Dynamique de la végétation

Le modèle de dynamique de la végétation est présenté dans Duchemin et al. (2008). Il a été développé avec le souci de prendre en compte les principaux processus de développement et de croissance de plantes annuelles tout en limitant le nombre de paramètres nécessaires à leur description. Dans cette étude, il est utilisé pour simuler les variables biophysiques du système sol-plante qui interviennent dans le calcul des différents termes du bilan hydrique : indice de surface foliaire vert et total (*GLAI* et *TLAI : Green and Total Leaf Area Index*), et taux de couverture du sol par la végétation (*COV*).

IV-1.1.1 Formalismes

La dynamique de la végétation est appréhendée par la théorie des efficacités de Monteith (1972) pour la photosynthèse et la production de biomasse (phytomasse), et complétée par les paramétrisations de Maas (1993) pour la phénologie et l'allocation des assimilats. Seule la partition feuille/non-feuille de la biomasse produite est réalisée. Le modèle simule les évolutions temporelles de l'indice foliaire vert et de la biomasse aérienne sèche à partir de formalismes relativement simples (six équations comportant treize paramètres, et deux variables d'entrée, Tableau IV.1).

Tableau IV.1: Paramètres et variables du modèle de dynamique de la végétation

Type	Description	Notation	Unité	Valeur	Source
Variables d'entrée					
	Rayonnement global	R_g	$\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$		Station météorologique
	Température moyenne de l'air	T_a	$^{\circ}\text{C}$		
Paramètres					
1	Matière sèche initiale	DAM_0	g.m^{-2}	4.5	Correspond à la valeur de $GLAI$ de 0.1
	Efficience climatique	ε_c	-	0.48	(Varlet-Grancher et al. 1982)
	Coefficient d'interception	k	-	0.5	(Arora V.K. and Gajri 1998; Brisson 1998; Meinke et al. 1998)
	Température minimale de croissance	T_{\min}	$^{\circ}\text{C}$	0	
	Température maximale de croissance	T_{\max}	$^{\circ}\text{C}$	37	(Porter and Gawith 1999)
	Température optimale de croissance	T_{opt}	$^{\circ}\text{C}$	20	
	Surface foliaire spécifique	SLA	$\text{m}^2.\text{g}^{-1}$	0.022	Mesurée au champ
2	Seuil déclenchant la sénescence	S_{TT}	$^{\circ}\text{C}$	1008	Etalonnage
	Vitesse de sénescence	R_s	$^{\circ}\text{C.j}$	6875	Etalonnage
	Paramètre 1 de la fonction de partition	P_{La}	-	$157,3 \times 10^{-3}$	Etalonnage
	Paramètre 2 de la fonction de partition	P_{Lb}	-	$1,96 \times 10^{-3}$	Etalonnage
3	Jour d'émergence de la plante	D_0	j	-	Ajustement local
	Efficience de conversion de la lumière	$ELUE$	g.MJ^{-1}	-	Ajustement local
Variables de sortie					
	Indice foliaire vert	$GLAI$	$\text{m}^2.\text{m}^{-2}$		
	Matière sèche produite	DAM	g.m^{-2}		

La croissance des plantes est initialisée avec une valeur de biomasse initiale le jour de leur levée ou émergence. Il s'agit de la biomasse sèche des parties aériennes du couvert (DAM : *Dry Aerial Mass*, exprimée en g/m^2). Durant la période végétative, l'accroissement de biomasse au jour j , ΔDAM est piloté par le rayonnement global et la température selon trois efficacités (Eq. IV.1) :

(1) l'efficience climatique (ε_c), part du rayonnement photosynthétiquement actif dans le rayonnement global;

(2) l'efficience d'interception des couverts végétaux (ε_l), fraction du rayonnement photosynthétiquement actif absorbée par la canopée;

(3) l'efficience effective de conversion du rayonnement photosynthétiquement actif absorbée en matière sèche aérienne (*ELUE* : *Effective Light-Use Efficiency*).

$$\Delta DAM(j) = R_g(j) \times \varepsilon_c \times \varepsilon_l \times ELUE \times F_T(T_a(j)) \quad (\text{Eq. IV.1})$$

Dans l'équation (Eq. IV.1), le terme $R_g \times \varepsilon_c \times \varepsilon_l$ représente la quantité de rayonnement photosynthétiquement actif absorbé, et le terme $ELUE \times F_T(T_a)$ traduit la capacité des plantes à transformer ce rayonnement en biomasse aérienne sèche. L'efficience d'interception de la lumière par le couvert végétal dépend de l'indice foliaire vert (*GLAI*) et d'un coefficient d'interception (*k*), selon la loi de Beer Lambert (Eq. IV.2), communément utilisée.

$$\varepsilon_l = 1 - e^{-k \times GLAI} \quad (\text{Eq. IV.2})$$

La réponse du couvert à la température ($F_T(T_a)$) dans l'Eq. IV.1) est prise en compte par une fonction polynomiale du second degré (Eq. IV.3), comme cela est le cas dans le modèle de cultures STICS¹⁹ (Brisson et al. 2003). C'est une fonction de la température moyenne de l'air (T_a) à trois paramètres : une température optimale pour la croissance des plantes (T_{opt}) et deux températures extrêmes (T_{min} et T_{max}) en-deçà et au-delà desquelles la croissance des plantes est nulle.

$$\begin{aligned}
 F_T(T_a) &= 1 - [(T_{opt} - T_a) / (T_{opt} - T_{min})]^2 && \text{Si } T_{min} < T_a < T_{opt} \\
 &= 1 - [(T_a - T_{opt}) / (T_{max} - T_{opt})]^2 && \text{Si } T_{max} > T_a > T_{opt} \\
 &= 0 && \text{Si } T_a < T_{min} \text{ ou } T_a > T_{max}
 \end{aligned} \quad (\text{Eq. IV.3})$$

¹⁹ Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard

L'évolution de l'indice foliaire vert ($GLAI$) est calculée par bilan entre un terme d'accroissement de la surface foliaire pendant la phase de croissance du couvert ($\Delta GLAI +$, Eq. IV.4) et un terme de diminution pendant la phase de sénescence ($\Delta GLAI -$, Eq. IV.6). La durée de la phase de croissance et le démarrage de la sénescence sont fonction du temps « thermique », c'est-à-dire du cumul de températures de l'air depuis l'émergence des plantules ($\sum T_a$).

L'accroissement de la surface foliaire (Eq. IV.4) durant la phase de croissance est fonction de la matière sèche produite et de la partition de celle-ci dans les feuilles. La surface foliaire produite est déduite de la matière sèche produite via la surface foliaire spécifique (SLA : *Specific Leaf Area*). A l'émergence, on considère que toute la biomasse est concentrée dans les feuilles, ce qui permet de calculer l'indice foliaire initial en fonction de la biomasse initiale et de la surface foliaire spécifique. Après l'émergence et pendant la phase de croissance, la biomasse produite est répartie dans les feuilles et dans les tiges. La fonction de partition (P_l) est définie par une fonction à deux paramètres P_{La} et P_{Lb} (Maas 1993). Comme P_{La} est proche de zéro, le facteur de partition décroît exponentiellement avec le cumul de T_a d'une valeur proche de 1 au jour d'émergence jusqu'à une valeur de zéro à la fin du cycle de production des feuilles vertes.

$$\Delta GLAI + (j) = \Delta DAM(j) \times P_l(\sum T_a) \times SLA \quad \text{(Eq. IV.4)}$$

$$P_l(\sum T_a) = 1 - P_{La} \times e^{P_{Lb} \times \sum T_a} \quad \text{(Eq. IV.5)}$$

La sénescence commence lorsque le cumul de la température de l'air $\sum T_a$ atteint une certaine valeur seuil S_{TT} , (Eq. IV.6). Le taux de sénescence ($\Delta GLAI - / GLAI$) augmente avec le temps thermique et est modulé par un paramètre qui définit la vitesse de sénescence (R_s). La sénescence est déclarée complète, et le cycle de végétation

terminé, lorsque la valeur de l'indice foliaire vert atteint une valeur inférieure à sa valeur initiale.

$$\begin{aligned} & \text{si } \sum T_a > S_{TT} \\ \Delta GLAI - (j) &= GLAI \times (\sum T_a - S_{TT}) / R_s \end{aligned} \quad \text{(Eq. IV.6)}$$

Les autres variables d'intérêt sont déduites de l'indice foliaire vert. L'indice foliaire total est égal à l'indice foliaire vert durant la phase de croissance, puis reste constant jusqu'à la sénescence complète de la végétation (Eq. IV.7). Le taux de couverture par la végétation a été relié empiriquement à l'indice foliaire vert et total (Eq. IV.8). Cette paramétrisation a été effectuée par l'analyse de photographies hémisphériques acquises sur des couverts de blé dans la région d'étude (Duchemin et al. 2008; Hadria 2006). Cette relation prend en compte la perte partielle du feuillage et la diminution de son taux de couverture (changement du port des feuilles) lors de la phase de décroissance.

$$\begin{aligned} \text{Avec } TLAI(j) &= GLAI(j) && \text{si } j < \text{jour du maximum de } GLAI \\ &= \max (GLAI(j)) && \text{si } j \geq \text{jour du maximum de } GLAI \end{aligned} \quad \text{(Eq. IV.7)}$$

$$COV(j) = 0.95 \times (1 - e^{-0.53 \times GLAI(j)}) \times \frac{GLAI(j) + TLAI(j)}{2 \times TLAI(j)} \quad \text{(Eq. IV.8)}$$

IV-1.1.2 Application et évaluation pour des cultures de blé

Le modèle est évalué sur dix sept parcelles, neuf étudiées en 2002-2003 qui ont servi pour la calibration et huit en 2003-2004 qui ont servi pour la validation. Ces parcelles ont été suivies en termes d'indice foliaire par des techniques de mesures indirectes (radiomètre portable Cropscan et photos-hémisphériques, cf. II-3.5).

Le modèle comporte treize paramètres que l'on peut regrouper en trois catégories. La première inclut sept paramètres (partie supérieure du Tableau IV.1) qui ont pu être identifiés *à priori* à partir d'études antérieures et d'expériences de terrain (voir la section 3.2 de Duchemin et al. 2008). La deuxième regroupe quatre paramètres « phénologiques » (partie centrale du Tableau IV.1), qui modulent la forme de la courbe de l'indice foliaire vert. Ces paramètres sont génétiquement dépendants et leurs valeurs sont en premier lieu caractéristiques de la culture et de la variété étudiée. Ils ont été identifiés par une procédure de minimisation sur l'ensemble des parcelles de calibration (voir la section 3.4 de Duchemin et al. 2008). La troisième catégorie est constituée de deux paramètres (partie inférieure du Tableau IV.1) qui témoignent des pratiques culturales: le jour d'émergence, qui dépend avant tout de la date de semis, et l'efficacité effective de conversion de la lumière en biomasse (*ELUE*, Eq. IV.1). Cette dernière est sensée représenter tous les stress agro-environnementaux autres que la température. Elle témoigne donc des pratiques de travail de sol, d'irrigation, de fertilisation, et de traitement phytosanitaire. Ces deux paramètres ont besoin d'être ajustés localement, à l'échelle du pixel ou de la parcelle. La calibration est effectuée par minimisation de l'écart entre les valeurs d'indice foliaire mesurées et simulées. La procédure de minimisation est basée sur l'algorithme « Shuffled Complex Evolution Metropolis » développé par Vrugt et al. (2002).

L'évaluation du modèle est effectuée en comparant les valeurs d'indice foliaire mesurées et simulées. Sur les parcelles de validation, seuls les deux paramètres de la troisième catégorie discutée ci-dessus (jour d'émergence et efficacité effective de conversion de la lumière en biomasse) sont ré-ajustés, les autres restants fixes à leurs

valeurs reportées dans le Tableau IV.1. Le modèle est capable de restituer l'évolution temporelle de l'indice foliaire de toutes les parcelles avec une erreur acceptable, de l'ordre de 0.25 sur les parcelles de calibration (Figure IV.1) et 0.4 sur les parcelles de validation (Figure IV.2).

Des études complémentaires ont par ailleurs montré que, après étalonnage des simulations d'indice foliaire, le modèle était aussi capable de restituer convenablement les variations spatiales et temporelles de la biomasse aérienne sèche en période végétative (Duchemin et al. 2008).

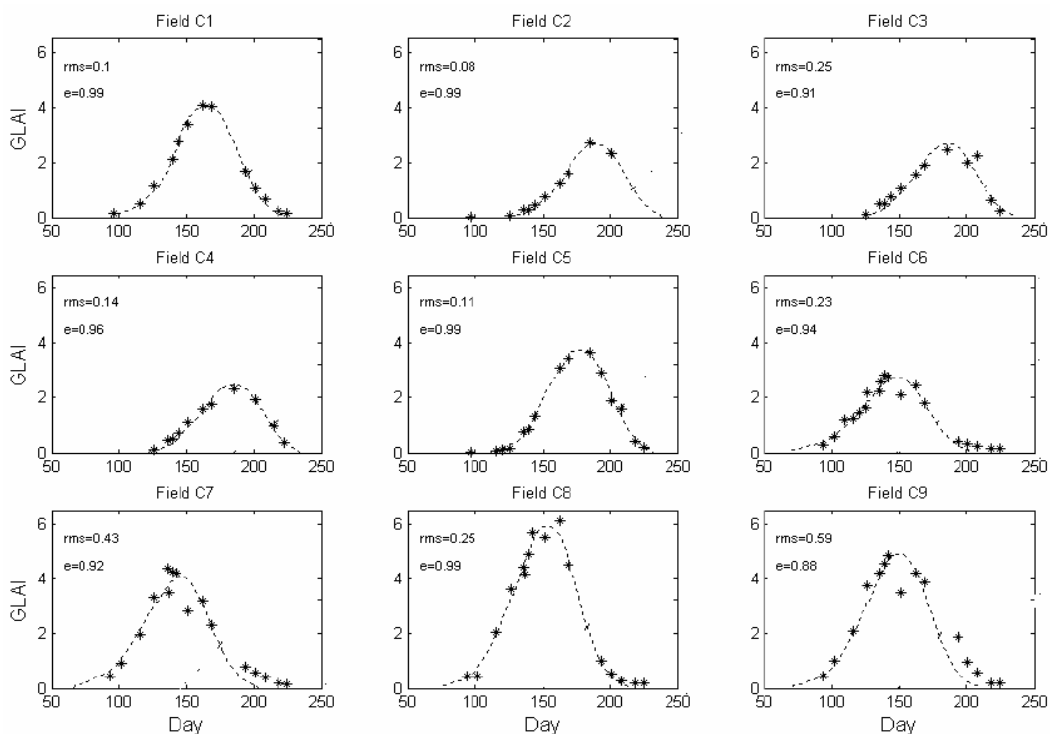


Figure IV.1: Indices foliaires verts observés sur les 9 parcelles de calibration (en étoile), indices foliaires simulés en trait discontinu. Chaque graphe correspond à un ajustement sur une parcelle. Les erreurs (rms) et les efficacités (e) associées sont mentionnées en haut à gauche de chaque graphe. Les jours sont comptés à partir du 15 octobre 2002

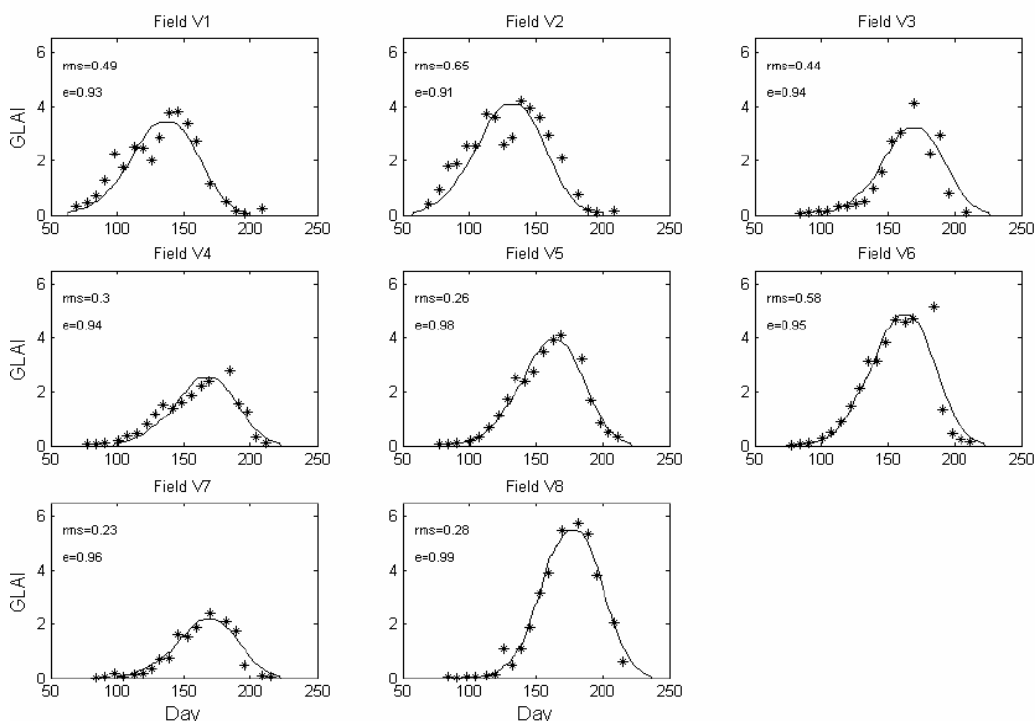


Figure IV.2: Indices foliaires verts observés sur les 8 parcelles de validation (en étoile), indices foliaires simulés en trait continu. Chaque graphe correspond à un ajustement sur une parcelle. Les erreurs (rms) et les efficacités (e) associées sont mentionnées en haut à gauche de chaque graphe. Les jours sont comptés à partir du 15 octobre 2002.

IV-1.2 Module du bilan hydrique sol-végétation atmosphère

Le module de dynamique de la végétation précédemment discuté sert à piloter le module qui décrit les transferts hydriques sol-végétation-atmosphère. La simulation de la dynamique du couvert végétal permet d'évaluer « la demande », i.e. les besoins en eau du système sol- plante en terme d'évapotranspiration, tandis que la résolution du bilan hydrique du sol permet de caractériser « l'offre », et en particulier d'appréhender l'état de stress hydrique des plantes (horizon racinaire). Seuls les transferts verticaux sont appréhendés, au pas de temps journalier.

IV-1.2.1 Description du modèle

L'organigramme du modèle est présenté en Figure IV.3. Le bilan hydrique est calculé, au pas de temps journalier, pendant une période précisée par l'utilisateur. Il s'applique à deux ou trois couches de sol en fonction de la présence ou non de racines, en considérant les réservoirs par ordre de profondeur croissante. Il comporte trois étapes: 1) prise en compte de l'évolution du front racinaire au niveau des contenus en eau et des capacités des réservoirs racinaire et profond; 2) calcul, en « cascade », des écoulements gravitaires associés aux éventuels excédents d'eau de pluie ou d'irrigation ; 3) calculs des flux d'eau diffusifs, ascendants ou descendants, entre les différents horizons du sol.

Le sol est représenté par deux réservoirs horizontaux « infinis » caractérisés par leurs réserves utiles, l'un superficiel, l'autre profond ; ce dernier est lui-même scindé en deux réservoirs pendant la saison de culture, la partie supérieure représentant le réservoir racinaire (Figure IV.4). Seule l'eau contenue dans la couche superficielle est sujette à évaporation, tandis que l'eau peut-être prélevée dans les deux premiers horizons (superficiel et racinaire) pour la transpiration. Le calcul de l'évapotranspiration repose sur la méthode développée par la FAO pour le pilotage des irrigations (Allen et al. 1998, Allen 2000). Les formalismes utilisés pour ces calculs sont détaillés ci-dessous. Sauf mention contraire, les variables sont exprimées en hauteur d'eau (mm). Les entrées et sorties du modèle et ses principaux paramètres sont listés dans le Tableau IV.2.

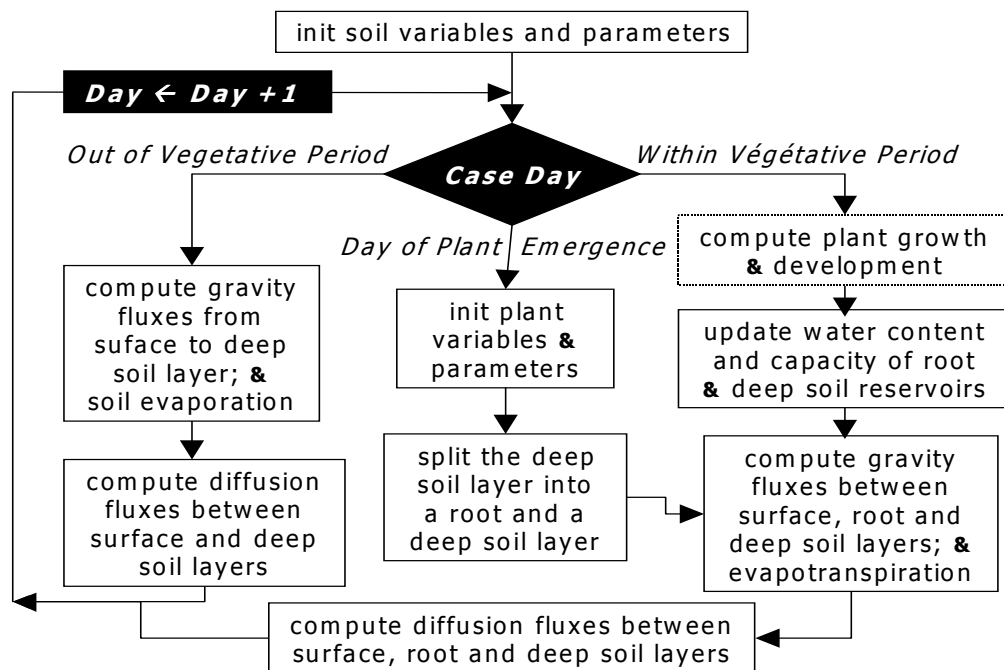


Figure IV.3: Organigramme du module de bilan hydrique (Duchemin et al. 2005).

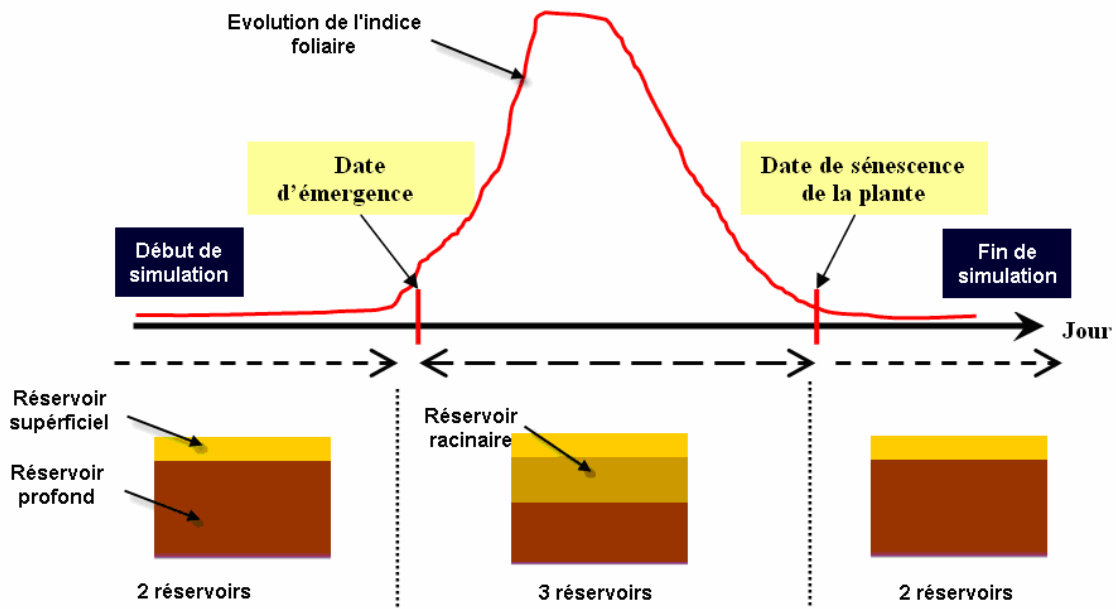


Figure IV.4: Représentation du sol en deux ou trois réservoirs en fonction du cycle de la végétation.

Tableau IV.2: Variables de forçage, paramètres et variables de sortie du modèle de bilan hydrique.

Type	Description	Notation	Unité	Valeur	Source
Variables de forçage					
Végétation	Indice foliaire vert	<i>GLAI</i>	m ² /m ²	-	Module « végétation »
	Indice foliaire total	<i>TLAI</i>	m ² /m ²	-	
	Taux de couverture	<i>COV</i>	%	-	
Climat	Précipitation	<i>P</i>	mm	-	Station météorologique
	Evapotranspiration de référence	<i>ETO</i>	mm	-	
Paramètres					
Irrigation	Seuil de stress hydrique pour le déclenchement l'irrigation	<i>Sirr</i>	-	-	Utilisateur
	Volume d'irrigation	<i>Vi</i>	mm	-	Utilisateur
Simulation	Date de début de simulation	<i>date1</i>	j	-	Utilisateur
	Date de fin de simulation	<i>date2</i>	j	-	Utilisateur
Evapotranspiration	Coefficient de transpiration maximal	<i>Kcb_{max}</i>	-	-	Etalonnage
	Coefficient de réduction de l'évaporation	β	-	-	Etalonnage
	Seuil critique d'humidité	<i>Hcrit</i>	-	-	Etalonnage
Sol	Humidité à la capacité au champ	θ_{fc}	m ³ /m ³	variable	Cartes pédologiques / Hypothèse de simulation
	Humidité au point de flétrissement	θ_{wp}	m ³ /m ³	variable	
	Profondeur maximale du sol	<i>Z3</i>	m	variable	
	Profondeur du réservoir superficiel	<i>Z1</i>	m	0,1	Observation terrain
	Profondeur des racines à l'origine	<i>Z2₀</i>	m	0,2	Observation terrain
	Vitesse de croissance racinaire	<i>Vpr</i>	-	4,10 ⁻⁴	Observation terrain
Transfert diffusifs	Coefficient de diffusivité	<i>Kdif</i>	mm/j	-	Etalonnage
	Exposant de diffusivité	<i>Edif</i>	-	-	Etalonnage
Variables de sortie					
	Irrigation	<i>I</i>	mm		
	Evapotranspiration	<i>ETR</i>	mm		

Le bilan hydrique de l'horizon superficiel est réalisé d'après l'équation (Eq. IV.9). La mise à jour du contenu en eau du premier horizon de sol (*CEI*) fait intervenir les apports (pluie efficace *PE* et irrigation *I*) et les pertes (évaporation *E* et transpiration *T*). La fraction d'eau prélevée dans l'horizon superficiel pour la transpiration (*fts*) est égale au rapport de son contenu en eau sur celui des deux premiers réservoirs (superficiel et racinaire). On suppose ici que la plante prélève préférentiellement l'eau là où elle se trouve. Un terme de drainage profond (*DI*, Eq. IV.11) est calculé si le contenu en eau dépasse la capacité du réservoir (*CPI*). Cette capacité, ou « réserve utile » du réservoir superficiel (Eq. IV.12), détermine la quantité d'eau potentiellement sujette à l'évaporation. Elle est définie par sa profondeur (*Z_I*) et les points d'humidités remarquables (capacité du champ θ_{fc} et point de flétrissement θ_{wp}) selon le formalisme

de la méthode FAO-56 (Allen et al. 1998, Allen 2000). Le calcul de la pluie efficace (PE , Eq. IV.10) est inspiré par Deardorf (1978). C'est une fraction du cumul journalier de pluie (P) fonction de l'indice foliaire total, limitée par la demande évaporative (évapotranspiration de référence $ET0$, cf. II-3.2).

$$CE_1(j) = CE_1(j-1) + PE(j) + I(j) - E(j) - T(j) \times fts \quad (\text{Eq. IV.9})$$

$$PE(j) = P(j) - \max\left[P(j) \times (1 - 0.5^{TLAI(j)}), ET0(j)\right] \quad (\text{Eq. IV.10})$$

$$D_1(j) = \max[CE_1(j) - CP_1, 0] \quad (\text{Eq. IV.11})$$

$$CP_1 = 1000 \times (\theta_{fc} - 0.5 \times \theta_{wp}) \times Z_1 \quad (\text{Eq. IV.12})$$

L'évaporation du sol E (Eq. IV.13) est évaluée pour la surface non couverte par la végétation ($I-COV$) en fonction de la demande climatique $ET0$ et de l'humidité relative du réservoir superficiel (HR_1). Cette dernière est définie comme le rapport entre le contenu et la capacité en eau du réservoir superficiel ($CE_1(j)/CP_1(j)$). L'évaporation est réduite au cours d'un épisode d'assèchement par une fonction en puissance (terme à droite de l'équation (Eq. IV.13) qui approxime le comportement bilinéaire utilisé pour la transpiration (voir l'Eq. IV.18 et la Figure IV.5 qui suivent).

$$E(j) = (1 - COV(j)) \times ET0 \times \left[1 - (1 - HR_1(j))^\beta\right] \quad (\text{Eq. IV.13})$$

Le réservoir racinaire est délimité par une profondeur « effective » des racines, limite quelque peu fictive entre un premier horizon (supérieur) où toute l'eau est possiblement sujette à transpiration, et un deuxième horizon (inférieur) où l'eau n'est aucunement accessible par les racines. La profondeur racinaire évolue au cours de la période végétative (Eq. IV.18) en fonction d'une vitesse de croissance (Vpr) modulée par la température de l'air (T_a) et le stress hydrique (K_s). Le bilan hydrique du réservoir racinaire (Eq. IV.15) fait intervenir l'eau transpirée et le terme de drainage du réservoir superficiel (DI , Eq. IV.11). La transpiration (Eq. IV.16) est le produit de la demande climatique et d'un coefficient cultural Kcb (Eq. IV.17); seule une partie de l'eau

transpirée ($I-fts$) est prélevée dans le réservoir racinaire, le reste étant prélevé dans le réservoir superficiel (Eq. IV.9). La transpiration est réduite en cas de stress hydrique. Cette réduction se traduit par la multiplication par un coefficient de stress hydrique K_s (Eq. IV.18).

$$Z_2(j) = \max(Z_2(j-1) + T_a(j) \times K_s(j) \times V_{pr}, Z_3 - Z_1) \quad (\text{Eq. IV.14})$$

Avec

Z_1 : profondeur du réservoir superficiel du sol en m ;

Z_3 : profondeur maximale du sol en m. ;

V_{pr} : vitesse de croissance des racines ;

T_a : température de l'air ;

K_s : coefficient de stress hydrique.

$$CE_2(j) = CE_2(j-1) + D_1(j) - T(j) \times (1 - fts) \quad (\text{Eq. IV.15})$$

$$T(j) = Kcb(j) \times ET0(j) \times K_s(j) \quad (\text{Eq. IV.16})$$

La détermination du coefficient cultural Kcb (Eq. IV.17) est discutée dans Duchemin et al. 2006. Cette relation a été établie à partir de mesures d'évapotranspiration et d'indice foliaire sur trois parcelles de blé irrigué situées dans le secteur R3. Les mesures de l'évapotranspiration ont été choisies sur des périodes pendant lesquelles la transpiration était maximale (corrélation forte entre évapotranspiration réelle et évapotranspiration de référence) et l'évaporation du sol réduite (absence de précipitations et absence d'irrigation sur, respectivement, une période de quatre et dix jours avant le jour de mesure). Le coefficient de stress hydrique des plantes (K_s , Eq. IV.18) est défini en fonction du maximum des humidités relatives du réservoir superficiel $HR_1(j)$ et racinaire $HR_2(j)$, car la plante peut puiser l'eau dans ces deux réservoirs. La fonction est de type bilinéaire et varie entre zéro (couvert complètement stressé) et 1 (absence de stress) à partir d'une humidité critique (H_{crit} , Eq. V.18 et Figure IV.5).

$$Kcb(j) = Kcb_{\max} \times (1 - e^{-0.84 \times GLAI(j)}) \quad (\text{Eq. IV.17})$$

$$K_s(j) = \begin{cases} 1 & \text{Si } \max[HR_1(j), HR_2(j)] > Hcrit \\ \frac{\max[HR_1(j), HR_2(j)]}{Hcrit} & \text{Sinon} \end{cases} \quad (\text{Eq. IV.18})$$

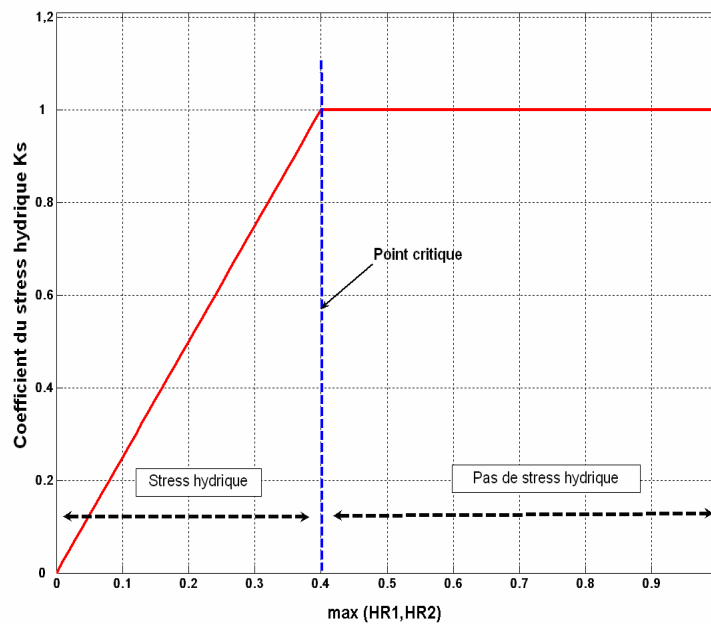


Figure IV.5 Fonction de stress hydrique. HR_1 et HR_2 sont les humidités relatives dans les réservoirs superficiel et racinaire. $Hcrit$ est l'humidité critique en deçà duquel le couvert végétal est stressé.

Comme pour l'horizon superficiel, le contenu en eau du réservoir racinaire est comparé à la capacité de ce même réservoir racinaire (Eq. IV.19) pour calculer l'éventuel excédent D_2 (Eq. IV.20) qui sera drainé vers le réservoir profond.

$$CP_2(j) = 1000 \times (\theta_{fc} - \theta_{wp}) \times Z_2 \quad (\text{Eq. IV.19})$$

$$D_2 = \max(CP_2(j) - CE_2(j), 0) \quad (\text{Eq. IV.20})$$

Enfin, l'évapotranspiration « réelle » est déterminée par la somme de l'évaporation E et la transpiration T .

$$ETR = E + T \quad (\text{Eq. IV.21})$$

Le réservoir profond fait office de réservoir de stockage. Il est connecté au réservoir superficiel ou racinaire selon la présence ou non d'un couvert végétal (Eq. IV.22). L'eau excédentaire D_3 (Eq. IV.24), calculée en comparant le contenu en eau CE_3 (Eq. IV.22) et la capacité CP_3 (Eq. IV.23) du réservoir profond, est, le cas échéant, définitivement perdue pour le système étudié.

$$\begin{aligned} CE_3(j) &= CE_3(j-1) + D_1(j) \\ CE_3(j) &= CE_3(j-1) + D_2(j) \end{aligned} \quad \left| \quad (\text{Eq. IV.22}) \right.$$

$$CP_3 = 1000 \times (\theta_{fc} - \theta_{wp}) \times (Z_3 - Z_2) \quad (\text{Eq. IV.23})$$

$$D_3(j) = \max[CE_3(j) - CP_3(j), 0] \quad (\text{Eq. IV.24})$$

En complément de l'écoulement « gravitaire » de l'eau excédentaire où les termes de drainage (D_x) sont appliqués instantanément, les contenus en eau sont mis à jour par application d'une loi de transfert par diffusivité adaptée de Devonec and Barros 2002. Cette loi calcule les flux hydriques diffusifs Φ_{xy} entre deux réservoirs X et Y en fonction de leur gradient d'humidité volumique relatif $(W_x - W_y)/W_{cc}$ (Eq. IV.25 à Eq. IV.27). Elle est définie par un coefficient et un « exposant » de diffusivité ($Kdif$ et $Edif$ dans les équations Eq. IV.25 à IV.27). Son application permet notamment la restitution en fin de saison culturale du stock d'eau éventuellement constitué au cours de celle-ci dans le réservoir profond (Benhadj 2004). Elle est appliquée entre les réservoirs superficiel et profond en l'absence de végétation (Eq. IV.25), et entre les réservoirs superficiel et racinaire (Eq. IV.26) puis racinaire et profond (Eq. IV.27) si le couvert végétal est présent.

$$\Phi_{13} = K_{dif} \times \left[\frac{W_1 - W_3}{W_{CC}} \right]^{Edif} \quad \text{(Eq. IV.25)}$$

$$\Phi_{12} = K_{dif} \times \left[\frac{W_1 - W_2}{W_{CC}} \right]^{Edif} \quad \text{(Eq. IV.26)}$$

$$\Phi_{23} = K_{dif} \times \left[\frac{W_2 - W_3}{W_{CC}} \right]^{Edif} \quad \text{(Eq. IV.27)}$$

IV-1.2.2 Application et évaluation pour des cultures de blé

Le modèle est évalué à partir de données acquises sur quatre parcelles de blé dur irrigué pendant deux saisons agricoles (trois parcelles en 2002-2003 et une en 2003-2004). Les campagnes expérimentales, détaillées dans (Duchemin et al. 2006; Duchemin et al. 2008; Hadria 2006), ont permis de mesurer l'indice foliaire et les humidités du sol, ainsi que les flux radiatifs et hydrique à l'interface « sol-plante-atmosphère » (cf. II-3.5). Les paramètres du modèle ont été soit fixés *a priori*, soit déterminés par étalonnage.

Le sol a une profondeur totale maximale de 1 m; l'épaisseur du réservoir superficiel et la profondeur du front racinaire à la levée des plantules ont été respectivement fixées à 10 et 20 cm. La vitesse de croissance des racines (V_{pr} , Eq. IV.14) a été ajustée de telle sorte que la profondeur des racines atteigne la valeur de 50 cm observée au champ en fin de saison culturale.

Les points d'humidités remarquables des sols ont été, dans un premier temps, calculés d'après leur texture (argilo-limoneuse), en utilisant les fonctions de pédo-transfert proposées par Wosten (1997). Les humidités sont bornées par les valeurs à la capacité au champ et au point de flétrissement, respectivement évaluées à 0.34 et 0.21 m³/m³.

L'humidité minimale du réservoir superficiel est prise égale à la moitié du point de flétrissement (Allen et al. 1998). Ces humidités ont ensuite été recalées à partir des mesures de terrain réalisées par gravimétrie pour éviter la présence de biais systématique entre valeurs simulées et observées. Ceci n'a que très peu d'influence sur la simulation de l'évapotranspiration qui est avant tout contrôlée par la différence entre humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement définissant la réserve utile. Or, d'après les mesures gravimétriques, cette différence ne varie généralement que peu. Pour les quatre parcelles d'étude et après recalage, elle est restée identique à celle correspondant aux valeurs initiales ($0.34-0.21 = 0.13 \text{ m}^3/\text{m}^3$), alors que les humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement variaient sensiblement. Les simulations débutent en fin de saison sèche, au 15 octobre 2002. Les sols sont alors supposés totalement secs et leurs humidités initiales sont fixées aux limites inférieures discutées ci-dessus.

A l'issue de cette première analyse, cinq paramètres restent inconnus (Tableau IV.3). Deux jeux de paramètres ont été testés (Tableau IV.3): le premier est tiré de la littérature, le deuxième est obtenu par étalonnage du modèle. Dans le deuxième cas, le modèle est étalonné en utilisant l'évapotranspiration comme variable cible et la procédure d'optimisation *SCEM* (*Schuffled Complex Evolution Metropolis*, Vrugt et al. 2002). L'étalonnage repose sur les données acquises sur une parcelle, dénommée « F » dans Duchemin et al. (2006). Il s'agit d'une minimisation de l'écart entre évapotranspiration simulée et observée en considérant toutes les données acquises durant une saison de culture.

Tableau IV.3: Paramètres du module hydrique sujets à étalonnage.

Description	Symbole	Valeurs Bibliographiques (références)	Valeurs Étalonnées
Coefficient de réduction de l'évaporation	β	1.9 (Allen et al. 1998)	0.98
Coefficient cultural maximal associé à la transpiration du couvert	Kcb_{max}	1.07 (Duchemin et al. 2006)	0.92
Point d'humidité critique associé au début du stress de la plante	H_{crit}	0.5 (Allen et al. 1998)	0.4
Coefficient de diffusivité	$Kdif$	0.27 (Devonec and Barros 2002)	175.15
Exposant de diffusivité	$Edif$	1 (Devonec and Barros 2002)	3.18

Afin d'évaluer les performances, nous avons comparé les simulations réalisées à partir du jeu de paramètres bibliographique (Figure IV.6-1) et étalonné (Figure IV.6-2). Les évolutions temporelles de l'évapotranspiration et des humidités du sol simulées et observées sur la parcelle d'étalonnage sont données (Figure IV.6). Dans les deux cas, les simulations sont dans la gamme de variation des observations, mais l'amélioration consécutive à l'étalonnage du modèle est nette. L'utilisation de la valeur bibliographique de Kcb_{max} entraîne une surestimation de l'évapotranspiration en milieu de saison (comparer les Figure IV.6-1a et Figure IV.6-2a, jours 160 et 190). La relation linéaire établie par Duchemin et al. (2006) surestime probablement la valeur de ce coefficient lorsque le couvert végétal est bien établi. Cette constatation a été étayée par Er-Raki et al. 2007. D'autre part, l'ajustement des paramètres associés aux transferts diffusifs dans le sol permet de mieux restituer la diminution de l'évapotranspiration en fin de saison (Figure IV.6-1a et Figure IV.6-2a) ainsi que la dynamique des humidités des réservoirs superficiel (Figure IV.6-1b et Figure IV.6-2b) et profond (Figure IV.6-1d et Figure IV.6-2d). L'hypothèse de Devonec and Barros 2002, qui considère un flux diffusif proportionnel au gradient d'humidité ($Edif = 1$), semble ne pas être adaptée à notre cas d'étude.

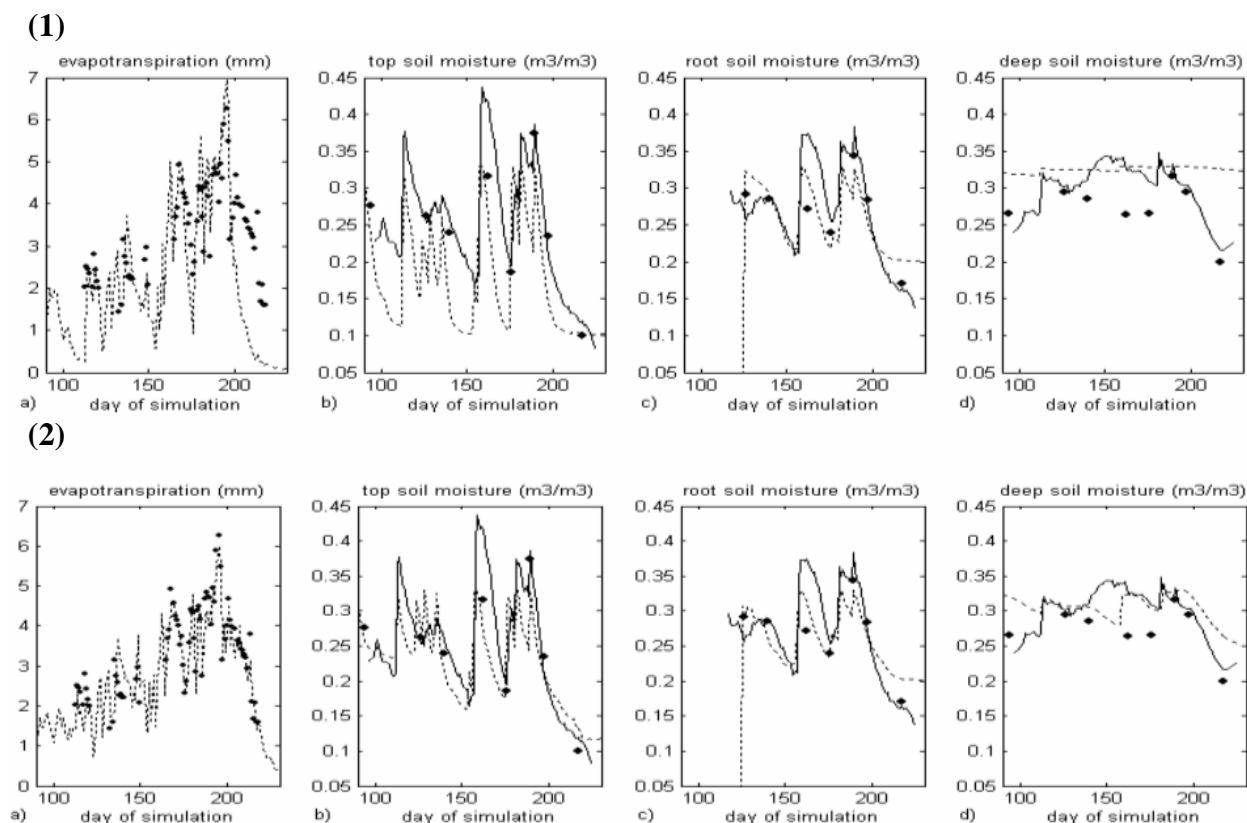


Figure IV.6: Evapotranspiration (a) et humidités superficielle (b), racinaire (c) et profonde (d) simulées (traits pointillés) et mesurées (points = mesures gravimétriques, traits pleins = mesures par sondes TDR). Les simulations sont réalisées sur la parcelle d'étalonnage avec le jeu de paramètres issue de la littérature (1, en haut), ou étalonné (2, en bas).

Les tendances observées pour la parcelle d'étalonnage sont confirmées sur les parcelles de validation (Figure IV.7 et Tableau IV.4). La précision des simulations de l'évapotranspiration, quantifiée par le calcul de l'erreur RMSE, varie respectivement de 0.88 à 1.72 mm/j et de 0.36 à 1.06 mm/j pour les jeux de paramètres bibliographiques et étalonnés. L'amélioration associée à l'étalonnage est également visible sur tous les autres critères statistiques permettant la comparaison des évapotranspirations simulées et observées: diminution des biais, augmentation des efficacités de prévision et des coefficients de corrélation (Tableau IV.4). Le gain sur l'évaluation saisonnière de l'évapotranspiration, en cumul sur la période de mesure, est significatif, en particulier pour les parcelles de validation 1 et 2 (Tableau IV.5).

Les performances du modèle diffèrent fortement d'une parcelle à l'autre avec une erreur variant d'un facteur trois entre la meilleure et la moins bonne simulation (Tableau IV.4). La meilleure performance est obtenue sur V3, parcelle étudiée sur une période courte, avec un couvert végétal bien développé et sans stress hydrique (parcelle « I » dans Duchemin et al. 2006). La performance médiocre du modèle sur V2 s'explique par le fait que cette parcelle, nommée « L » dans Duchemin et al. 2006, a été affectée par un stress hydrique en milieu de saison. Le modèle n'a pas pu reproduire correctement ce stress, probablement du fait de l'incertitude sur les quantités d'eau d'irrigation fournies en entrée. On remarquera cependant que les conséquences de cette mauvaise performance sont largement atténuées à l'échelle saisonnière (Tableau IV.5).

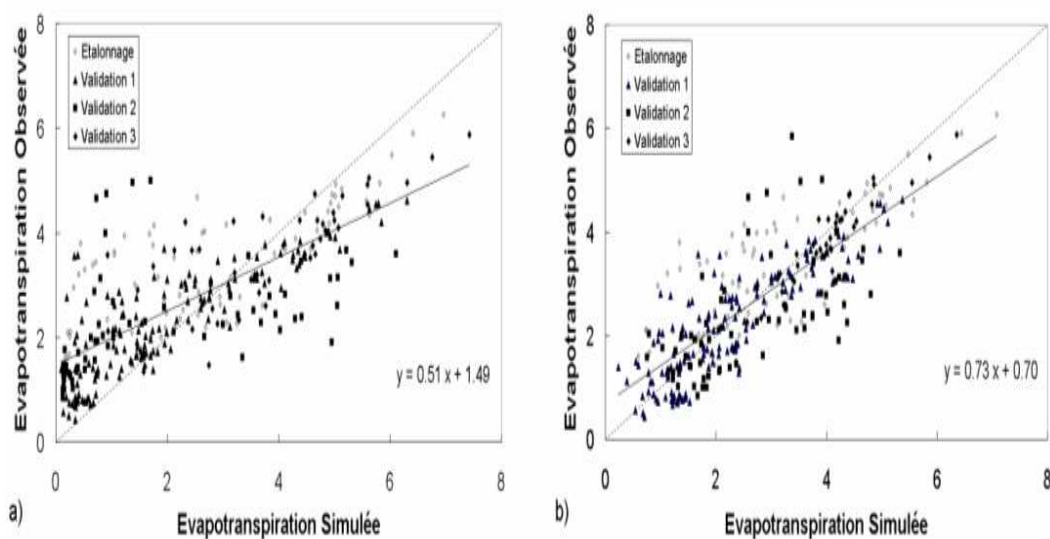


Figure IV.7: Evapotranspirations simulées et observées sur les quatre parcelles d'étude (en mm/j), pour les jeux de paramètres bibliographique (a) et étalonné (b). 1^{ère} bissectrices et droites de régression dérivées des nuages de points apparaissent respectivement en traits pointillés et pleins. Les équations des droites de régression apparaissent en bas à droite de chaque graphe.

Tableau IV.4: Statistiques entre évapotranspirations journalières observées et simulées. Les valeurs en italique et en gras correspondent respectivement aux jeux de paramètres bibliographique et étalonné.

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

Tableau IV.5: Evapotranspirations saisonnières observées et simulées sur les parcelles d'étalonnage (E) et de validation (V1 à V3). Les valeurs sont cumulées sur la période de mesure et exprimées en mm.

	jeu de paramètres bibliographiques				jeu de paramètres étalonnés			
	E	V1	V2	V3	E	V1	V2	V3
Simulation	202.7	284.2	127.8	169.1	223.9	335.1	180.7	168.8
Observation	245.5	329.8	159.3	160.8	245.5	329.8	159.3	160.8
Différence (%)	19.10	14.84	21.95	-5.02	9.22	-1.60	-12.58	-4.87

La Figure IV.8 permet de juger la performance du modèle pour restituer l'évolution temporelle de l'humidité des trois réservoirs du sol (superficiel, racinaire et profond). Les valeurs simulées et observées sont toujours, quoique modérément, corrélées (R^2 variant entre 0.38 à 0.57). L'effet de l'étalonnage est en première analyse moins visible que pour les évapotranspirations: on constate une légère amélioration de la corrélation pour les réservoirs superficiel (Figure IV.8a-b) et racinaire (Figure IV.8c-d), alors qu'apparaît une dégradation pour le réservoir profond (Figure IV.8e-f). Cependant, les dynamiques semblent mieux ajustées lorsque le jeu de paramètres étalonnés est utilisé. Ceci est particulièrement net sur les humidités du réservoir profond (Figure IV.8e-f) lorsque l'on procède à l'examen du nuage de points en considérant chacune des parcelles séparément. De fait, les droites de régression se rapprochent des premières bissectrices lorsque le jeu de paramètres étalonnés est utilisé.

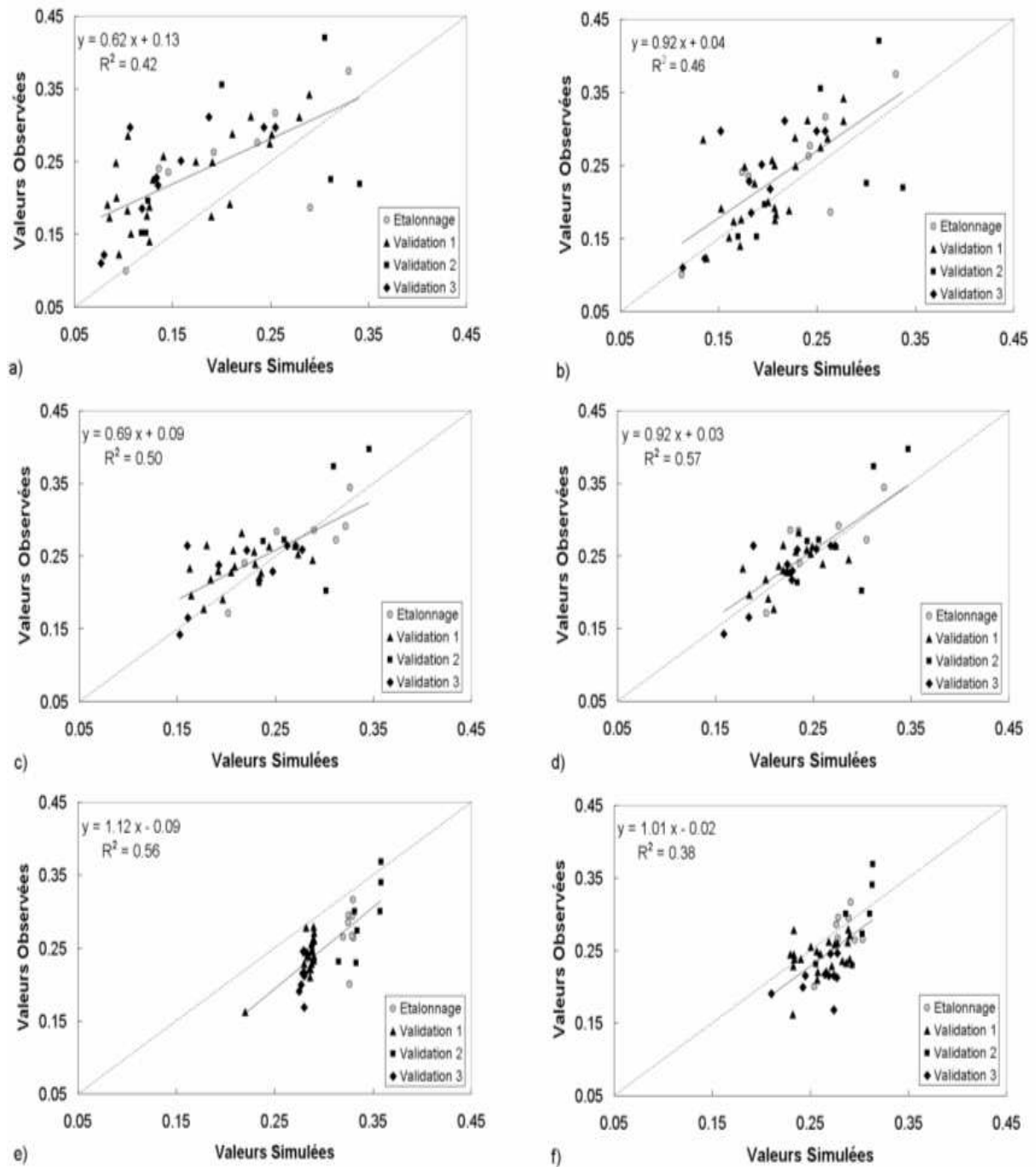


Figure IV.8: Humidités volumiques simulées et observées sur les quatre parcelles d'étude (en m^3/m^3). La comparaison porte sur les réservoirs superficiel (en haut), racinaire (au milieu) et profond (en bas). Les graphes de gauche et de droite correspondent respectivement aux simulations effectuées avec les jeux de paramètres bibliographique et étalonné. 1ère bissectrice et droites de régression dérivées des nuages de points apparaissent respectivement en traits pointillés et pleins. Les équations et coefficients de détermination associés aux droites de régression sont mentionnés en haut à gauche de chaque graphe.

IV-2 SPATIALISATION A PARTIR DE DONNEES A HAUTE RESOLUTION SPATIALE (FORMOSAT-2 SAISON AGRICOLE 2005-2006)

La spatialisation du modèle de bilan hydrique est réalisée pour la saison agricole 2005-2006. Les données FORMOSAT-2 nous permettent d’appréhender l’occupation du sol (cf. III-1) et la dynamique de la végétation. La spatialisation relève de trois procédés (Figure IV.9): inversion, ajustement/étalonnage et forçage. L’indice foliaire vert (*GLAI*) est tout d’abord déduit des observations satellites par inversion d’une relation semi-empirique entre le *NDVI* et le *GLAI* établie pour les cultures de blé. Ces observations sont utilisées pour ajuster les simulations de la dynamique de la végétation. Le modèle de transfert hydrique est ensuite forcé par les variables descriptives du couvert végétal.

La principale difficulté de l’exercice est relative à la connaissance de l’irrigation. Lorsque nous avons évalué le modèle du bilan hydrique à l’échelle parcellaire (cf. IV-1.2.2), les irrigations (dates et volumes) étaient relativement bien connues. Ceci n’est évidemment pas le cas pour l’ensemble de la scène FORMOSAT-2, et nous avons décidé de simuler les irrigations sur la base d’hypothèses sur la conduite des cultures.

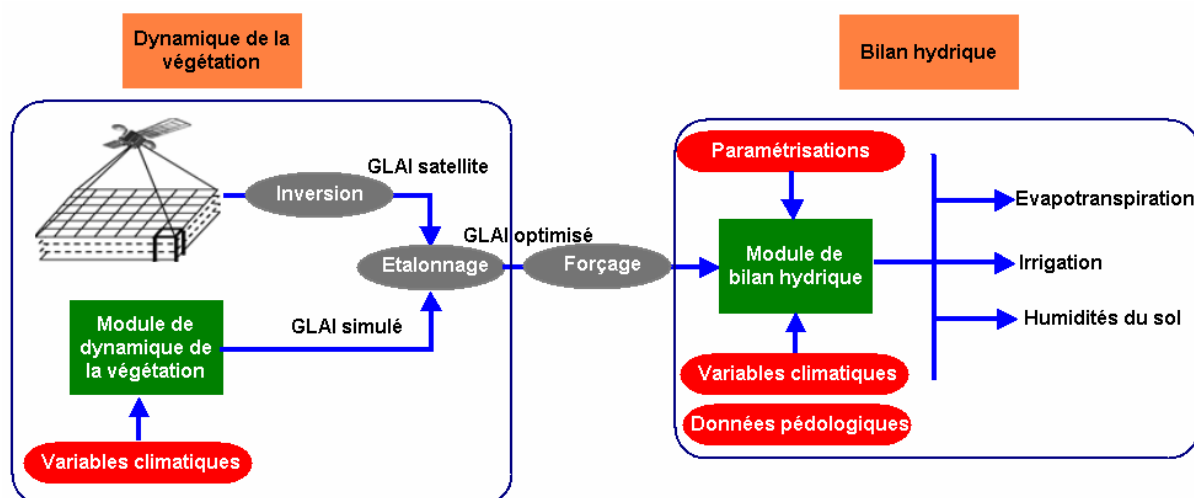


Figure IV.9: Schéma de couplage du module de dynamique de végétation et du module de bilan hydrique.

IV-2.1 Ajustement spatialisé du modèle de végétation pour les cultures annuelles

Pour les cultures annuelles, le modèle de dynamique de la végétation a été spatialisé à l'aide de la série des dix sept images FORMOSAT-2 acquises sur la période du 04/12/2005-11/06/2006. Le forçage climatique (température et rayonnement) est procuré par la station météorologique installée au centre de la scène sur le secteur irrigué test R3. Le *NDVI* moyen est extrait sur chaque unité (segment) de la scène FORMOSAT-2. Pour toutes les classes d'occupation du sol autres que les plantations arborées et la luzerne (cf. III-1), l'indice foliaire vert est estimé à partir du *NDVI* au moyen d'une relation empirique adaptée de Duchemin et al. 2006. Cette relation (Eq. IV.28) avait été établie à partir de mesures effectuées à l'aide d'un radiomètre portable de terrain simulant les mesures Landsat. Elle a été adaptée à FORMOSAT-2 à partir des mesures d'indices foliaires effectuées sur des cultures de blé entre le 20 et le 24 mars 2006 (cf. II-3.5). Ce sont les valeurs extrêmes de *NDVI* ($NDVI_{sol}=0.2$ pour le sol et $NDVI_{INF}=0.9$ pour les couverts infiniment denses) qui ont été ajustées, à partir des valeurs minimales et maximales observées sur la série d'images FORMOSAT-2.

$$GLAI = - \frac{\log\left(\frac{NDVI_{INF} - NDVI}{NDVI_{INF} - NDVI_{sol}}\right)}{0.54} \quad (\text{Eq. IV.28})$$

La relation entre le *NDVI* et le *GLAI* est de type logarithmique (Figure IV.10a), en accord avec les résultats obtenus dans de précédentes études (Asrar et al. 1984; Baret et al. 1989; Richardson 1992). On constate une saturation du *NDVI* pour les fortes valeurs de l'indice foliaire. L'indice foliaire estimé par la relation (Eq. IV.28) est bien corrélé aux observations ($R^2=0.8$). L'erreur RMSE (0.67) est du même ordre de grandeur que celle commise sur la mesure de l'indice foliaire vert à partir de mesures indirectes (voir la revue de Weiss et al. 2004). Cette relation a été utilisée pour produire dix sept cartes

d'indice foliaire vert à la résolution des segments. On donne trois exemples en début, milieu et fin mai de saison agricole 2005-2006 (Figure IV.11). La région est en majorité cultivée en blé. En début de saison, les valeurs de l'indice foliaire sont faibles car les cultures ne sont pas encore installées. Le pic est atteint fin mars, avec un maximum de *GLAI* atteint d'environ cinq et plus de 65 % des segments qui affichent une valeur supérieure à 1 (Figure IV.12). Les valeurs de l'indice foliaire décroissent en fin de saison avec la sénescence des couverts végétaux.

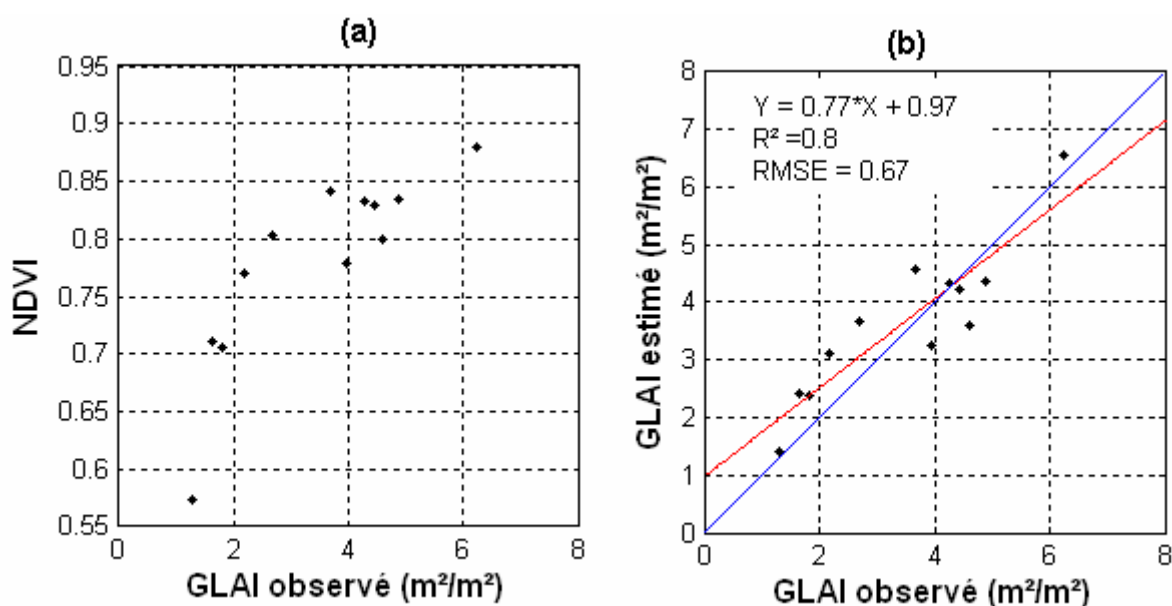


Figure IV.10: Relation entre le *NDVI* issu des images FORMOSAT-2 et le *GLAI* observé (a); *GLAI* estimé en fonction du *GLAI* observé (b).

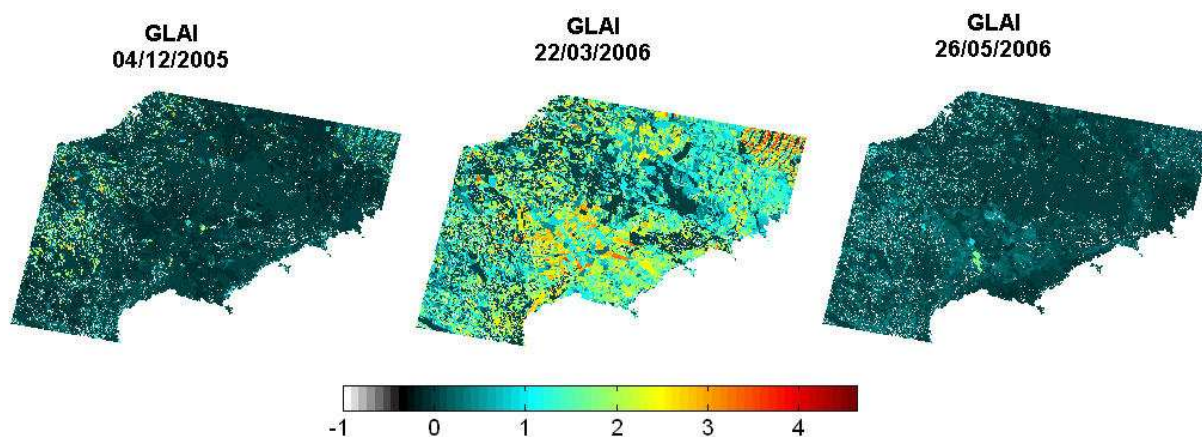


Figure IV.11: Exemples de cartes d'indice foliaire dérivées de FORMOSAT-2 en début (à gauche) en milieu (au centre) et en fin (à droite) de la saison agricole 2005-2006.

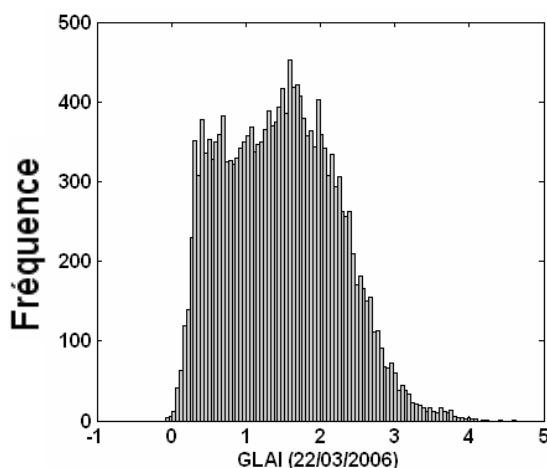


Figure IV.12: Histogramme des valeurs de l'indice foliaire *GLAI* à la date du 22/03/2006.

Finalement, les cartes d'indices foliaires sont utilisées pour ajuster les simulations réalisées par le modèle de dynamique de la végétation. La procédure d'optimisation fait appel à l'algorithme *SCEM* (Vrugt et al. 2002). Elle est appliquée segment par segment pour minimiser l'écart entre les dix sept observations (indice foliaire dérivé de FORMOSAT-2) et les valeurs simulées aux dates d'observations. Les paramètres du modèle sont tous fixés aux valeurs que nous avons déterminées pour les parcelles de blé (cf. IV-1.1.1), à l'exception de quatre paramètres : (1) la date d'émergence (D_0); (2) l'efficacité de conversion du rayonnement photosynthétiquement actif en biomasse ($ELUE$); (3) les deux paramètres régulant la sénescence (seuil de temps thermique pour le déclenchement de la sénescence S_{TT} et vitesse de sénescence R_s). Ces deux derniers paramètres ont été ajustés localement pour simuler des cultures dont le cycle est plus court ou plus long que le blé.

L'analyse des résultats (Figure IV.13 et Figure IV.14) montre que la majorité des ajustements sont de très bonne qualité. L'évolution de l'indice foliaire vert est généralement convenablement restituée (Figure IV.13). L'analyse statistique des erreurs sur l'ensemble des segments (Figure IV.14) montre que l'erreur relative (RRMSE2 cf. annexe 3) entre simulations et observations est généralement faible, avec un maximum de 50 %. Les histogrammes d'erreurs (Figure IV.14) indiquent que l'erreur est

inférieure à 10 % pour 60 % des segments. On note toutefois l'existence de segments où l'erreur est forte, notamment au nord-ouest de la région d'étude.

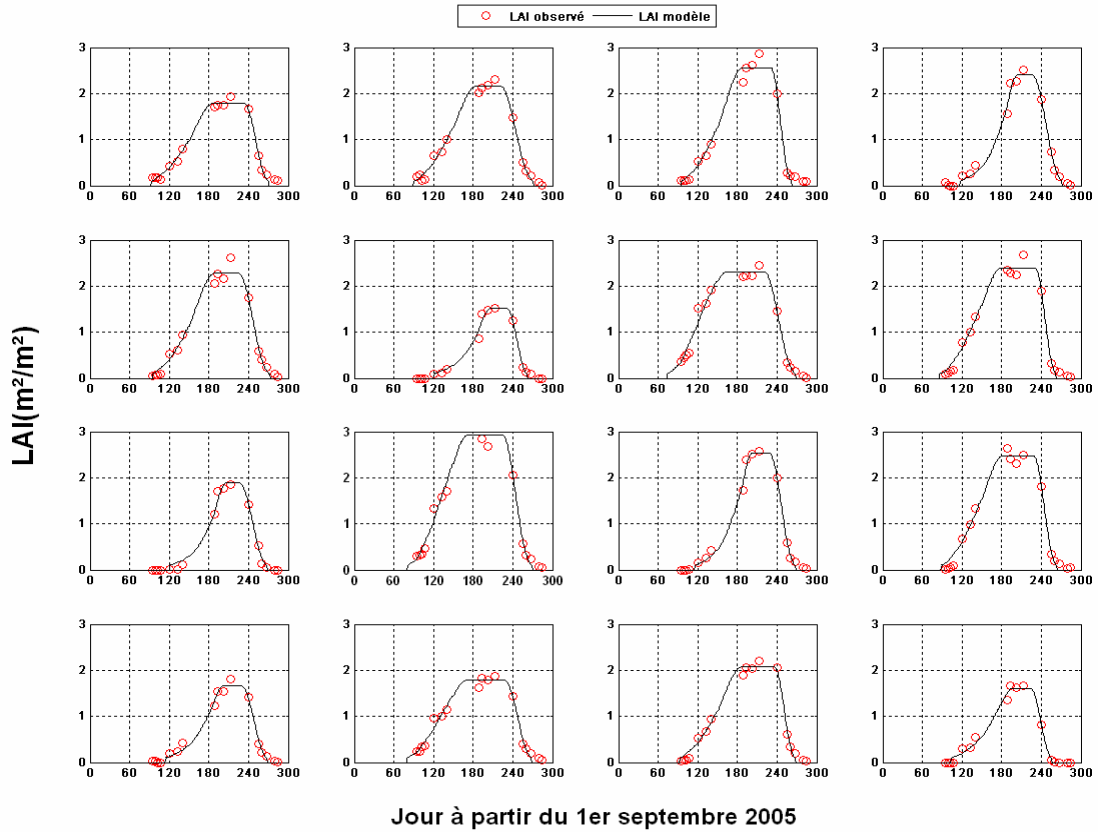


Figure IV.13: Exemples d'indices foliaires verts estimés avec FORMOSAT-2 (cercles rouge) et simulés (trait). Les erreurs (RRMSE2) associées à ces exemples sont inférieures à 10%.

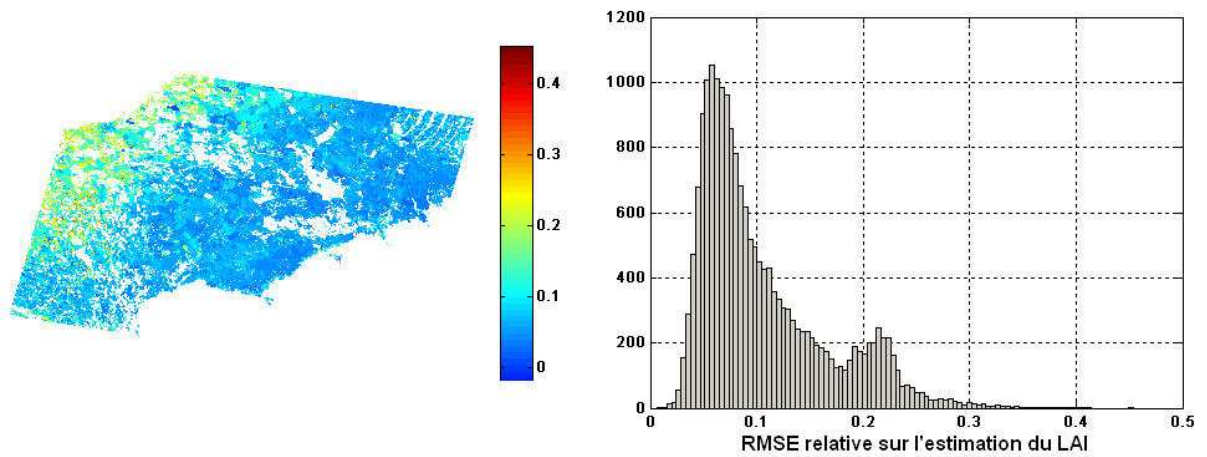


Figure IV.14: Carte et histogramme de l'erreur relative (RRMSE2) associées aux simulations de l'indice foliaire vert.

Pour expliquer les cas présentant de fortes erreurs, nous avons ciblé les segments ayant des erreurs relatives (RRMSE2) supérieures à 30 %. Ces segments ne représentent que 0.5 % de la zone d'étude. La Figure IV.15 montre que les profils d'indice foliaire de ces segments présentent deux pics, autour des jours 90 (début novembre) et en fin de saison (mai-juin). Nous sommes dans le cas de rotations de cultures maraîchères à cycle court. Dans ces conditions, le modèle de végétation essaie de reproduire le cycle de l'une des deux cultures, soit le premier (exemples des cas 1 et 12) ou le second (exemple des cas 6 et 10), ou simule un cycle long qui englobe les deux cycles (exemple des cas 11 et 14).

Afin de remédier à ce problème, nous avons appliqué une méthode d'analyse du signal qui délimite les deux cycles puis procède à l'ajustement des quatre paramètres sur chacune des deux périodes. Pour détecter cette date, nous avons fait appel à la méthode de la somme cumulée (en anglais « cumulative sum », Kucera et al. 2007; Taylor 2000). Cette méthode calcule pour chaque date t une somme cumulée de la différence entre les valeurs de $GLAI$ à cette date et la moyenne:

$$\begin{aligned}
 S_0 &= 0 \\
 S_1 &= S_0 + [GLAI(t_1) - \overline{GLAI}] \\
 S_2 &= S_1 + [GLAI(t_2) - \overline{GLAI}] \\
 &\dots \\
 S_n &= S_{n-1} + [GLAI(t_{n-1}) - \overline{GLAI}]
 \end{aligned}$$

Avec $GLAI(t_i)$: indice foliaire à la date i ;

\overline{GLAI} : indice foliaire moyen dans le temps;

n : nombre de dates.

Nous avons observé que la date (t_i) du changement du cycle correspond à la date où la somme cumulée (S_i) est maximale. Pour les cas étudiés, la date détectée par la méthode de la somme cumulée apparaît correcte (Figure IV.16). Pour l'ensemble de ces segments, nous avons donc repéré la limite entre les deux cycles de cultures en identifiant la date pour laquelle la somme cumulée est maximale, et nous avons procédé à deux ajustements du modèle de végétation. Le premier ajustement a été effectué sur

les observations comprises entre le début de la saison agricole et la fin du premier cycle de culture, et le deuxième sur les observations comprises entre le début du deuxième cycle de culture et la fin de la saison agricole. Les nouvelles simulations décrivent bien chacun des deux cycles de cultures (Figure IV.16). Le gain constaté sur les erreurs associées à l'estimation du *LAI*, pour les segments qui affichaient une erreur initiale supérieure à 30 %, est d'environ 60 % (comparer la Figure IV.15 et la Figure IV.16).

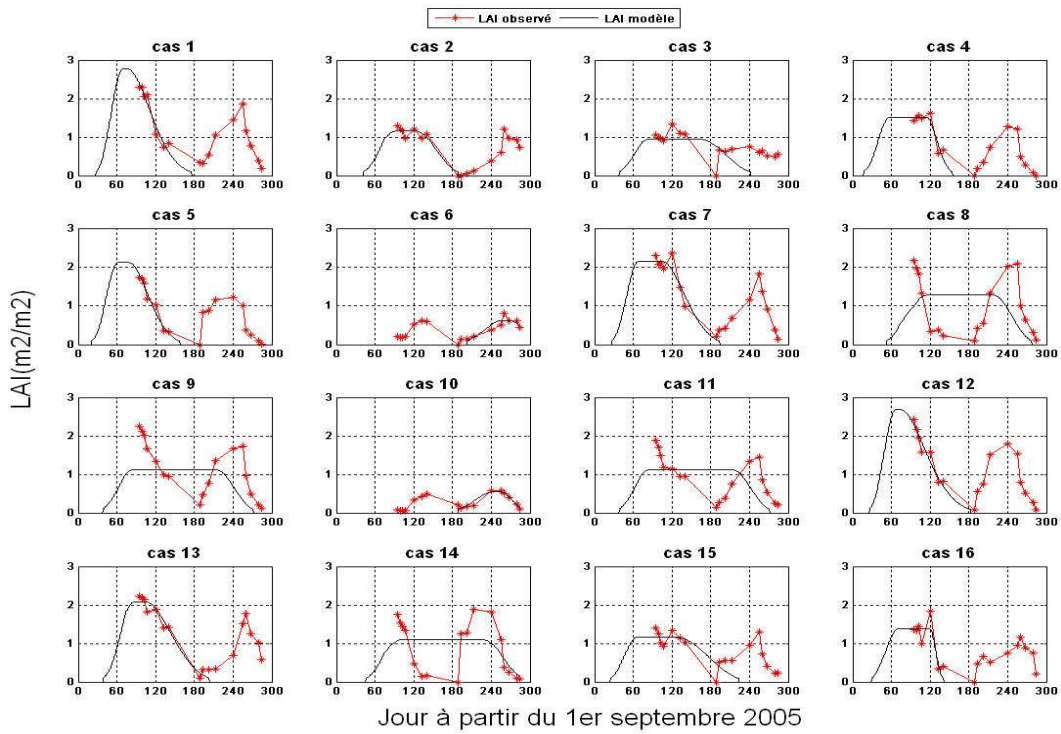


Figure IV.15 : Exemples d'indices foliaires verts estimés avec FORMOSAT-2 (cercles rouge) et simulés (trait). Les erreurs (RRMSE2) associées à ces exemples sont supérieures à 30 %.

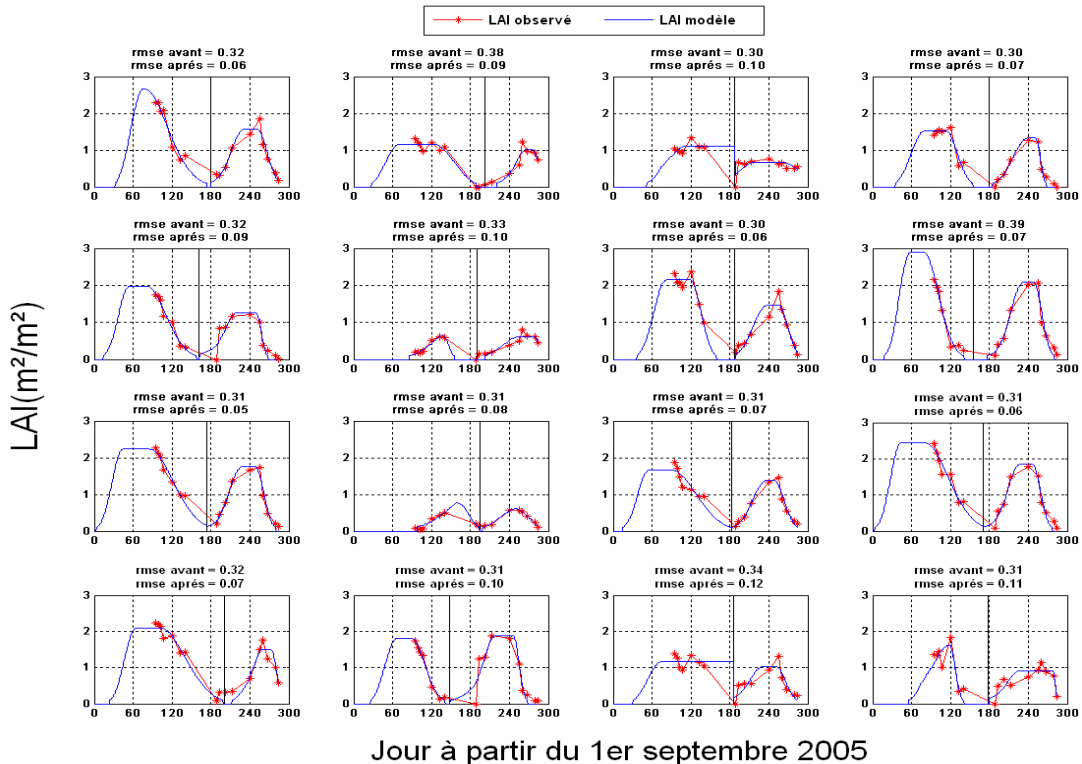


Figure IV.16: Exemples d'indices foliaires verts estimés avec FORMOSAT-2 (cercles rouge) et simulés (trait) en procédant à l'ajustement du modèle séparément sur les deux cycles de cultures. Les erreurs relatives (RRMSE2) associées aux simulations de la figure IV.15 (rmse avant) et de cette figure (rmse après) sont données dans le titre de chaque graphique.

IV-2.2 Application régionale du modèle du bilan hydrique

Le modèle de bilan hydrique est mis en œuvre sur chaque segment des images FORMOSAT-2. Les données d'évapotranspiration de référence proviennent de la station météorologique SudMed installée au centre de la scène sur le secteur irrigué test R3. Les pluies journalières sont calculées par interpolation (méthode *Inverse Distance Weighted*, cf. II-3.1.2). Le sol est décrit par les cartes de profondeur et d'humidités remarquables (point de flétrissement et capacité au champ) (cf. II-3.3). La carte d'occupation du sol établie sur la saison 2005-2006 (cf. III-1) nous a permis de distinguer quatre cas de figures :

1) les cultures annuelles irriguées

Le module du bilan hydrique est forcé par les séries temporelles de l'indice foliaire vert obtenues par l'ajustement spatialisé du modèle de dynamique de la végétation. Ce forçage intervient directement dans le calcul de l'interception des pluies (Eq. IV.10) faisant intervenir l'indice foliaire total *TLAI*) et indirectement dans le calcul de la transpiration (détermination du coefficient de culture *K_{cb}*, Eq. IV.17) et de l'évaporation (détermination du taux de couverture du sol par la végétation *COV*, Eq. IV.8).

2) la luzerne

On considère que le couvert est permanent, avec un taux de couverture de 0.9. Le module de dynamique de végétation est désactivé. Le module du bilan hydrique fonctionne toujours avec trois réservoirs de taille fixe: superficiel (0.1 m), racinaire (1 m) et profond. La valeur du coefficient de transpiration est fixée à 1.1 d'après les tableaux du document FAO-56.

3) *les vergers*

Pour les plantations arborées, le module de dynamique de la végétation est désactivé. Nous avons appliqué uniquement le module du bilan hydrique avec trois réservoirs permanents, superficiel (0.1 m), racinaire (1.2 m) et profond (au moins 1.2 m, en fonction de la carte pédologique, cf. Figure II.29). Le taux de couverture du sol par la végétation et le coefficient cultural de transpiration sont déduits du *NDVI* moyen sur chaque segment (après interpolation linéaire de celui-ci au pas de temps journalier). Les relations entre ces deux termes et le *NDVI* (en annexe 4) ont été établies à partir des mesures réalisées sur des oliviers et des orangers dans la plaine du Tensift, des valeurs répertoriées dans le document de la FAO pour les oliviers et les agrumes, et de celles déterminées par Testi et al. 2004 pour des oliviers au sud de l'Espagne.

4) *les zones non irriguées*

Dans les zones non irriguées, le modèle est appliqué de deux manières différentes. Si le segment est peu végétalisé (le *NDVI* présentant un maximum inférieur à 0.3), seul le module de bilan hydrique est activé, avec deux réservoirs (superficiel et profond). Dans le cas contraire, on traite le segment comme une parcelle de cultures annuelles. Dans les deux cas, il n'y a pas d'irrigation.

Dans les trois premiers cas, nous avons simulé l'irrigation en faisant une hypothèse sur la conduite des cultures. Plusieurs scénarii de conduite ont été générés en faisant varier les valeurs d'un seuil de stress hydrique «toléré» (S_{IRR}). Les irrigations sont déclenchées lorsque le stress hydrique, calculé à partir des humidités du sol superficiel et racinaire (Eq. IV.20), atteint cette valeur critique S_{IRR} . Ces déclenchements sont associés à des volumes d'irrigation qui ont été fixés pour deux grandes classes de cultures (50 mm pour les cultures annuelles et la luzerne, 80 mm pour les arbres) sur la base des acquis du projet SudMed. Ces volumes d'eau sont constants d'une irrigation à l'autre. Nous avons testé différentes valeurs « seuil » de stress hydrique, spatialement statique ou dynamique. Dans le premier cas, la valeur S_{IRR} est censée reproduire une décision

moyenne des exploitants, en considérant les deux grandes classes de cultures (arbres et cultures annuelles/luzerne). Une variation spatiale de S_{IRR} a également été reproduite dans le cas des cultures annuelles, en analysant la dynamique du couvert végétal, selon le principe illustré en Figure IV.17. On fait alors l'hypothèse que les profils de $NDVI$ témoignent du niveau moyen de stress hydrique de la culture. Les intégrales de chaque profil de $NDVI$ sont calculées (A, Eq. IV.29) et le profil à plus forte « aire » (A_{max} , correspond au « profil optimal », en rouge sur la Figure IV.17) fournit la référence d'une culture non stressée, par rapport à laquelle le niveau de stress des autres cultures (exemple en bleu sur la Figure IV.17) est évalué. Le seuil S_{IRR} est pris égal au rapport de l'aire du profil analysé sur l'aire du profil optimal (Eq. IV.30). Cette hypothèse tient son fondement sur les corrélations entre le $NDVI$ (ou absorption du rayonnement pour la photosynthèse) et la transpiration et la production de biomasse (De Wit et al. 1970; Monteith 1972). Cette méthode n'est valable que si les profils de $NDVI$ sont relativement bien phasés et correspondent à un seul type de cultures. Elle n'a donc été appliquée que dans le cas du secteur R3 où la culture de blé est dominante.

$$A = \int_{DébutDate}^{FinDate} [NDVI(t) - \min(NDVI)] \times dt \quad (\text{Eq. IV.29})$$

Où t est le temps, et prends pour valeur chaque date d'acquisition d'image FORMOSAT-2. Pour le profil « optimal » d'une culture non stressée, cette intégrale prend sa valeur maximale.

$$S_{IRR}(CA) = \frac{\int_{DébutDate}^{FinDate} [NDVI(t)_j - \min(NDVI_j)] \times dt}{\int_{DébutDate}^{FinDate} [NDVI(t)_{optimal} - \min(NDVI_{optimal})] \times dt} = \frac{A}{A_{max}} \quad (\text{Eq. IV.30})$$

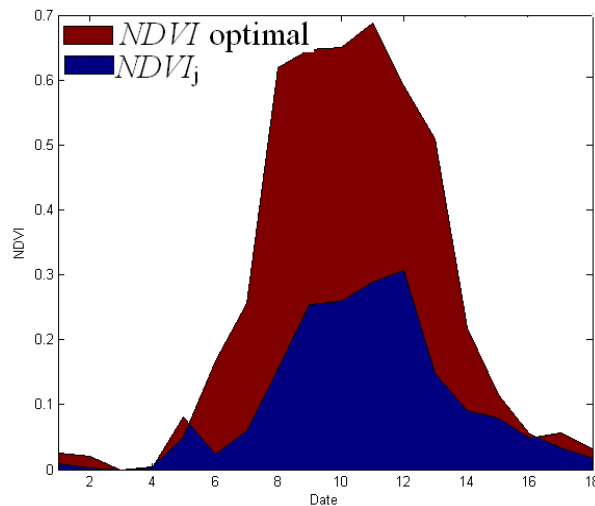


Figure IV.17: Exemple illustrant le calcul du rapport des intégrales des profils de NDVI.

En tout, nous avons étudié quatre scénarii définis par les valeurs du seuil de stress hydrique toléré pour les cultures annuelles $S_{IRR}(CA)$ et les arbres $S_{IRR}(AR)$:

- 1- Scénario de stress maximal : $S_{IRR}(CA) = 0.6$ et $S_{IRR}(AR) = 0.8$;
- 2- Scénario de stress intermédiaire : $S_{IRR}(CA) = 0.8$ et $S_{IRR}(AR) = 0.9$;
- 3- Scénario de stress nul : $S_{IRR}(CA) = 1$ et $S_{IRR}(AR) = 1$;
- 4- Scénario de stress variable : $S_{IRR}(CA) = \text{variable}$ et $S_{IRR}(AR) = 0.8$;

Deux types d'évaluations du module de bilan hydrique ont été réalisés:

- Une évaluation quantitative sur le secteur irrigué R3, par comparaison aux volumes d'eau des barrages distribués par l'ORMVAH à l'échelle des tertiaires d'irrigation;
- Une évaluation qualitative sur la partie de la plaine du Tensift couverte par les images FORMOSAT-2.

IV-2.2.1 Analyse quantitative (secteur R3)

L'application des quatre différents scénarii d'irrigation précédemment discutés a permis d'établir des cartes de cumuls saisonniers d'irrigation à l'échelle des tertiaires sur le secteur R3, qui sont comparées aux volumes d'eau des barrages distribués par l'ORMVAH (cf. II-3.6). On compte en tout 60 tertiaires, qui représentent des surfaces de taille variable, de quelques dizaines à plus de deux cents hectares. Le cumul est réalisé sur la saison agricole, de décembre à avril, pour laquelle les données d'irrigation ont été collectées. Le secteur R3 est principalement constitué, à part égale, de zones non irriguées et de cultures annuelles (principalement du blé); l'arboriculture est minoritaire, avec moins de 4 % de la surface totale du secteur; la luzerne est très fortement minoritaire, environ 0.1 % de la surface totale (cf. III-1).

Les cumuls saisonniers restitués pour chacun des quatre scénarii sont tous supérieurs aux dotations de l'ORMVAH (Tableau IV.6). Ceci est expliqué par le fait que ces dernières correspondent à l'eau des barrages, alors que d'autres systèmes d'irrigation existent (pompage en particulier). Logiquement, les quantités d'irrigation estimées augmentent avec le seuil de stress toléré (S_{IRR}) d'une valeur moyenne d'environ 250 mm pour le scénario de stress maximal à une valeur d'environ 320 mm lorsque le stress toléré est nul.

Tableau IV.6: Irrigation moyenne sur le secteur R3. Les quantités d'eau distribuées par l'ORMVAH ont été réparties uniformément sur les surfaces cultivées pour procéder à la comparaison.

	ORMVAH	Scénario1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Irrigation [mm]	215.7	256.7	284.9	315.2	264.4

En première analyse, les variations spatiales des irrigations restituées et observées sont cohérentes (Figure IV.18). Dans la partie est de la rive droite de R3 (zone 1 en Figure IV.18), les valeurs d'irrigation sont faibles (comprises entre 0 et 50 mm) et correspondent aux dotations de l'ORMVAH. Cette partie du secteur est majoritairement non cultivée (Figure IV.19), avec un pourcentage de zones non irriguées avoisinant les 80 % et l'absence d'ouvrage pour le pompage des eaux de la nappe. Les quantités d'irrigation sont plus élevées dans la partie centrale de R3, qui affiche un fort pourcentage de cultures annuelles, autour de 60-80 %. On observe dans la partie nord de la rive droite (zone 2 en Figure IV.18) une disparité entre les estimations, comprises entre 200 à 250 mm, et les irrigations ORMVAH, inférieures à 100 mm. Cette disparité peut être expliquée par l'irrigation pratiquée par pompages (forte concentration des points de forages, points rouges en Figure IV.18), qui n'est pas comptabilisée dans les données ORMVAH. Le caractère élevé des estimations est d'autre part expliqué par les données d'occupation du sol, avec un pourcentage non négligeable de plantations arborées (entre 20 et 40 % Figure IV.19), fortement consommatrices d'eau.

L'efficacité des réseaux de transports et de distribution de l'eau d'irrigation en amont des parcelles agricoles (80%) peut expliquer une part des disparités observées sur le secteur R3 car une partie des volumes distribués est perdue avant d'arriver à la parcelle.

Pour conforter cette première analyse, nous avons comparé les valeurs restituées par la méthode aux dotations de l'ORMVAH en distinguant les tertiaires contenant des forages (Figure IV.20a) des autres (Figure IV.20b). On constate une nette amélioration entre l'irrigation restituée et les dotations en eau des barrages lorsque les forages sont éliminés (gain de 0.2 sur le R²). Dans le cas où la comparaison est réalisée sur tous les tertiaires, il existe un ensemble de points où les estimations des irrigations sont très fortement supérieures à celles de l'ORMVAH (cercle pointillé sur le Figure IV.20a). Ces écarts disparaissent lorsqu'on réalise la comparaison uniquement sur les tertiaires sans puits (Figure IV.20b). Cette analyse met en évidence l'importance des différentes sources d'irrigation, et la perspective de procéder à une évaluation des quantités d'eau prélevées par pompage par la méthode de spatialisation du bilan hydrique que nous avons développée.

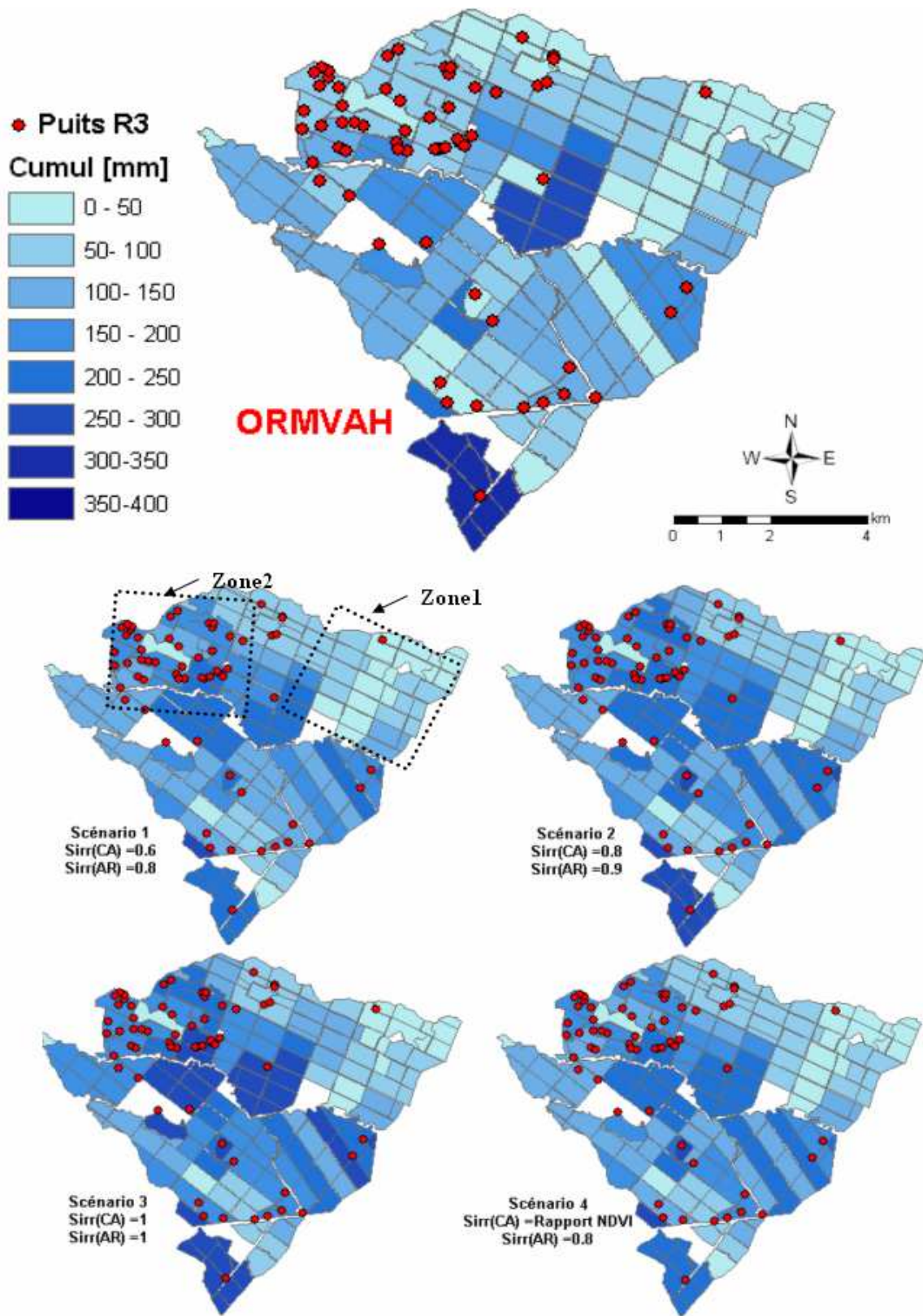


Figure IV.18: Cumuls saisonniers d'irrigation (04/1/05 – 30/04/06) estimés pour les quatre scénarii de conduite des cultures. La carte principale (en haut) correspond à la dotation en eau des barrages. Les puits et forages sont localisés (cercles rouges).

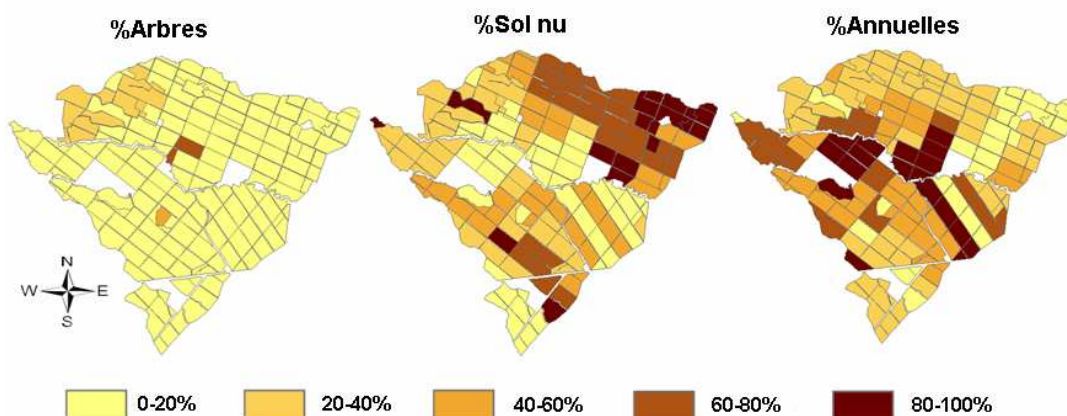


Figure IV.19: Répartition spatiale de l'occupation du sol par tertiaire d'irrigation.

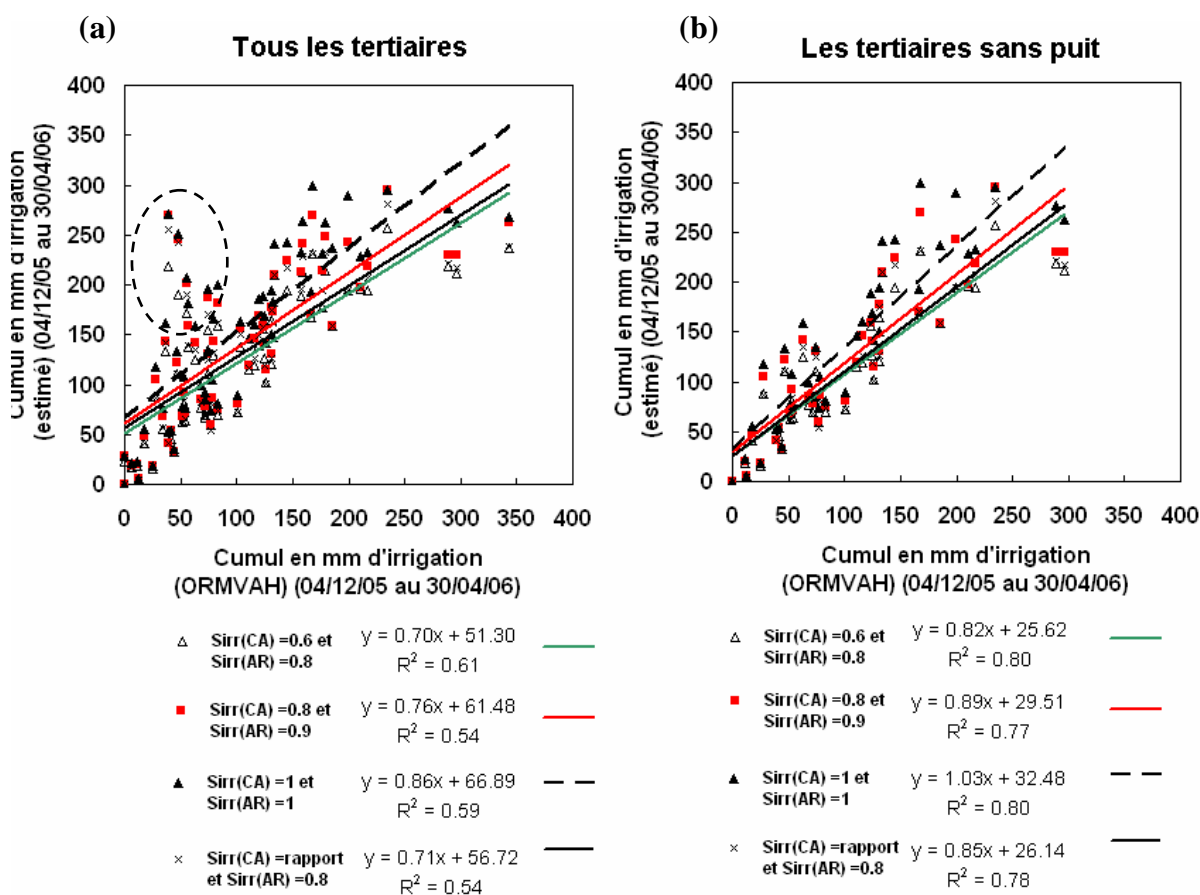


Figure IV.20: Cumuls saisonniers d'irrigation (04/12/05-30/04/06) estimés selon les quatre scénarii de conduite des cultures en fonction de la dotation en eau des barrages (ORMVAH)

Tableau IV.7: Statistiques sur les estimations des irrigations (seuls les tertiaires sans puits sont considérés dans le calcul de la RMSE et du R²).

	Scénario		RMSE [mm]	R ²
Scénario 1	Sirr(CA) = 0.6	et Sirr(AR) = 0.8	34.20	0.80
Scénario 2	Sirr(CA) = 0.8	et Sirr(AR) = 0.9	41.70	0.77
Scénario 3	Sirr(CA) = 1	et Sirr(AR) = 1	52.13	0.80
Scénario 4	Sirr(CA) = rapport et Sirr(AR) = 0.8		36.58	0.78

La Figure IV.20 et le Tableau IV.7 permettent également de juger de la qualité des différents scénarii d'irrigation testés. Un léger avantage peut-être accordé au scénario 1 où le stress est maximal (correlation la plus élevée et erreur la plus faible). La tentative de faire varier le niveau de stress en fonction du profil de *NDVI* n'apporte en première analyse pas d'amélioration. Les valeurs de seuils constatées dans le cas du scénario de stress variable (Figure IV.21) indiquent cependant que la majorité des cultures souffrent d'un déficit de croissance. L'analyse détaillée des données de l'ORMVAH a en effet montré que le nombre de tour d'eau est très variable d'une exploitation à l'autre (de un à quatre pour les cultures de blé). Plus généralement, il existe en effet une grande variabilité des pratiques agricoles (Duchemin et al. 2008; Hadria et al. 2005).

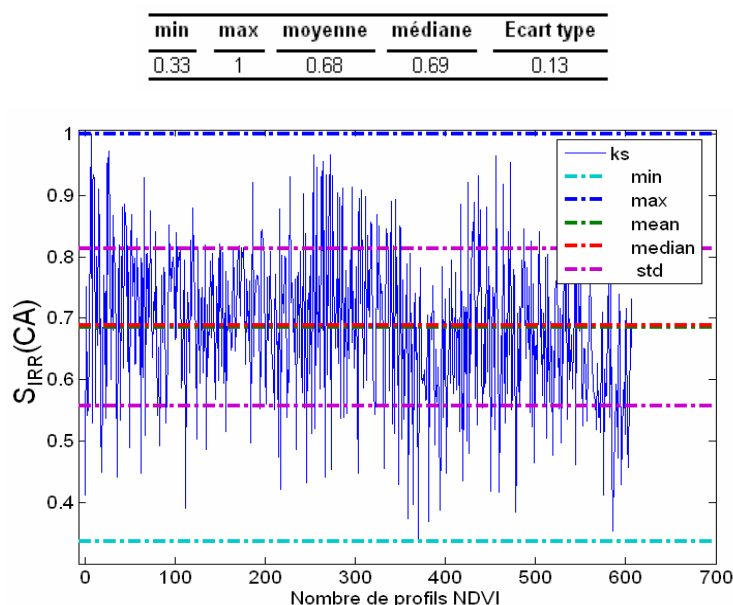


Figure IV.21: Variations du seuil de stress hydrique toléré pour les cultures annuelles du secteur R3.

Dans ce qui suit, le scénario de stress maximal est retenu pour estimer les irrigations et deux analyses sont réalisées pour expliquer leurs variations spatiales et temporelles.

La Figure IV.22 met en relation les irrigations et l'occupation du sol. Les quantités d'irrigation (estimées et ORMVAH) augmentent en premier lieu avec les surfaces cultivées (somme des pourcentages de plantations arborées et de cultures annuelles) et sont inversement proportionnelles au pourcentage de sol nu. Ce constat est rassurant et conforte nos résultats. Les irrigations estimées sont fortement corrélées aux pourcentages d'occupation du sol ($R^2=0.95$), étant donné que l'occupation du sol est une des variables clef de la modélisation du bilan hydrique. Cette tendance diminue pour les données ORMVAH ($R^2=0.53$). Plusieurs explications peuvent être avancées ici, notamment les erreurs commises sur l'occupation du sol et le caractère réducteur de l'hypothèse effectuée sur la conduite des irrigations en regard de la très grande variabilité des itinéraires techniques.

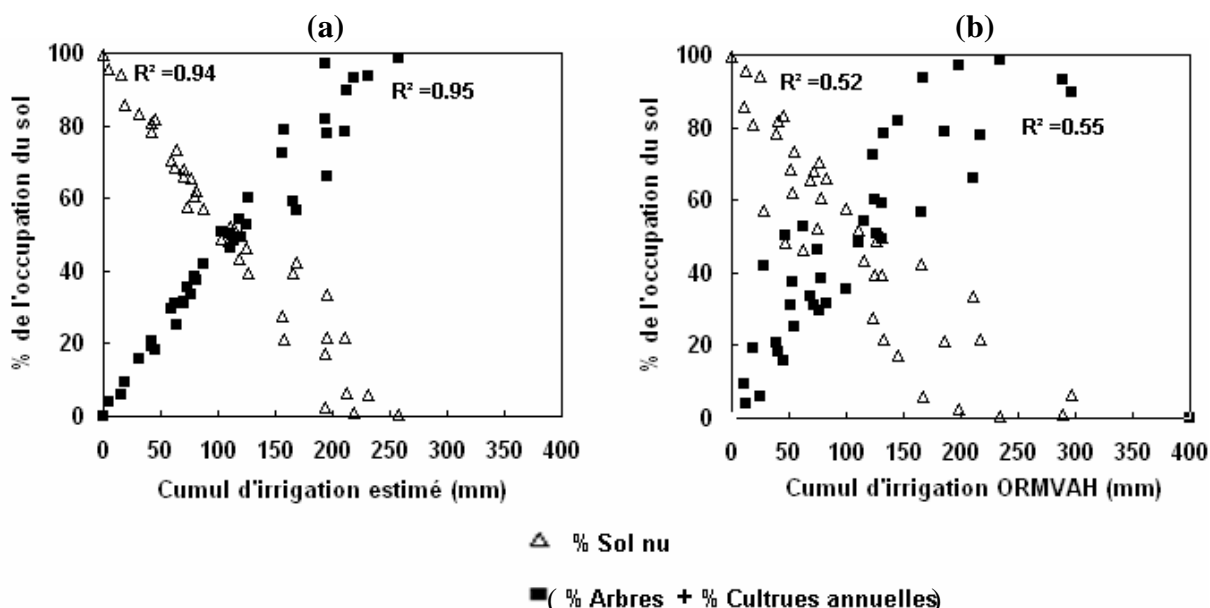


Figure IV.22: Irrigation et occupation du sol sur les tertiaires sans puits du secteur R3. A gauche (a), il s'agit des irrigations estimées avec un stress maximal; à droite (b), il s'agit des dotations de l'ORMVAH.

Enfin, nous avons étudié les variations temporelles des irrigations estimées et celles des dotations de l'ORMVAH en eau des barrages (Figure IV.23). Cette étude est menée à l'échelle du secteur R3, en cumulant les volumes d'irrigation journaliers distribués sur tous les tertiaires. Ces volumes sont répartis uniformément, donc fournis en mm (Figure IV.23 en haut) et comparés aux chroniques de précipitations journalières et d'évapotranspiration de référence *ET0* (Figure IV.23 en bas). On constate que les quantités d'irrigation estimées et observées sont cohérentes dans le temps, avec trois périodes distinctes:

- Le début de saison (du 04/12/05 au 04/01/06), très sec et avec une demande évaporative peu élevée (de l'ordre de 2 mm), où des événements d'irrigation de faible ampleur (en moyenne de 1 mm/jour) sont enregistrés (Figure IV.23c).
- Un milieu de saison (du 05/01/06 et 01/03/06), caractérisé par une succession de précipitations significatives, où les irrigations sont fortement réduites. On constate toutefois que certains exploitants continuent d'irriguer alors que cela n'apparaît pas nécessaire; le cumul de pluie durant cette période (150 mm) est largement supérieur au cumul d'*ET0*, d'environ 100 mm).
- La fin de la saison, à partir de mars, où l'on enregistre les quantités d'irrigation les plus élevées (2 mm/jour) car la demande évaporative est forte (autour de 4 mm) et les pluies quasi-inexistantes. Les irrigations estimée et observée sont comparables sauf au début de cette période où le modèle déclenche les irrigations en avance. En l'absence de mesure de flux d'évapotranspiration, il est toutefois difficile d'affirmer que les irrigations ont été pratiquées trop tardivement.

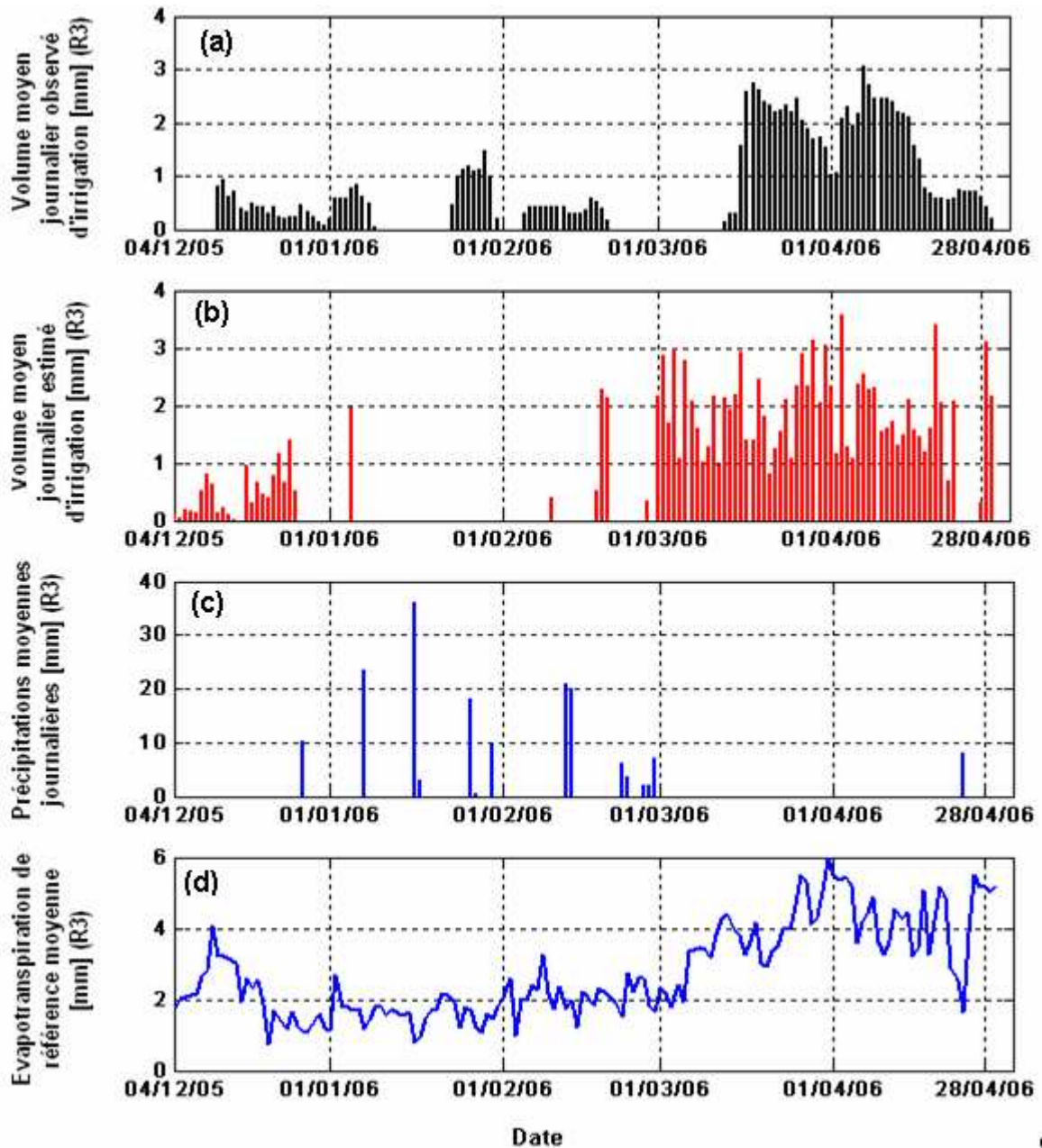


Figure IV.23: Evolution journalières à l'échelle du secteur R3 de : (a) la dotation de l'ORMVAH ; (b) l'irrigation estimée avec un stress maximal; (c) la pluie et (d) l'évapotranspiration de référence.

IV-2.2.2 Analyse qualitative sur la zone FORMOSAT-2

Le modèle de bilan hydrique est appliqué sur toute la région couverte par les images FORMOSAT-2. Cette région est constituée d'environ 40 % de zones non irriguées et de cultures annuelles, et un peu moins de 20 % de vergers (cf. III-1). Les cartes d'irrigation ne peuvent être validées par manque de données quantitatives sur l'ensemble de cette région, mais nous avons analysé la cohérence spatiale des estimations, sur la base de l'occupation du sol et du climat. Il s'agit plus d'une évaluation du bon comportement du modèle sur l'ensemble des unités géographiques considérées (près de 30000 segments). Le modèle est appliqué dans les mêmes conditions que précédemment, à l'exception de la carte des sols qui est extraite de la carte des sols disponible sur l'ensemble de la plaine (cf. II-3.3).

Nous avons calculé les cartes de cumul de l'irrigation et de l'évapotranspiration estimées par le modèle sur la période du 04/12/05 au 11/06/06 (Figure IV.24). L'évapotranspiration estimée varie entre 111 et 700 mm avec une valeur moyenne d'environ 450 mm (Tableau IV.8). Les valeurs maximales sont observées pour la luzerne (coefficient cultural de 1.1) et sont cohérentes avec la demande évaporative (environ 630 mm). Logiquement, l'irrigation et l'évapotranspiration sont fortement corrélées. Les Figure IV.24a et IV.24b montrent la cohérence de la répartition spatiale de ces deux variables (corrélation de 0.89, Figure IV.25). L'écart entre ces deux variables (environ 150 mm) est inférieur au cumul pluviométrique (de l'ordre de 270 mm). Le bilan, n'est pas fermé car une partie des apports d'eau peut-être drainée où stockée dans le sol.

Enfin une analyse de la variation des irrigations en fonction de l'occupation du sol a été réalisée. Dans cet objectif, nous avons segmenté la région en plusieurs intervalles relatifs aux cumuls d'irrigation ([0-100 mm], [100-200 mm]...) et relevé l'occupation du sol pour chacun des intervalles. Le Tableau IV.9 montre que la variation des

quantités d'irrigation en fonction de l'occupation du sol est cohérente. On retrouve dans ce tableau le fonctionnement de la région d'étude en deux grandes classes correspondant à des besoins en eau différents: végétation pérenne (plantations arborées et luzerne) et cultures annuelles. Tous les segments classés en cultures annuelles sont irrigués, avec des quantités au moins supérieures à 200 mm. Les quantités d'irrigation augmentent progressivement pour les plantations arborées jusqu'à atteindre 600 mm.

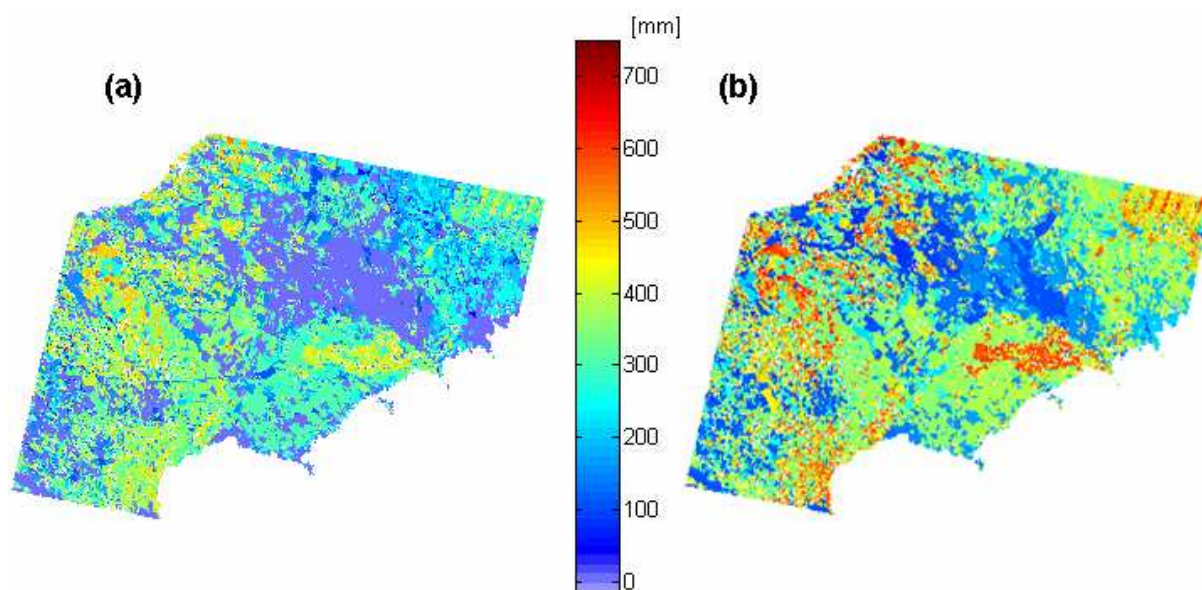


Figure IV.24: Irrigations (a) et évapotranspirations (b) saisonnières estimées sur la scène FORMOSAT-2.

Tableau IV.8: Statistiques sur l'irrigation et l'évapotranspiration estimées sur la scène FORMOSAT-2.

	Statistiques sur la zone FORMOSAT-2			
	min	max	moyenne	Ecart type
Evapotranspiration [mm]	111.2	714.7	450.5	106.5
Irrigation [mm]	0	600.0	308.9	150.3

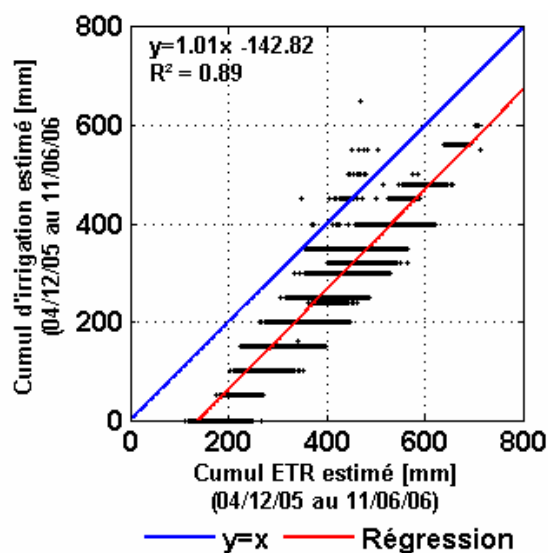


Figure IV.25: Evapotranspiration estimée en fonction de l'irrigation estimée sur la scène FORMOSAT-2.

Tableau IV.9: Irrigation estimée et occupation du sol sur la zone FORMOSAT-2.

	Cumul d'irrigation [mm]						
	0	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600
% Arbre	0	0	0	0.5	25	65	84
% Culture annuelle	0	100	100	99.5	75	35	15
% Sol nu	100	0	0	0	0	0	0

IV-3 SPATIALISATION A PARTIR DE DONNEES A BASSE RESOLUTION SPATIALE (MODIS, PERIODE 2000-2006)

Dans cette partie, l'irrigation est estimée à l'échelle de toute la plaine du Tensift à partir de l'information obtenue par désagrégation des données MODIS à l'aide de la méthode non supervisée. Deux approches de spatialisation du bilan hydrique avec des degrés de complexités différents sont évaluées à partir des cartes d'irrigation établies à l'aide des données FORMOSAT-2 durant la saison agricole 2005-2006 et à partir des mesures d'évaporation sur les parcelles d'expérimentation du projet SudMed. Ensuite, l'étude est généralisée à l'ensemble de la plaine du Tensift et à la période 2000-2006 (six saisons agricoles de 2000-2001 à 2005-2006). On analyse la variabilité spatiale et temporelle des irrigations estimées en comparaison de la dotation ORMVAH (eaux des barrages).

IV-3.1 Approche de spatialisation simplifiée (SIM1)

Il s'agit d'une méthode résiduelle qui consiste à résoudre une équation simplifiée du bilan hydrique (Eq. IV.31) au pas de temps annuel, sans modéliser les variations du contenu en eau du sol. On suppose que: (1) la variation du stock d'eau dans le sol est négligeable; (2) les termes de drainage sont négligeables; (3) les cultures sont irriguées selon leur besoin en eau (absence de stress hydrique). L'équation est appliquée à la résolution de MODIS (270 m) en chaque pixel de la plaine:

$$\Delta S = P + I - ET = 0 \quad (\text{Eq. IV.31})$$

Avec

S : stock d'eau dans le sol [mm] ;

P : précipitations [mm] ;

I : irrigation [mm] ;

ET : évapotranspiration [mm].

Dans cette équation, le terme de précipitations est connu. Il correspond au cumul annuel de précipitations annuelles que nous avons estimé à partir du réseau de stations pluviométriques (cf. II-3.1). Les termes d'évapotranspiration et de pluie sont calculés au pas de temps journalier avant d'être cumulés pour obtenir des valeurs saisonnières. L'irrigation annuelle est ensuite déduite de l'Eq. IV.31. Nous avons effectué deux bilans distincts pour les cultures irriguées (classes « arbre » et « culture annuelle »). Les valeurs d'évapotranspiration et d'irrigation estimées sont agrégées en chaque pixel en fonction de son occupation du sol établie par désagrégation des données MODIS (cf. III-3).

1) *Classe « arbre »*

Le calcul de l'évapotranspiration (ET_{Arbres} , Eq. IV.32) utilise la méthode « *single-crop coefficient* » (Allen et al. 1998). Le coefficient cultural est fixé à la valeur de 0.6. Cette valeur a été déterminée en recoupant les valeurs communiquées par la FAO et les estimations issues des flux d'évapotranspiration mesurées sur les vergers durant le projet SudMed. L'évapotranspiration de référence a été spatialisée par interpolation des stations météorologiques (cf. II-3.2.3).

$$ET_{Arbres} = K_c \times ET_0 \quad (\text{Eq. IV.32})$$

Avec

ET_0 : évapotranspiration de référence [mm] ;

K_c : coefficient de culture.

2) *Classe « culture annuelle »*

La résolution de l'équation du bilan hydrique des cultures annuelles est effectuée sur la période décembre-mai. Cette période correspond au cycle de culture du blé, culture annuelle majoritaire dans la plaine du Tensift. Le calcul de l'évapotranspiration ($ET_{Annuelles}$, Eq. IV.33) est réalisé avec la méthode « *dual-crop coefficient* », sans tenir

compte du stress hydrique. Le coefficient de transpiration (K_{cb}) et la couverture végétale (COV) sont déduits du $NDVI$ à partir des relations établies sur les cultures de blé (Eq. IV.34 et IV.35). Le profil-type de $NDVI$, établi par désagrégation des données MODIS pour chaque saison agricole (cf. III-3.2), est utilisé pour calculer ces variables au pas de temps journalier. Le coefficient d'évaporation (Ke) a été fixé à 0.3 par analyse des tableaux de la FAO et d'après la fréquence des apports d'eau.

$$ET_{Annuelles} = (K_{cb} + (1 - COV) \times Ke) \times ET_0 \quad \text{(Eq. IV.33)}$$

$$K_{cb} = 1.64 \times (NDVI - 0.14) \quad \text{(Eq. IV.34)}$$

$$COV = 1.18 \times (NDVI - 0.14) \quad \text{(Eq. IV.35)}$$

Avec

K_{cb} : coefficient cultural caractérisant la transpiration ;

COV : couverture du sol par la végétation ;

Ke : coefficient d'évaporation.

(le $NDVI$ est déduit du profil type de la classe « culture annuelle »).

Pour chaque saison agricole étudiée, l'irrigation est calculée en effectuant la différence entre les valeurs cumulées de l'évapotranspiration et de la pluie, sur la saison entière (septembre-août) pour les plantations arborées et sur la période décembre-mai pour les cultures annuelles. L'irrigation de chaque pixel est déduite de ces valeurs cumulées en fonction du pourcentage occupé par chacune de ces deux classes dans le pixel MODIS (Eq. IV.36). Ces pourcentages ont été cartographiés par désagrégation des données MODIS (cf. III-3).

$$I = \% (AR) \times I_{Arbres} + \% (CA) \times I_{Annuelles} \quad \text{(Eq. IV.36)}$$

où les termes I , I_{Arbres} et $I_{Annuelles}$ représentent respectivement les irrigations estimées pour le pixel étudié de la classe « arbre » et la classe « culture annuelle », et les termes

$\%(AR)$ et $\%(CA)$ représentent la fraction occupée par ces deux classes dans le pixel MODIS.

IV-3.2 Approche par modélisation (SIM2)

Cette approche est comparable à celle appliquée à haute résolution spatiale à partir de la série d'images FORMOSAT-2 (cf. IV-2). Les variables météorologiques et les propriétés hydriques du sol sont appréhendées à partir des valeurs spatialisées (évapotranspiration de référence ET_0 , pluie P , cf. II-3.1 et II-3.2, profondeur du sol et valeurs d'humidités au point de flétrissement et à la capacité au champ, cf. II-3.3). Le modèle est appliqué en chaque pixel de la plaine au pas de temps journalier, avec une distinction entre cultures annuelles et plantations arborées.

Pour les cultures annuelles, il s'agit en premier lieu d'étalonner le module de croissance à partir des séries temporelles de l'indice foliaire « observé ». Ces valeurs sont déduites du profil-type de $NDVI$ de la classe « culture annuelle » en utilisant la relation établie pour des cultures de blé. Le module du bilan hydrique est ensuite forcé avec le profil d'indice foliaire simulé (qui module la partition entre évaporation et transpiration, ainsi que la pluie efficace). Le sol est décrit par deux horizons en dehors de la saison de végétation, et trois pendant la saison de végétation. Celle-ci est déterminée à partir des simulations de l'indice foliaire, entre la date d'émergence et la date de sénescence complète. Le modèle fournit en sortie des estimations journalières de l'évapotranspiration ($ET_{annuelle}$) et de l'irrigation ($I_{annuelle}$) sur la base du scénario de stress maximal (apport de 50 mm lorsque l'indice de stress hydrique est inférieur à 0.6).

Pour les plantations arborées, le modèle de bilan hydrique est appliqué à trois horizons de sol. Les valeurs de coefficient cultural et le taux de couverture dépendent du profil-type de $NDVI$ de la classe « arbre » (annexe 4). L'évapotranspiration (ET_{arbre}) et l'irrigation (I_{arbre}) sont estimées pour des apports d'eau de 80 mm et un seuil de stress hydrique toléré de 0.8.

Comme précédemment, l'irrigation de chaque pixel est calculée en pondérant l'irrigation simulée pour chacune des deux classes par leur fraction d'occupation du sol (Eq. IV.36).

IV-3.3 Evaluation des deux approches

Les deux approches SIM1 et SIM2 précédemment décrites sont appliquées aux données MODIS pour la saison 2005-2006 sur la région de la plaine couverte par les données FORMOSAT-2. Les quantités d'irrigation estimées par les deux approches sont comparées à celles déduites des données à haute résolution sur la période du 04/12/2005 au 11/06/06. Au préalable, les cartes d'irrigation à haute résolution ont été dégradées à la résolution de MODIS (270 m).

Les irrigations estimées sont comparées en Figure IV.26. Les estimations à haute et basse résolution sont modérément corrélées, avec des R^2 légèrement inférieurs à 0.6 pour SIM1 et à 0.7 pour SIM2, et des erreurs supérieures dans le premier cas (20 % contre 15 % en RMSE relative). En première analyse, les performances de l'algorithme de spatialisation SIM1 apparaissent légèrement inférieures à celles de SIM2. Cependant, la droite de régression est légèrement plus proche de la première bissectrice dans le cas de SIM1 (pente de 0.74 contre 0.58). La différence entre les deux approches est principalement observée pour les fortes valeurs, avec un plafond à 700 mm pour SIM1 et 500 mm pour SIM2. Ces fortes valeurs correspondent aux zones à fort taux de plantations arborées (au nord-ouest de la région d'étude, Figure IV.27). La différence entre les deux approches s'explique avant tout par la prise en compte des conditions de stress hydrique: dans SIM1, l'évapotranspiration est considérée égale au besoin en eau des cultures, alors qu'un stress hydrique toléré est considéré dans le cas de SIM2.

Les deux approches tendent à surestimer les faibles irrigations, avec un biais à l'origine de l'ordre de 100 mm dans le cas de SIM1 et de 120 mm dans le cas de SIM2 (voir les rectangles en pointillé rouge sur la Figure IV.26 et la Figure IV.27). L'explication tient

aux différences d'occupation du sol à haute et basse résolution. L'occupation du sol restituée par MODIS par la méthode non supervisée (cf. III-3) inclut toujours un faible pourcentage de cultures irriguées, alors que certains pixels sont déclarés totalement non cultivés d'après les images FORMOSAT-2. Ceci est notamment le cas pour les pixels de la zone faiblement cultivée localisée au centre de la région d'étude (carré en pointillé rouge sur la Figure IV.27), pour laquelle la classe « sol nu » occupe quasiment 100 % d'après l'occupation du sol dérivée de FORMOSAT-2, alors que le taux de « culture annuelle » dépasse les 30 % d'après les estimations effectuées avec MODIS.

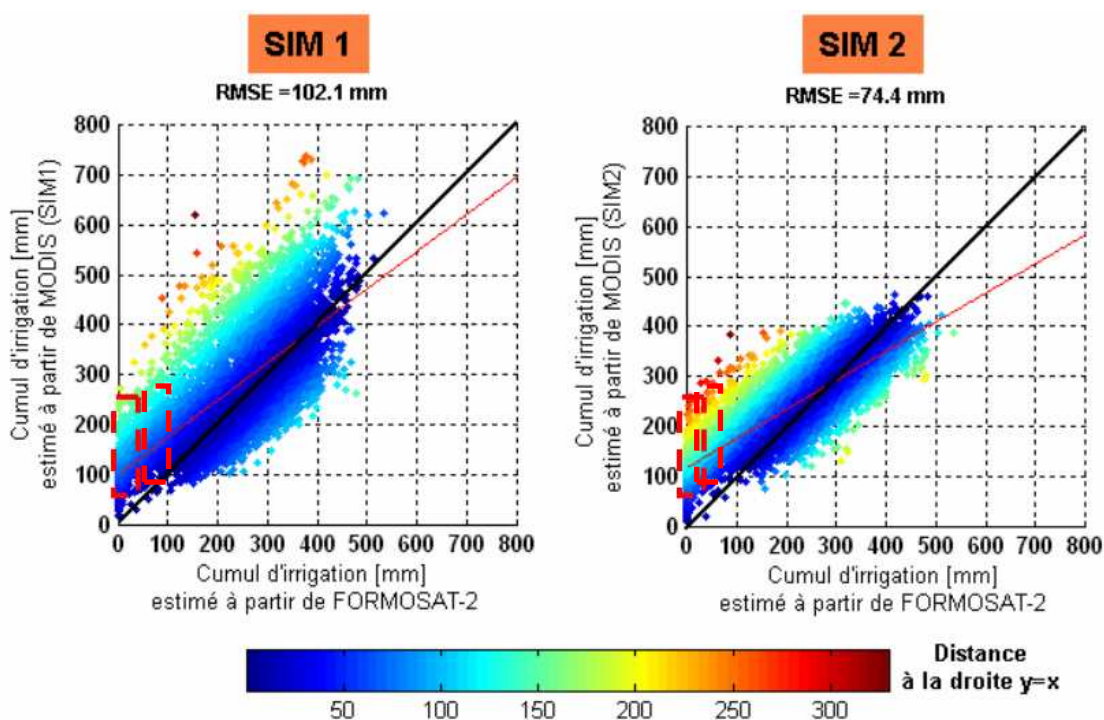


Figure IV.26: Irrigations saisonnières spatialisées à partir des données MODIS par les deux approches (SIM1, à gauche, et SIM2, à droite) en fonction de celles estimées par FORMOSAT-2 (4/12/05 au 11/06/06)

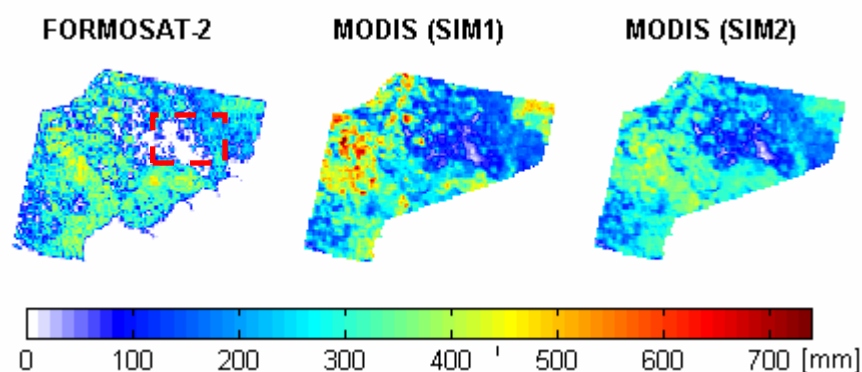


Figure IV.27: Irrigations saisonnières spatialisées à partir des données FORMOSAT-2 (à gauche), et MODIS (SIM1, au centre, et SIM2, à droite) du 04/12/05 au 11/06/06. Le rectangle pointillé en rouge délimite la région où les irrigations calculées à partir des données FORMOSAT-2 sont très faibles.

Les estimations de l'évapotranspiration par les deux approches ont été comparées aux mesures effectuées durant le projet SudMed. Les mesures sont collectées sur huit parcelles : quatre parcelles cultivées en blé, deux parcelles d'oliviers (l'une étudiée sur deux années consécutives) et deux parcelles d'orangers (cf. II-3.5).

Les Figure IV.28 et IV.29, ainsi que le Tableau IV.10 permettent d'évaluer les estimations de l'évapotranspiration. Les variations saisonnières de cette variable apparaissent globalement bien reproduites (Figure IV.28 et IV.29), avec des différences notables entre les deux types de cultures et les deux approches de simulations. Pour les cultures annuelles, l'erreur moyenne dans le cas de SIM2 est plus faible que dans le cas de la SIM1 (5 % contre 14 %). La différence relative entre les estimations et les observations est inférieure à 10 % sauf dans le cas de CA3. Pour cette parcelle, l'évapotranspiration chute brutalement en milieu et en fin de période de mesure, ce qui peut-être imputé à des périodes de stress hydrique non ou mal prises en compte par les simulations. Pour les arbres, il y a une grande différence entre les deux approches, avec une surestimation très nette du terme d'évapotranspiration dans le cas de SIM2 (de 20 à 45 % selon les sites). Cette surestimation est due au calcul du coefficient cultural à partir du *NDVI*. La relation utilisée est censée tenir compte des variations du taux de couverture des plantations arborées. Elle est appliquée ici aux profils-types de *NDVI* de la classe « arbre » issus de la méthode de désagrégation non supervisée. Or, nous avons

observé que ces profils correspondent à un couvert dense (cf. III-2.2.3 et III-3.2). L'erreur moyenne commise dans le cas de SIM1, où l'on utilise un coefficient cultural fixe, est du même ordre de grandeur que celle constatée sur les cultures annuelles (autour de 13 %).

Tableau IV.10: Statistiques sur l'évapotranspiration estimée par les deux approches (SIM1 et SIM2) et mesurée sur les neuf sites du projet SudMed.

Nom du site	Année	N*	Mesures	Evapotranspiration cumulée (mm)		Biais	
				SIM1	SIM2	(SIM1) (%)	(SIM2) (%)
CA1	2003	44	160.8	160.7	162.8	0	1
CA2	2003	71	240.9	258.4	218	7	-9
CA3	2003	55	145.3	199.9	175.5	38	21
CA4	2003-2004	147	329.8	363.8	344.8	10	5
				<i>Erreur moyenne(CA)</i>		<i>14%</i>	<i>5%</i>
AR1	2003	245	654.6	762.6	927.5	17	42
AR2	2004	199	620.2	622.9	731.1	0	18
AR3	2004	276	573.8	630	832.6	10	45
AR4	2005	204	579.6	687.1	819	19	41
AR5	2006	178	492.9	573.5	706	16	43
				<i>Erreur moyenne(AR)</i>		<i>12%</i>	<i>38%</i>

*Nombre de jour

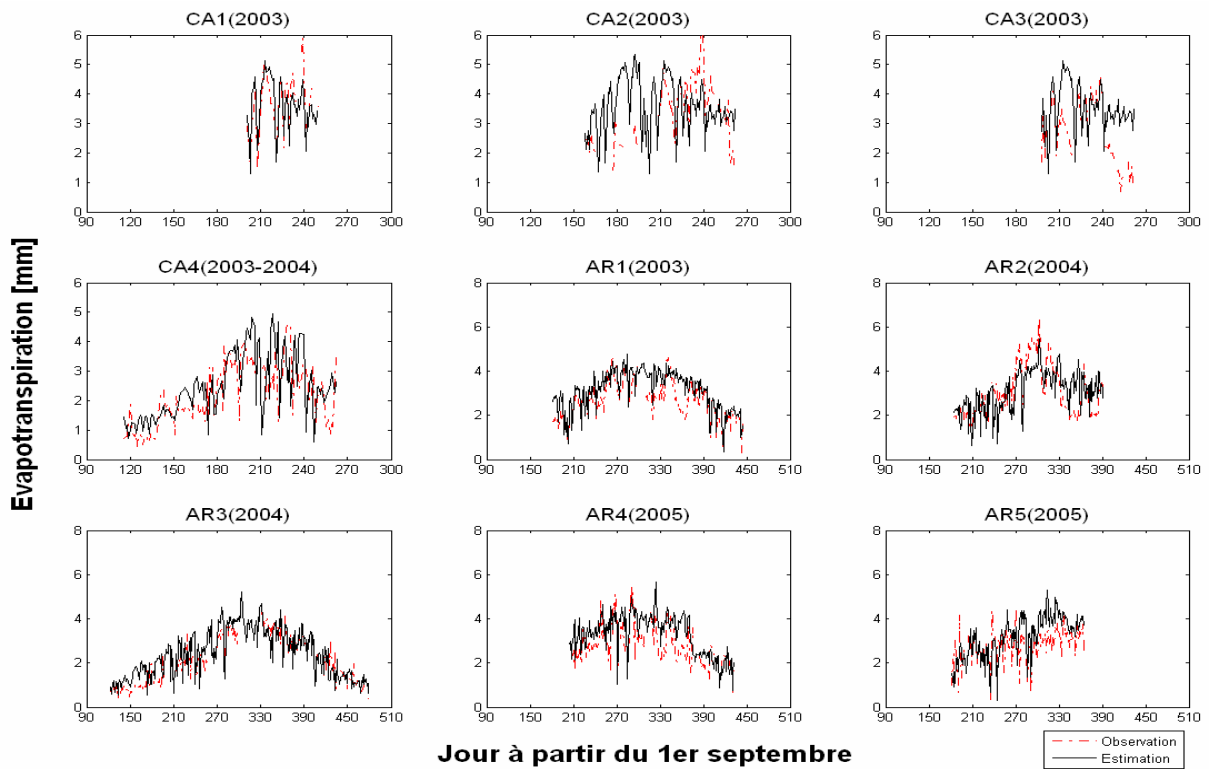


Figure IV.28: Evapotranspirations estimées (SIM1) et mesurées sur les neuf sites du projet SudMed.

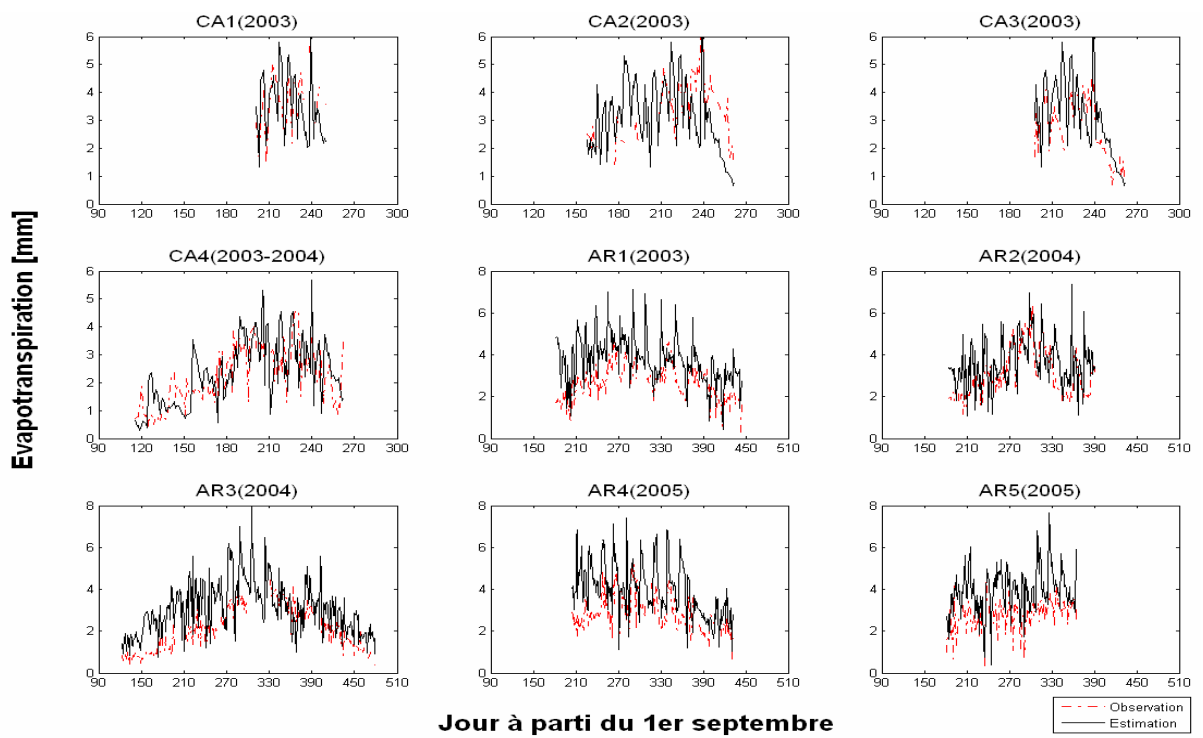


Figure IV.29: Evapotranspirations estimées (SIM2) et mesurées sur les neuf sites du projet SudMed.

Etant donné la complexité de mise en œuvre de la méthode SIM2, les incertitudes relatives à certaines hypothèses, paramètres ou variables de simulation (valeur de l'humidité initiale, scénario d'irrigation, réserve utile...), et la surestimation de l'évapotranspiration des plantations arborées constatée par l'approche SIM2, nous avons retenu la méthode SIM1 pour tenter de généraliser l'évaluation des irrigations à l'échelle de la plaine.

IV-3.4 Application aux saisons agricoles 2000-2001 à 2005-2006

L'approche de spatialisation du bilan hydrique SIM1 est appliquée saison par saison pour la période 2000-2006 sur la totalité de la plaine du Tensift, soit environ 40000 pixels à la résolution de MODIS. Dans un premier temps, les cartes des cumuls annuels d'irrigation et d'occupation du sol sont commentées. Ensuite, les quantités d'irrigation estimées sont confrontées aux irrigations observées sur les principaux secteurs irrigués de l'ORMVAH. Cette comparaison a été réalisée pour chaque secteur et sous-secteur irrigué, en s'appuyant d'une part sur les variables climatiques (précipitations, évapotranspiration de référence) et d'autre part sur l'occupation du sol.

Les cartes d'irrigation et d'occupation du sol sont données en Figure IV.30 La validation de ces résultats est difficile en raison de l'échelle d'étude. On peut cependant procéder à une analyse de la cohérence des estimations d'irrigation et d'occupation du sol, ainsi que de leurs variations spatiales et temporelles en fonction de variables hydro-climatiques.

L'irrigation varie de 0 et 900 mm/an, avec une moyenne sur toute la plaine et toute année confondue égale à 285 mm. Les valeurs faibles correspondent aux régions qui affichent un fort pourcentage de sol nu, principalement dans la partie ouest de la région d'étude en dehors des secteurs irrigués. Les valeurs maximales sont observées sur le

secteur irrigué de la Tessaout Amont, à l'est de la région où les cultures irriguées prédominent. D'une manière générale, les irrigations estimées apparaissent corrélées au taux de cultures irriguées. Ainsi, on distingue assez nettement les principaux secteurs irrigués gérés par l'ORMVAH (couleurs vertes à rouges correspondant aux fortes valeurs d'irrigation et vertes et bleues pour les plantations arborées et les cultures annuelles).

Les irrigations apparaissent également très fortement corrélées d'une année sur l'autre, ce qui est à *priori* rassurant puisque les terres cultivées sont relativement stables dans le temps. Pour l'ensemble de la plaine et n'importe quel couple d'année, les corrélations sont toutes supérieures à 0.88 (Tableau IV.11). De plus, on peut remarquer que cette corrélation est d'autant plus élevée que les couples d'années considérées sont proches. Le coefficient de corrélation est par exemple de 0.89 si l'on considère les saisons agricoles 2000-2001 et 2005-2006, contre 0.95 en moyenne pour deux années successives. Ceci pourrait traduire des tendances sur l'usage des terres, qu'il est cependant impossible de confirmer avec les données dont nous disposons pour cette étude.

On peut également constater sur la Figure IV.30, des variations inter-annuelles assez élevées, avec des valeurs maximales d'irrigation pour la saison 2004-2005 et des valeurs minimales pour la saison 2001-2002. Ceci est particulièrement visible sur la moitié est de la région d'étude. Les raisons, d'ordre hydro-climatique, sont discutées à l'échelle des secteurs irrigués.

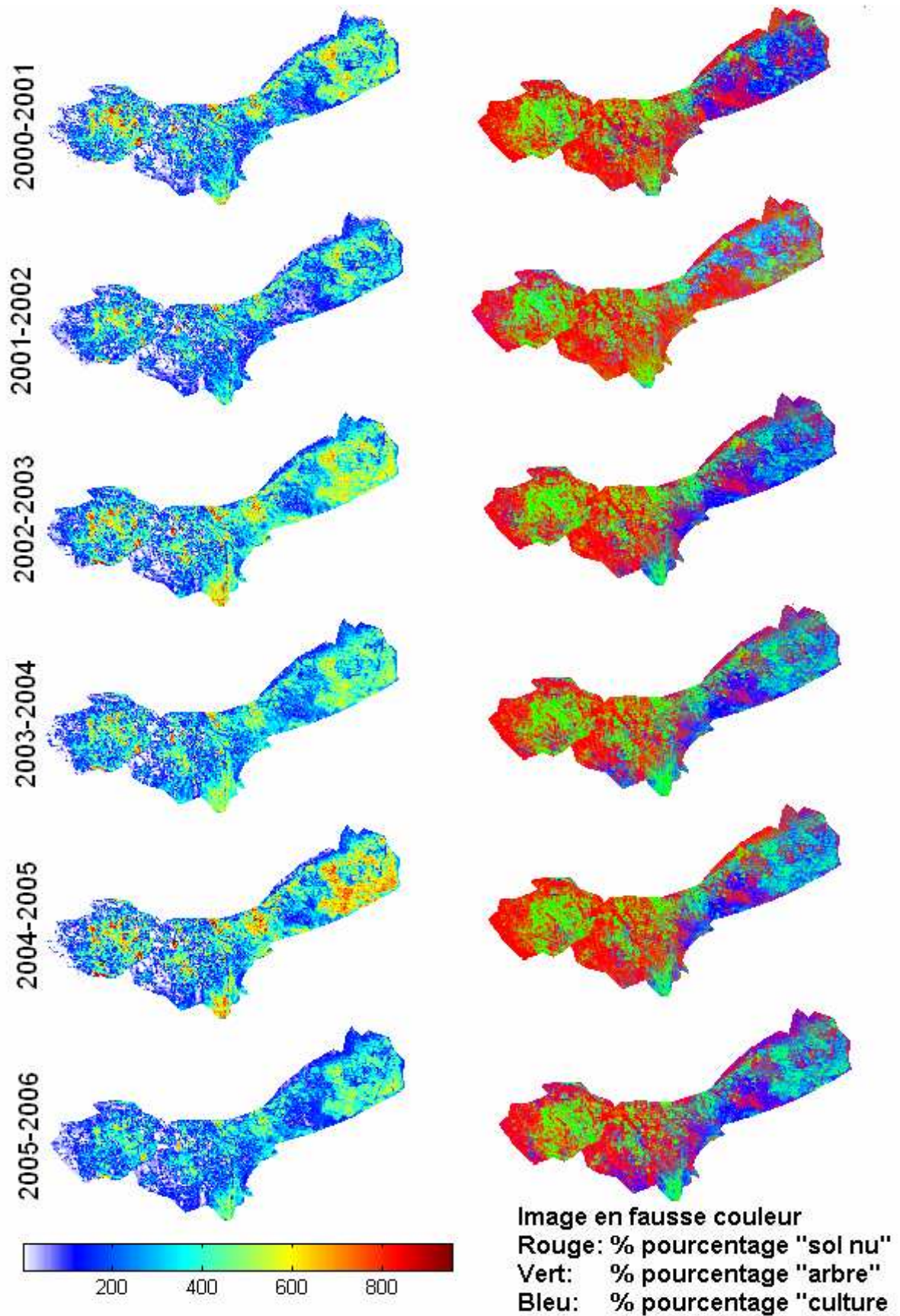


Figure IV.30: Irrigations annuelles et occupation du sol en plaine du Tensift (période 2000-2006).

Tableau IV.11: Matrice de corrélation temporelle des estimations d'irrigation.

	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006
2000-2001	1	0.95	0.92	0.89	0.90	0.89
2001-2002	0.95	1	0.92	0.89	0.88	0.88
2002-2003	0.92	0.92	1	0.95	0.94	0.92
2003-2004	0.89	0.89	0.95	1	0.95	0.94
2004-2005	0.90	0.88	0.94	0.95	1	0.97
2005-2006	0.89	0.88	0.92	0.94	0.97	1

Les facteurs climatiques explicatives ne se retrouvent pas tous au niveau des dotations de l'ORMVAH (Tableau IV.12). Ceci est dû au fait que l'eau des barrages est gérée en fonction de l'offre (taux de remplissage des barrages), contrairement à nos estimations qui témoignent de la demande (besoin en eau). On soulignera en particulier que les plantations arborées, et en particulier les oliviers, peuvent endurer des stress prolongés. Ainsi, les estimations apparaissent relativement stables d'une année sur l'autre, avec toutefois des fluctuations aux variations de la pluviométrie (irrigation réduite pour la saison agricole 2005-2006, la plus humide), de la demande évaporative (irrigation maximale en 2002-2003 et 2004-2005, en raison de la demande évaporative élevée), et de l'occupation du sol (irrigation très fortement réduite sur les secteurs irrigués Haouz et Tessaout dédiés à la céréaliculture en 2001-2002). A contrario, les dotations en eau de barrages apparaissent plus variables. Ceci est particulièrement visible pour le secteur NFIS où les plantations arborées (les plus stables dans le temps) dominent: la dotation fluctue d'environ 100 mm autour de leur valeur moyenne (~200 mm), alors qu'elle ne varie que de 50 mm autour d'une valeur moyenne de l'ordre de 330 mm) pour les estimations (Tableau IV.12). On distingue également et très nettement deux périodes: pour les trois premières saisons agricoles, les dotations sont limitées à cause de la sécheresse que la région a connue de 1999 à 2001: pour les trois saisons suivantes, les dotations sont plus élevées, d'un facteur 2 à 2.5 selon les secteurs. L'écart entre estimations et dotations ORMVAH, qui est principalement dû à l'existence des autres réseaux d'irrigation (réseau traditionnel non contrôlé et pompage) est donc très fortement différent entre ces deux périodes. Cette comparaison permet toutefois de constater que le stock d'eau des barrages est toujours nettement insuffisant pour satisfaire le besoin en eau d'irrigation. Le taux de satisfaction des besoins par l'eau des barrages varie de 20 % à 90 % selon les années, avec une hiérarchie entre les secteurs

(NFIS, Haouz, Tessaout). Cette hiérarchie n'est pas la même pour les estimations (Tessaout, Haouz, NFIS), et cela traduit probablement des différences entre les modes d'alimentation des secteurs irrigués qu'il serait intéressant d'approfondir avec les gestionnaires régionaux (ORMVAH, ABHT), que ce soit à l'échelle des secteurs ou à celle des sous-secteurs. A cet effet, les valeurs obtenues pour chacun des sous-secteurs sont communiquées en annexe 5 de ce document. Enfin, il est probable que les autres réseaux d'irrigation, et en particulier les pompages, soient utilisés pour compenser, au moins en partie, les variations du déficit d'alimentation des principaux secteurs irrigués en eau des barrages. Mais les données dont nous disposons à l'heure actuelle ne nous permettent pas de creuser ce point.

Malgré ces limitations, pour la plupart relatives au manque de documentation de la région d'étude, on peut constater qu'il y a une certaine cohérence temporelle entre les estimations et les dotations. Les valeurs maximales de la saison 2004-2005 sont observées à la fois pour les estimations et les dotations de l'ORMVAH. Ces fortes valeurs s'expliquent en partie par la forte demande évaporative et les faibles précipitations de cette saison. La même remarque s'applique au cas de l'année 2001-2002, avec des minima très nettement inférieurs aux autres valeurs, sauf dans le cas du NFIS où le minimum des valeurs estimées est observé en 2005-2006 en raison de fortes précipitations et d'une faible demande évaporative. Il y a une certaine corrélation entre les estimations et les dotations en eau des barrages (

Figure IV.31), en particulier dans le cas du secteur irrigué du Haouz central ($R^2 \sim 0.6$). Cette corrélation l'est moins pour les deux autres secteurs. L'interprétation de la figure IV.31 est difficile car les volumes d'irrigations comparés ne sont pas comparables, d'un côté une irrigation estimées tenant comptes des besoins en eaux des cultures et de l'autre côté l'eau pour l'irrigation provenant des barrages. La différence entre ces deux types de volumes n'est pas stable d'un secteur à l'autre et peut traduire une disparité au niveau des systèmes d'irrigation et les quantités distribuées.

On remarque que les dotations de l'ORMVAH en 2001-2002 sont les plus faibles pour les trois secteurs (80 mm au lieu de 200 mm pour le NFIS, 50 mm à 100 mm de moins dans le Haouz et 80 mm au lieu de 160 mm pour le Tessaout). Cette année est l'une des plus sèches durant la période d'étude. Le même comportement est observé pour les irrigations estimées sauf pour le NFIS où les faibles valeurs sont enregistrées en 2005-2006. Cette exception peut s'expliquer par les faibles valeurs de l'*ETO* (1400 au lieu de 1500 mm pour les autres années) et des fortes précipitations (275 mm contre 180 mm en moyenne sur les autres années).

Tableau IV.12: Les données climatiques régionales et l'occupation du sol ainsi que les irrigations et les évapotranspirations sur les trois grands secteurs de l'ORMVAH.

	Année	ET0 [mm/an]	P [mm/an]	ET [mm/an]	%Arbre	%Sol nu	%Culture annuelle	Irrigation ORMVAH [mm]	Irrigation MODELE [mm]	%Barrage
NFIS	2000-2001	1541.8	126.3	448.9	39.4%	51.8%	8.9%	104.9	369.6	28.39%
	2001-2002	1445.8	212.4	435.6	38.5%	55.2%	6.3%	86.3	305.1	28.27%
	2002-2003	1589.1	223.4	509.1	40.4%	51.0%	8.5%	141.8	367.1	38.64%
	2003-2004	1459.5	209.9	468.9	40.0%	50.7%	9.4%	213.4	330.7	64.52%
	2004-2005	1601.7	119.8	459.5	39.8%	54.4%	5.8%	296.8	377.3	78.68%
	2005-2006	1405.5	275.4	475.1	38.4%	50.0%	11.5%	258.4	280.3	92.19%
HAOUZ	2000-2001	1638.8	139.4	362.5	16.7%	44.6%	38.8%	115.9	282.9	40.96%
	2001-2002	1542.8	194.1	287.6	20.2%	72.2%	7.5%	47.0	183.5	25.59%
	2002-2003	1686.1	228.8	459.3	17.8%	43.4%	38.8%	124.1	331.5	37.43%
	2003-2004	1555.8	285.9	487.1	20.7%	33.7%	45.6%	164.9	298.7	55.19%
	2004-2005	1698.7	137.0	434.4	19.9%	40.4%	39.7%	200.6	345.6	58.05%
	2005-2006	1502.2	251.2	424.0	17.8%	35.8%	46.4%	157.4	248.4	63.36%
TESSAOUT	2000-2001	1657.7	147.3	520.3	28.9%	22.6%	48.5%	111.3	425.0	26.19%
	2001-2002	1561.7	163.7	432.3	31.3%	47.8%	20.9%	83.9	335.8	24.98%
	2002-2003	1705.1	296.8	656.4	26.6%	17.3%	56.1%	104.7	455.5	22.98%
	2003-2004	1574.1	317.5	643.8	38.0%	17.2%	44.8%	197.7	405.2	48.79%
	2004-2005	1717.7	147.9	624.2	36.5%	19.2%	44.3%	240.4	513.9	46.79%
	2005-2006	1521.8	270.1	569.8	34.7%	18.5%	46.8%	177.7	357.2	49.76%

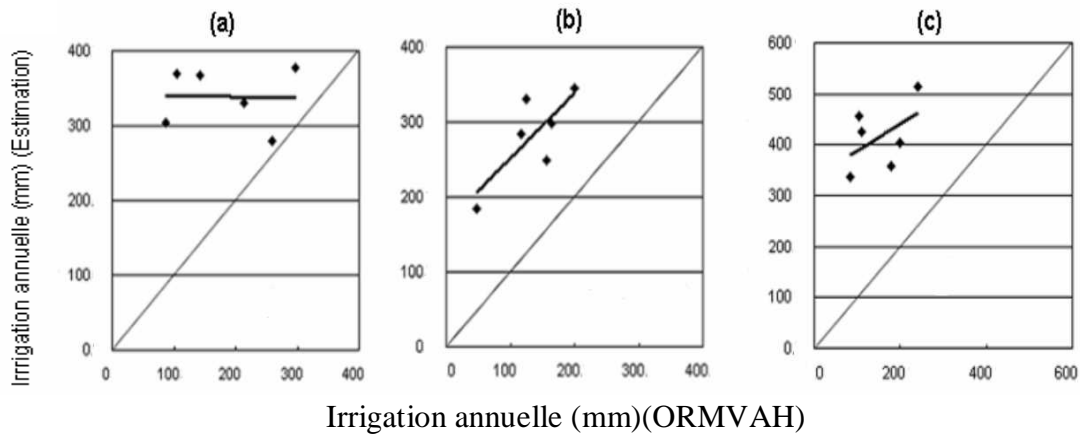


Figure IV.31 Irrigation annuelle estimée en fonction de celle observée pour les trois secteurs (a) NFIS, (b) Haouz central et (c) Tessaout Amont.

IV-4 CONCLUSION

Nous avons procédé à la spatialisation d'un modèle couplé végétation/bilan hydrique à l'aide de données de télédétection à haute et basse résolution spatiale. Au préalable, le module de dynamique de la végétation a été évalué sur un ensemble de parcelles de blé irrigué étudiées au cours des saisons agricoles 2002-2003 et 2003-2004. Ces parcelles ont été équipées de systèmes permettant la mesure des flux de masse et d'énergie à l'interface sol-plante-atmosphère, et suivies en termes de développement du couvert végétal et d'humidités des sols. Le modèle est capable de restituer l'évolution temporelle de l'indice foliaire de toutes les parcelles avec une erreur acceptable, de l'ordre de 0.25 sur les parcelles de calibration et 0.4 sur les parcelles de validation, soit généralement moins de 10 % de la valeur maximale de cette variable. La précision des simulations de l'évapotranspiration, quantifiée par le calcul de l'erreur quadratique moyenne, varie de 0.36 à 1.06 mm/j. Le modèle est capable de restituer l'évapotranspiration avec des biais inférieurs à 10% en valeurs saisonnières, chiffre comparable à la précision des mesures.

La spatialisation du modèle de bilan hydrique est effectuée en deux grandes étapes.

Dans une première étape, les observations satellite sont inversées et interpolées afin de décrire les variations spatiales et temporelles des principales variables du couvert végétal utiles au calcul des transferts hydriques sol-plante-atmosphère: indice foliaire vert et total, dont sont dérivés les coefficients de transpiration, le taux de couverture du sol par la végétation et les capacités d'interception de la pluie par le couvert végétal. Pour les cultures annuelles, l'interpolation de ces variables est réalisée par étalonnage d'un modèle de végétation. Pour les plantations arborées à feuillage pérenne, il est plus difficile de tirer parti de la télédétection car la dynamique de la canopée est moins prononcée et l'hétérogénéité inter-parcellaire plus élevée (âge et densité des arbres, présence ou non de végétation naturelle ou d'une culture basse entre les arbres). Deux approches ont été testées: l'une utilisant un seul coefficient d'évapotranspiration fixe, la

deuxième estimant le coefficient de transpiration et le taux de couverture du sol à partir du *NDVI*.

Dans une seconde étape, le modèle de bilan hydrique est appliqué en distinguant les trois ou quatre grandes classes d'occupation du sol précitées. Ce modèle fonctionne au pas de temps journalier, et simule l'évapotranspiration selon le formalisme développé par la FAO avec une description simplifiée du sol en trois horizons (superficiel, racinaire et profond). Il est forcé par des variables spatialisées, descriptives du couvert végétal (indice foliaire et taux de couverture), météorologiques (pluie et demande évaporative) et pédologiques (profondeur du sol et humidités au point de flétrissement et à la capacité au champ).

Deux tentatives de spatialisation du modèle ont été effectuées à différentes résolutions spatiales. Nous avons utilisé la série temporelle d'images FORMOSAT-2 pour établir un bilan hydrique à haute résolution spatiale pour la saison 2005-2006, ensuite nous avons généralisé l'étude sur les autres saisons agricoles de 2000 à 2006 en utilisant toute l'archive des données MODIS. Dans les deux cas, la difficulté réside dans la connaissance du mode de gestion des cultures, et en particulier de l'irrigation.

A haute résolution spatiale, plusieurs tentatives ont été testées pour simuler l'irrigation sur les 30000 segments de la plaine du Tensift identifiés sur la scène FORMOSAT-2. Le modèle couplé végétation/bilan hydrique a été spatialisé pour différents scénarii « moyen » de conduite des cultures. Ceux-ci ont été générés en faisant varier le stress hydrique toléré, valeur seuil relatif à l'état de stress hydrique des plantes utilisée pour déclencher les irrigations. Cette valeur permet de reproduire, grossièrement, la décision de l'exploitant pour l'irrigation de chaque parcelle (segment) étudiée. Le schéma de spatialisation a été évalué sur un secteur irrigué test (environ 3000 ha), majoritairement dédié à la céréaliculture, en utilisant la connaissance relative aux quantités d'eau des barrages (dotation de l'office agricole) et à la localisation des ouvrages (puits et forages) servant à pomper l'eau de la nappe phréatique. Sous des conditions stressées, les irrigations saisonnières ont été estimées avec une précision de l'ordre de 20% (RMSE d'environ 35 mm pour des irrigations moyennes d'environ 175 mm). La cohérence

temporelle entre l'irrigation simulée et « réellement » distribuée a été vérifiée. Les plus forts écarts entre estimations et dotations en eau des barrages ont été constatés dans les zones où les puits et les forages étaient en grand nombre. La méthode de spatialisation du bilan hydrique que nous avons développé ouvre des perspectives pour quantifier les volumes d'eau prélevés dans la nappe.

A basse résolution spatiale, deux approches de spatialisation ont été développées pour appréhender le bilan hydrique sur l'ensemble de la plaine du Tensift (environ 3000 km²). L'approche la plus simple consiste à calculer, au pas de temps annuel, l'irrigation comme un terme résiduel du bilan hydrique simplifié ($ET = P + I$). L'approche par modélisation est comparable à celle utilisée à haute résolution (simulation des irrigations en faisant l'hypothèse que les besoins en eau des cultures sont partiellement satisfaits). Ces deux approches ont été comparées par confrontation aux cartes d'irrigation établies à haute résolution spatiale et aux mesures d'évapotranspiration sur les parcelles d'expérimentation du projet SudMed. Les estimations à haute et basse résolution sont modérément corrélées, avec des R^2 légèrement inférieurs à 0.6 pour la première approche et à 0.7 pour la deuxième, et des erreurs supérieures dans le premier cas (20 % contre 15 % en RMSE relative). En première analyse, les performances de la première approche sont légèrement inférieures à celles de la deuxième. Les variations saisonnières de l'évapotranspiration sur les parcelles sont globalement bien reproduites avec des différences notables entre les deux approches de simulations. Ces différences sont enregistrées pour les parcelles de plantations arborées où l'on a constaté une surestimation significative de l'évapotranspiration par la deuxième approche (40 % contre 10 %). L'approche simplifiée a donc été retenue pour spatialiser le bilan hydrique sur la période 2000-2006 et sur l'ensemble de la plaine du Tensift, soit environ 40000 pixels MODIS dont l'occupation du sol était appréhendée par la méthode de désagrégation non supervisée (cf. chapitre III).

Les irrigations estimées sont cohérentes dans le temps et dans l'espace, et une partie des variations spatiale et temporelle de l'irrigation est expliquée par les principaux facteurs hydro-climatiques (demande évaporative, précipitations, occupation du sol). S'il n'a pas été possible de procéder à une validation complète de ces résultats, leur confrontation

aux volumes distribués par l'ORMVAH sur les principaux secteurs irrigués est néanmoins riche en enseignement. En premier lieu, on a constaté que les irrigations annuelles estimées sont toujours supérieures aux dotations de l'ORMVAH. Ceci apparaît logique, étant donné l'existence d'autres réseaux d'irrigation (pompages et séguias). D'autre part, les estimations ont souligné le caractère exceptionnellement sec de l'année 2001-2002 (restriction drastique de la dotation pour la céréaliculture). Plus généralement, l'analyse montre que le taux de satisfaction des besoins d'irrigation par l'eau des barrages est très variable d'une année sur l'autre et d'un secteur à l'autre (de 20 à 90 %). Les disparités observées témoignent probablement des modes de fonctionnement des secteurs par les différents systèmes d'irrigation (aménagements hydrauliques modernes, réseau traditionnel, et pompage), qu'il faut maintenant discuter avec les principaux gestionnaires de la ressource en eau (ORMVAH et ABHT).

Références

- 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**, pp.27–41.
- Allen, R.G., Smith, M., Raes, D., and Pereira, L.S. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage. Paper No56. FAO, Rome, Italy* 300 pp.
- Arora V.K., and Gajri, P.R. (1998). Evaluation of a crop growth-water balance model for analysing wheat responses to climate- and water-limited environments. *Field Crops Research*, **59**, pp.213-224.
- Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E.T., and Hatfield, J.L. (1984). Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*, **76**, pp. 300–306.
- Baret, F., Guyot, G., and Major, D.J. (1989). Crop biomass evaluation using radiometric measurements. *Photogrammetria*, **43**, pp. 241–256.
- Benhadj, I. (2004). Calibration spatialisée d'un modèle de bilan hydrique en région semi aride à partir d'images satellites optiques hautes résolutions. *Rapport de stage de fin d'études d'ingénieurs, Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg*, pp. 69.
- Brisson, N., B. Itier, J.-C. L'Hotel, J.-Y. Lorendeau (1998). Parameterisation of the Shuttleworth-Wallace model to estimate daily maximum transpiration for use in crop models. *Ecological Modelling*, **107**, pp. 159-169.
- Brisson, N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussière F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillère J.P., Hénault C., Maraux F., Seguin B., and H., S. (2003). An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, **18**, pp. 309-322.
- De Wit, C.T., Brouwer, R., and Penning de Vries, F.W.T. (1970). The simulation of photosynthetic systems. In: Setlik, I. (Ed.), Prediction and measurement of photosynthetic productivity. Proceeding IBP/PP Technical Meeting Trebon 1969. *Pudoc, Wageningen, The Netherlands*, pp. 47-50.
- Deardorf, J.W. (1978). Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *Journal of Geophysical Research*, **83C**.
- Devonec, E., and Barros, A.P. (2002). Exploring the transferability of a land-surface hydrology model. *Journal of Hydrology*, **265**, pp. 258-282.
- Duchemin, B., Hadria, R., Erraki, S., Boulet, G., Maisongrande, P., Chehbouni, A., Escadafal, R., Ezzahar, J., Hoedjes, J.C.B., Kharrou, M.H., Khabba, S., Mougenot, B., Olioso, A., Rodriguez, J.C., and Simonneaux, V. (2006). Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management*, **79**, pp. 1-27.
- Duchemin, B., Maisongrande, P., Boulet, G., and Benhadj, I. (2008). A simple algorithm for yield estimates: Evaluation for semi-arid irrigated winter wheat monitored with green leaf area index. *Environmental Modelling and Software*, **23**, pp. 876-892.
- Er-Raki, S., Chehbouni, A., Guemouria, N., Duchemin, B., Ezzahar, J., and 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**, pp. 41-54.
- Hadria, R. (2006). Adaptation et spatialisation du modèle STICS pour la gestion d'un périmètre c r alier irrigué en milieu semi-aride. Université Caddy Ayyad , Faculté des science Semlalia Marrakech, Maroc, pp 216.
- Hadria, R., Khabba, S., Lahrouni, A., Duchemin, B., Chehbouni, A., Carriou, J., and Ouzine, L. (2005). Calibration and validation of the STICS crop model fro managing wheat irrigation in the semi-arid marrakech/AI Haouz plain. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, **30,2C**.
- Kucera, J., Barbosa, P., and Strobl, P. (2007). Cumulative Sum charts –Anovel Technique for processing Daily Time Series of Modis Data Burnt Area Mapping in Portugal. In : *Multitemp 2007 (Belgique, leuven)*.
- Maas, S.J. (1993). Parametrized model of gramineous crop growth: I. Leaf area and dry mass simulation. *Agronomy Journal*, **85**, pp. 348-353.

- Meinke, H., Hammer, G.L., van Keulen, H., and Rabbinge, R. (1998). Improving wheat simulation capabilities in Australia from a cropping systems perspective III. The integrated wheat model (I_WHEAT). *European Journal of Agronomy*, **8**, pp. 101-116.
- Monteith, J.L. (1972). Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, **9**, pp. 747-766.
- Porter, J.R., and Gawith, M. (1999). Temperatures and the growth and development of wheat: a review. *European Journal of Agronomy*, **10**, pp. 23-36.
- Richardson, A.J., Wiegand C.L., Wanjura D.F., Dusek D. and Steiner J.L. (1992). Multisite analyses of spectral-biophysical data for sorghum. *Remote Sensing of Environment*, **41**, pp. 71-82.
- Taylor, W.A. (2000). Change-point analysis: a powerful new tool for detecting changes (<http://www.variation.com/cpa/tech/changepoint.html>).
- Varlet-Grancher, C., Bonhomme R., and Chartier M., A.P. (1982). Efficience de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal. *Acta Oecologia/Oecologia Plantarum*, **17**, pp. 3-26.
- Vrugt J.A., Gupta, H.V., W., B., and Sorooshian S. (2002). A Shuffled Complex Evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*, **39**.
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G.J., Jonckheere, I., and Coppin, P., (2004). Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination: Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology* **121**, pp. 37-53.
- Wosten, J.H.M. (1997). Pedotransfer functions to evaluate soil quality. *n: Soil quality for crop production and ecosystem health*. E.G. Gregorich and M.R. Carter, Elsevier eds, pp. 221-245.

Conclusion générale

Les ressources en eau dans les régions semi-arides subissent une pression croissante sous l'effet conjugué de la croissance des besoins (démographie galopante et extension des zones irriguées), et de la réduction des ressources (sécheresse passagère et/ou liée aux changements climatiques). C'est le cas du Maroc, où plus de 85 % des ressources mobilisées sont utilisées pour l'agriculture dans de nombreuses régions. Pour une gestion durable des ressources en eaux, des progrès doivent être accomplis pour lutter contre le gaspillage et mettre en place des observatoires régionaux des ressources en eaux. Ce travail de thèse s'inscrit dans ce contexte général d'une modélisation des flux d'eau à l'échelle régionale menée dans le cadre du programme de recherche franco-marocain SudMed (Chehbouni et al. 2008). Ce programme, coordonné par le CESBIO et l'UCAM, a été lancé en 2002 avec l'appui des organismes régionaux chargés de la gestion des ressources hydro-agricoles (ORMVAH et ABHT). La région d'étude principale de ce projet est la plaine semi-aride du Tensift autour de Marrakech, région où les enjeux relatifs à la gestion de la ressource hydrique sont particulièrement forts.

La problématique abordée au cours de cette étude est celle du contrôle des modèles agro-météorologiques par des données satellites issues de capteurs optique « grand champ » afin de décrire, dans l'espace (à la résolution kilométrique) et sur de longues périodes temporelles (la décennie), le fonctionnement hydrique d'agrosystèmes irrigués en plaine semi-aride. Dans ce contexte, notre contribution concerne plus particulièrement:

- 1) La caractérisation du climat régional, de ses variations spatiales, saisonnières et inter-annuelles;
- 2) La cartographie de l'occupation du sol à partir de données satellite à haute et basse résolution spatiale, en utilisant, pour ces dernières, des méthodes de désagrégation;
- 3) Le développement d'un schéma de spatialisation du bilan hydrique, qui tire parti au maximum des données de télédétection pour restituer la variabilité spatio-temporelle du fonctionnement des surfaces: besoin en eau, évapotranspiration (ET) et, surtout, irrigation.

Cette thèse est résolument tournée vers les applications, et nous avons utilisé les produits satellites opérationnels à l'heure actuelle, à savoir:

- d'une part, des séries d'images à la résolution décimétrique qui ne peuvent être disponibles, pour des raisons techniques (taille de la fauchée, contraintes de programmation) ou financières (coût des images et des traitements associés), que sur de petites régions et sur de courtes fenêtres temporelles; il s'agit ici des données Landsat, SPOT et FORMOSAT-2;
- d'autre part, des synthèses d'images d'indice de végétation dérivées des capteurs à large champ (VEGETATION et MODIS), gratuitement accessibles par Internet.

Climat

A l'échelle de la plaine de Tensift, Il est difficile de caractériser les variations spatiales et temporelles de certains paramètres climatiques tels que les précipitations et la demande climatique ET₀. Afin de mieux les appréhender, nous avons utilisé des méthodes géostatistiques d'interpolation dont le but est d'estimer ces variables sur une grille régulière à partir d'un réseau de mesures dispersées. En complément, nous avons fait appel à des données annexes issues des modèles de prévisions climatiques. Sur les six années étudiées (2000-2006), deux types de saisons ont été observées: des saisons sèches et « normales », avec, respectivement, des pluviométries annuelles de l'ordre de 150 mm/an et 250 mm/an. L'erreur globale sur l'estimation des précipitations varie entre 10 % et 26 % avec toutefois des erreurs locales importantes. Les variations inter-annuelles de la demande climatique ET₀ sont d'environ 7 % (1450 à 1650 mm/an) autour de la valeur moyenne (environ 1550 mm/an). Spatialement, on restitue par ailleurs un gradient positif du même ordre du nord-ouest ou sud-est de la région d'étude. Ce gradient est expliqué par l'influence atlantique sur le climat et la présence des montagnes du Haut-Atlas au sud et à l'est de la plaine du Tensift.

La qualité des estimations des paramètres climatiques pourrait être améliorée si l'on disposait d'un réseau de stations de mesures plus dense et de meilleure qualité. En alternative, le recours à des produits spatialisés dérivés des satellites météorologiques

pourrait être envisagé, même si leur résolution spatiale est encore à l'heure actuelle très faible. A titre d'exemple le capteur TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) offre des estimations journalières des précipitations à la résolution de 0.25 degré et disponibles gratuitement via le web. Il serait également utile de compléter l'étude concernant l'utilisation de prévisions climatiques issues des modèles météorologiques.

Occupation du sol

L'information dérivée de la télédétection à haute résolution spatiale est relative à l'occupation du sol et à la dynamique de la végétation. Le paysage est ainsi décrit par classes de fonctionnement qui sont identifiées à partir de séries temporelles d'images d'indice de végétation NDVI. Une classe de fonctionnement regroupe les pixels, les parcelles, ou parties de parcelles si celles-ci sont hétérogènes, pour lesquelles le couvert végétal est comparable en terme de phénologie et donc, en première approximation, de besoin en eau. Ces unités sont elles-mêmes regroupées en quatre grandes classes d'occupation du sol associées à des besoins en eau différents: zones non irriguées, cultures annuelles, luzerne et plantations arborées. La précision globale des classifications réalisées à partir de données à haute résolution spatiale est de l'ordre de 80 % pour les données Landsat/SPOT et de 90 % pour les données FROMOSAT-2.

Pour restituer l'occupation du sol dans la plaine du Tensift à partir d'images à basse résolution spatiale, nous avons mis en œuvre des méthodes de désagrégation linéaire de données. L'objectif de ces méthodes est de décrire les pixels – mixtes – en termes de pourcentages des trois classes dominantes : zones non irriguées, cultures annuelles et plantations arborées. Deux méthodes de désagrégation (supervisée et non supervisée) ont été testées sur la saison agricole la plus documentée (disponibilité de données SPOT et Landsat en 2002-2003). Ces méthodes ont été appliquées à des données réelles (VEGETATION et MODIS) et « simulées » (à partir de données à haute résolution spatiale). La confrontation des résultats de la désagrégation et des cartes d'occupation du sol établies à haute résolution spatiale montre que la précision globale des deux méthodes est comparable. Avec des données réelles à la résolution kilométrique, l'occupation du sol est reproduite avec des erreurs faibles, de l'ordre de 10 %, et des

biais inférieurs à 5 %. La comparaison aux résultats obtenus avec les données simulées a montré que la part d'erreur imputable aux imperfections des données réelles, en particulier au niveau géométrique (biais de géoréférencement et défauts de superposition), est importante (de 10 % à plus de 50 %, en fonction du type de données réelles utilisées et de la classe d'occupation du sol).

La méthode de désagrégation non supervisée, qui ne requiert aucune connaissance a priori, a permis de cartographier l'occupation du sol sur six saisons agricoles successives de 2000 à 2006. Cette étude pluriannuelle a permis d'une part de consolider les résultats, avec une erreur de l'ordre de 12 % par comparaison à l'occupation du sol établie en 2005-2006 avec les images FORMOSAT-2. D'autre part, elle a permis de confirmer la robustesse de la méthode, en constatant la stabilité interannuelle des classes d'occupation du sol, et en particulier des plantations arborées (fluctuations inférieures à 3 % en moyenne sur la plaine). Ce constat est conforté par la mise en évidence de corrélation entre l'occupation du sol et les facteurs hydro-climatiques, disponibilité d'eau d'irrigation et pluviométrie en particulier. Il serait également intéressant d'approfondir cette évaluation et de procéder à des comparaisons avec les produits globaux d'occupation du sol générés à partir de données à basse résolution spatiale (VEGETATION, MODIS ou MERIS). On peut citer ici GLC2000 (Bartholomé et al. 2002), GLOBCOVER (Bicheron et al. 2006) et GLCF (<http://www.landcover.org/>).

Avec le lancement récent ou prochain de nombreuses missions spatiales optique à haute résolution spatiale et temporelle - FORMOSAT-2 (NSPO), Pleïades (CNES) Rapid-Eye (DLR), Venùs (CNES/ISA), Sentinel-2 (ESA) -, il est légitime de se poser la question sur l'utilité d'utiliser encore les capteurs grand champ pour déduire l'occupation du sol. Cependant, il est clair que la disponibilité de ces données sur l'ensemble des surfaces continentales, à un coût raisonnable pour les organismes régionaux de gestion de la ressource, n'est pas assurée dans un avenir proche. D'autre part, les études synoptiques, entreprises à l'échelle nationale ou régionale (au sens d'une communauté de pays), et certaines applications spécifiques, par exemple dans le contexte de la modélisation climatique, devront s'appuyer sur les données acquises par les capteurs satellitaires à large champ (e.g Proba-V(ESA) qui assure la continuité du capteur VEGETATION

avec des améliorations au niveau de la résolution spatiale dans le visible et l'infrarouge),

Spatialisation du bilan hydrique

Nous avons procédé à la spatialisation d'un modèle couplé végétation/bilan hydrique à l'aide de données de télédétection à basse et haute résolution spatiale. Des modèles génériques reposant sur des formalismes relativement simples, peu gourmands en données d'entrée et paramètres, ont été utilisés dans un souci de faciliter leur application régionale. La spatialisation est réalisée en deux grandes étapes. Dans la première, les observations satellites ont été inversées pour déduire les variables clés du couvert végétal (indice foliaire et coefficient culturaux) ensuite ces dernières ont été interpolées dans le temps par étalonnage d'un modèle de dynamique de la végétation. La deuxième étape consiste à utiliser ces variables pour contrôler un modèle de calcul des transferts de bilan hydriques sol-plante-atmosphère reposant sur les formalismes développés par la FAO pour la conduite de l'irrigation (Allen et al. 1998). La principale difficulté de l'exercice de spatialisation est relative à la connaissance de l'irrigation, et c'est ce terme que nous avons finalement cherché à évaluer. Dans cet objectif, nous avons simulé les irrigations à différentes résolutions spatiales.

A haute résolution spatiale, le modèle couplé végétation/bilan hydrique a été spatialisé pour différents scénarii de stress hydrique relatif à la conduite des cultures en utilisant les données FORMOSAT-2. Un secteur irrigué test (environ 3000 ha), majoritairement dédié à la céréaliculture, a été utilisé pour l'évaluation du schéma de spatialisation. Les quantités d'irrigation estimées ont été comparées aux volumes d'eau de barrage réellement distribués par l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Haouz (ORMVAH), avec une précision globale de l'ordre de 20 %. On a toutefois constaté, localement, des désaccords importants entre les volumes estimés et distribués, désaccords qui ont pu être principalement attribués à l'utilisation des eaux souterraines pour l'irrigation (présence de forages).

A basse résolution spatiale, la spatialisation du bilan a été réalisée sur la partie orientale de la plaine du Tensift (environ 3000 km²) à partir des données MODIS en utilisant l'information sur l'occupation du sol déduite de la méthode de désagrégation non supervisée et des irrigations simulées sur la base des besoins en eau des cultures. Les résultats ont été évalués par: 1) comparaison aux mesures de l'évapotranspiration collectées sur les parcelles d'expérimentation du projet SudMed, 2) comparaison avec les cartes d'irrigation établies à haute résolution spatiale, 3) confrontation aux volumes d'eau des barrages distribués par l'ORMVAH sur les trois grands secteurs irrigués de la plaine, et 4) étude de la cohérence des variations dans le temps et dans l'espace des irrigations simulées. Le modèle est capable de restituer les variations saisonnières de l'évapotranspiration mesurée avec des erreurs d'estimation de 14 % sur des parcelles de blé et 12 % sur les parcelles de plantation arborées. Les cartes d'irrigation estimées à haute et basse résolution spatiale présentent les mêmes distributions spatiales ($R^2 \sim 0.6$). Enfin, les facteurs hydro-climatiques expliquent en partie les variations spatiale et temporelle de l'irrigation simulée. Les estimations sont relativement stables d'une année à l'autre, avec des fluctuations en phase avec la pluviométrie, la demande évaporative et l'occupation du sol. Ce n'est pas le cas pour les volumes distribués par l'ORMVAH, qui présentent deux niveaux différents : dotations faibles les trois premières années (2000-2003), en raison de la sécheresse qu'a connue la région de 1999 à 2001 ; dotations plus élevées (doublées) les trois années suivantes (2003-2006). Afin d'approfondir ces résultats, des discussions directes avec les principaux gestionnaires de la ressource en eau (ORMVAH et ABHT) doivent être organisées.

Que ce soit à l'échelle du secteur irrigué test (haute résolution spatiale) ou à celle des grands secteurs irrigués de la plaine du Tensift (basse résolution spatiale), les irrigations simulées sont toujours, en valeurs saisonnières, supérieures aux irrigations distribuées par l'ORMVAH. Les quantités excédentaires pourraient être attribuées à l'utilisation des autres réseaux d'irrigation (pompage, seguia). Cette étude ouvre ainsi des perspectives pour l'estimation des volumes d'eau transitant par ces réseaux, et en particulier ceux prélevés dans la nappe phréatique du Haouz. Il y a ici un enjeu fort, dans la mesure où une bonne partie des ouvrages de prélèvement (puits et forages) ne

sont pas encore répertoriés, et où leur fonctionnement reste pour une large part méconnu.

Une première perspective de ces travaux serait d'affiner les règles de décision relative au pilotage des irrigations. Cela implique une meilleure connaissance des calendriers et type d'irrigations appliquées, qui pourrait être apportée dans un premier temps par une catégorisation des exploitations. On observe en effet une grande différence entre les domaines royaux et les exploitations dédiées à l'exportation, très fortement consommatrices d'eau, et les fermes traditionnelles où l'accès à la ressource est plus limité. Les données satellites acquises dans d'autres longueurs d'ondes que le visible pourraient ici être également exploitées en complément, pour estimer des variables clés nécessaires au fonctionnement des modèles de bilan hydrique, et donc permettre de mieux cerner les pratiques relatives à l'irrigation. Les données infrarouge thermique (e.g. ASTER, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) peuvent être utilisées pour estimer l'évapotranspiration réelle, et donc préciser l'état hydrique des cultures. Les données radar (e.g. ASAR, Advanced Synthetic Aperture Radar) sont utiles pour caractériser, sous certaines conditions, l'humidité superficielle des sols. Ces informations devraient permettre une meilleure évaluation des scénarii de pilotage de l'irrigation. Plus généralement, la méthode d'estimation des irrigations que nous avons développée possède un caractère générique et opérationnel. On peut donc envisager de l'appliquer à d'autres régions semi-arides et avec d'autres types de données satellites, ou sur la plaine du Tensift sur des périodes plus longues (avec AVHRR, Advanced Very High Resolution Radiometer, par exemple). La mise en évidence d'éventuelles tendances comme l'augmentation des pompages pourraient contribuer à la mise en place d'un système de gestion durable de la ressource en eau.

ANNEXES

<i>Annexe 1: Réseau de stations pluviométriques en plaine du Haouz</i>	<i>286</i>
<i>Annexe 2: Unités pédologiques.....</i>	<i>287</i>
<i>Annexe 3: Variables statistiques utilisées</i>	<i>288</i>
<i>Annexe 4: Calcul du taux de couverture végétale et des coefficients cultureux</i>	<i>289</i>
<i>Annexe 5: Irrigation (estimée et observée) et occupation du sol par sous secteurs (NFIS, Haouz central et Tessaout Amont).....</i>	<i>291</i>

Annexe 1: Réseau de stations pluviométriques en plaine du Haouz.

Numéro	Station	Gestion
1	Abadla	ABHT
2	Barrage Lalla Takekroust	ABHT
3	Chichaoua	ABHT
4	Marrakech	ABHT
5	Sidi Rahal	ABHT
6	Agafay	SUDMED
7	Chichawa	SUDMED
8	Grawa	SUDMED
9	Sidi Rahal	SUDMED
10	Saada	SUDMED
11	Agdal	SUDMED
12	Marrakech	ORMVAH
13	Saada	ORMVAH
14	Tamesloht	ORMVAH
15	Oudaya	ORMVAH
16	Ras El Ain	ORMVAH
17	OD Hassoune	ORMVAH
18	Sidi Ghiyat	ORMVAH
19	Tamezguelft	ORMVAH
20	Attaouia	ORMVAH
21	Freita	ORMVAH
22	Sahrij	ORMVAH
23	Jamouaa	ORMVAH
24	Bouida	ORMVAH
25	OD Naceur	ORMVAH
26	Sidi Rahal	ORMVAH
27	Tamellalet	ORMVAH
28	Tahanouat	ORMVAH
29	Ourika	ORMVAH
30	Ait Ourir	ORMVAH
31	Ousnada	ORMVAH
32	Od Bougrine	ORMVAH
33	Dar Ouriki	DREF

Annexe 2: Unités pédologiques.

Profondeurs, humidités au point de flétrissement et à la capacité au champ par unité pédologique pour la plaine du Tensift.

Unité pédologique	Profondeur (cm)	θ_{fc} (m3/m3)	θ_{wp} (m3/m3)	Texture
1	80	0.39	0.28	argilo-limono-sableuse
2	60	0.51	0.38	argileuse
3	20	0.16	0.07	sableuse
4	150	0.33	0.22	argilo-limono-sableuse
5	130	0.29	0.19	limono-argilo-sableuse
6	150	0.38	0.26	argilo-limono-sableuse
7	120	0.29	0.19	limono-argilo-sableuse
8	120	0.25	0.15	sablo-argilo-limoneuse
9	110	0.33	0.22	argilo-limono-sableuse
10	80	0.33	0.22	argilo-limono-sableuse
11	80	0.51	0.38	argileuse
12	80	0.51	0.38	argileuse
13	90	0.33	0.22	limono-argilo-sableuse
14	110	0.2	0.11	sablo-argilo-limoneuse
15	140	0.25	0.15	limono-sablo-argileuse
16	80	0.29	0.19	limono-argilo-sableuse
17	110	0.23	0.13	limono-sablo-argileuse
18	30	0.25	0.15	limono-sablo-argileuse
19	110	0.33	0.22	argilo-sableuse lourde
20	150	0.33	0.22	argilo-limono-sableuse
21	120	0.29	0.19	limono-argilo-sableuse
22	60	0.25	0.15	limono-sablo-argileuse
23	30	0.25	0.15	limono-sablo-argileuse
24	100	0.16	0.07	sablo-limoneuse
25	20	0.25	0.15	sablo-argilo-limoneuse
26	130	0.29	0.19	limono-argilo-sableuse

Profondeurs, humidités au point de flétrissement et à la capacité au champ par unité pédologique pour le secteur irrigué R3.

Unité pédologique	Profondeur (cm)	θ_{fc} (m3/m3)	θ_{wp} (m3/m3)	Texture
1	10	0.1	0.01	sablo-limoneuse
2	50	0.24	0.1	limono-sablo-argileuse
3	150	0.27	0.12	limono-sablo-argileuse
4	150	0.28	0.14	limono-argilo-sableuse
5	150	0.27	0.12	sablo-argilo-limoneuse
6	150	0.32	0.19	argilo-limono-sableuse
7	200	0.32	0.19	argilo-limono-sableuse
8	200	0.3	0.16	limono-argilo-sableuse
9	200	0.31	0.17	argilo-limono-sableuse
10	200	0.32	0.19	argilo-limono-sableuse
11	200	0.34	0.22	argilo-limono-sableuse
12	200	0.33	0.21	argilo-limono-sableuse
13	200	0.34	0.22	argilo-limono-sableuse
14	100	0.09	0.01	sablo-limoneuse

Annexe 3: Variables statistiques utilisées.

On définit les termes suivants :

X_i : variable observée ;

\bar{X} : moyenne de la variable observée ;

Y_i : variable estimée ;

\bar{Y} : moyenne de la variable estimée ;

N : nombre d'échantillons.

<i>Variables statistiques</i>	<i>Expression</i>
Erreur quadratique moyenne : RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{N}}$
Erreur quadratique moyenne relative à la moyenne des observations : RRMSE1	$RMSE1 = \frac{RMSE}{\bar{X}}$
Erreur quadratique moyenne relative au maximum des observations : RRMSE2	$RMSE2 = \frac{RMSE}{\max(X_i)}$
Coefficient de corrélation	$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}) \times (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \times (Y_i - \bar{Y})^2}}$
Biais	$Biais = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)$

Annexe 4: Calcul du taux de couverture végétale et des coefficients culturaux.

Taux de couverture COV

Le taux de couverture végétale est en étroitement lié à l'évolution temporelle de *NDVI*. On suppose que *COV* est maximale (~100 %) pour des fortes valeurs de *NDVI* et faible pour les faibles valeurs de *NDVI*, La relation linéaire qui traduit cette corrélation est donnée :

$$COV(j) = COV_{\min} + \frac{NDVI(j) - NDVI_{\min}}{M - NDVI_{\min}} \times (100 - COV_{\min}) \quad (\text{Eq.1})$$

Ou :

$NDVI_{\min}$: valeur minimale de chaque profil de *NDVI*.

M : valeur constante pour tous les profils de *NDVI*. Elle représente le maximum des maximums des profils de *NDVI* parcelles d'arbres localisées sur l'image panchromatique FORMOSAT-2 (cf.III-1.1).

COV_{\min} : valeur minimale du taux de couverture et est calculée pour chaque profil de *NDVI*.

Dans la relation (Eq. 1), les termes M et COV_{\min} sont inconnus. Pour les calculer, nous avons localisé les parcelles d'arbres. Ensuite, le *NDVI* moyen ($NDVI_{\text{moy}}$) de ces parcelles est calculé à partir de la série temporelle d'images *NDVI* FORMOSAT-2.

Pour déterminer la valeur de M , les maximums des profils moyens $NDVI_{\text{moy}}$ sont calculés. Ensuite la valeur M est fixée à la valeur maximale de ces maximums (0.85). La couverture végétale COV_{\min} est corrélée avec le $NDVI_{\min}$. L'idée est de trouver une relation entre ces deux termes. Pour cela, on suppose que COV_{\min} peut varier entre 0 % et 70 %. Pour ces deux valeurs, on cherche à trouver les deux valeurs de $NDVI_{\min}$ correspondantes. Nous avons donc quantifié l'intervalle de variation du $NDVI_{\min}$. Ce dernier varie entre 0.11 et 0.45. De fait, l'équation de la droite de régression entre la couverture végétale minimale COV_{\min} et $NDVI_{\min}$ est :

$$COV_{\min} = 205.88 \times NDVI_{\min} - 22.64 \quad (\text{Eq.2})$$

Coefficient de cultures Kcb

Le calcul du Kcb se base sur le même principe que le calcul de COV :

$$Kcb(j) = Kcb_{\min} + \frac{NDVI(j) - NDVI_{\min}}{M - NDVI_{\min}} \times (1.25 - Kcb_{\min}) \quad (\text{Eq. 3})$$

Avec Kcb_{\min} la valeur minimale du coefficient, reliée à COV_{\min} .

Pour déduire la relation entre ces deux termes, nous avons combiné des données de différentes sources (figure 1):

- Mesures de terrain réalisées sur un site d'olivier et d'oranger au Maroc.(Er-Raki et al. 2007)
- Table de la FAO (Allen et al. 1998) des mesures de Kcb sur les oliviers et les citronniers ;
- Etude réalisée par Testi et al. (2004) sur de jeunes oliviers au Sud de l'Espagne.

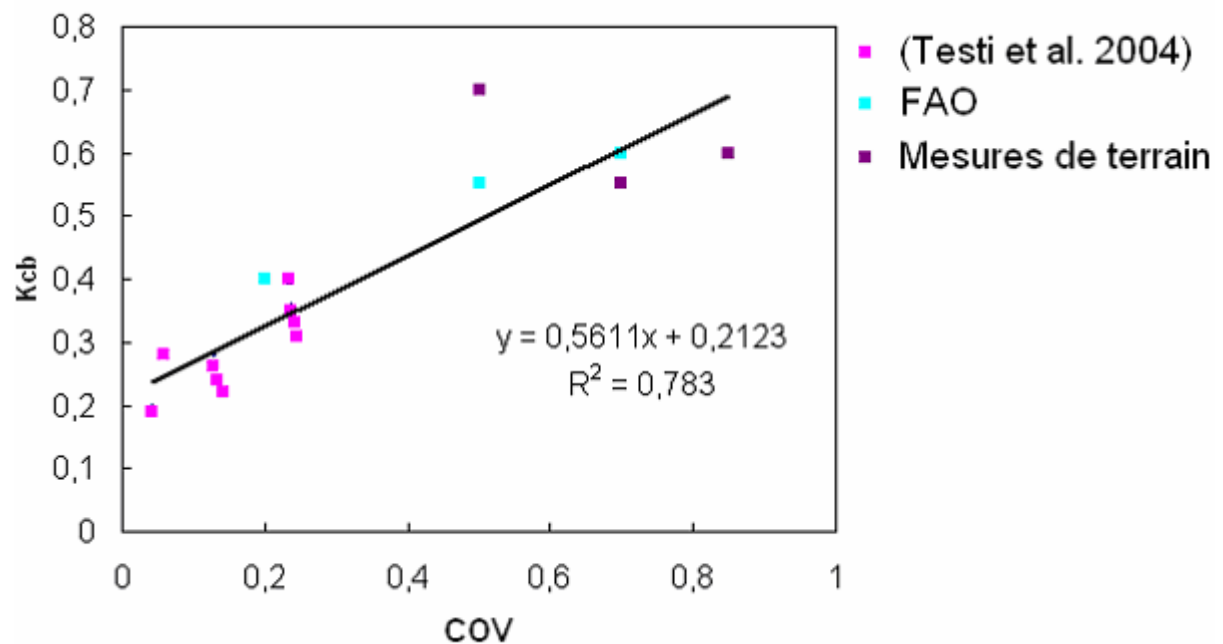


Figure IV.32: Relation entre le coefficient de culture Kcb_{\min} et le taux de couverture COV .

Annexe 5: Irrigation (estimée et observée) et occupation du sol par sous secteurs (NFIS, Haouz central et Tessaout Amont).

Sous secteurs du NFIS

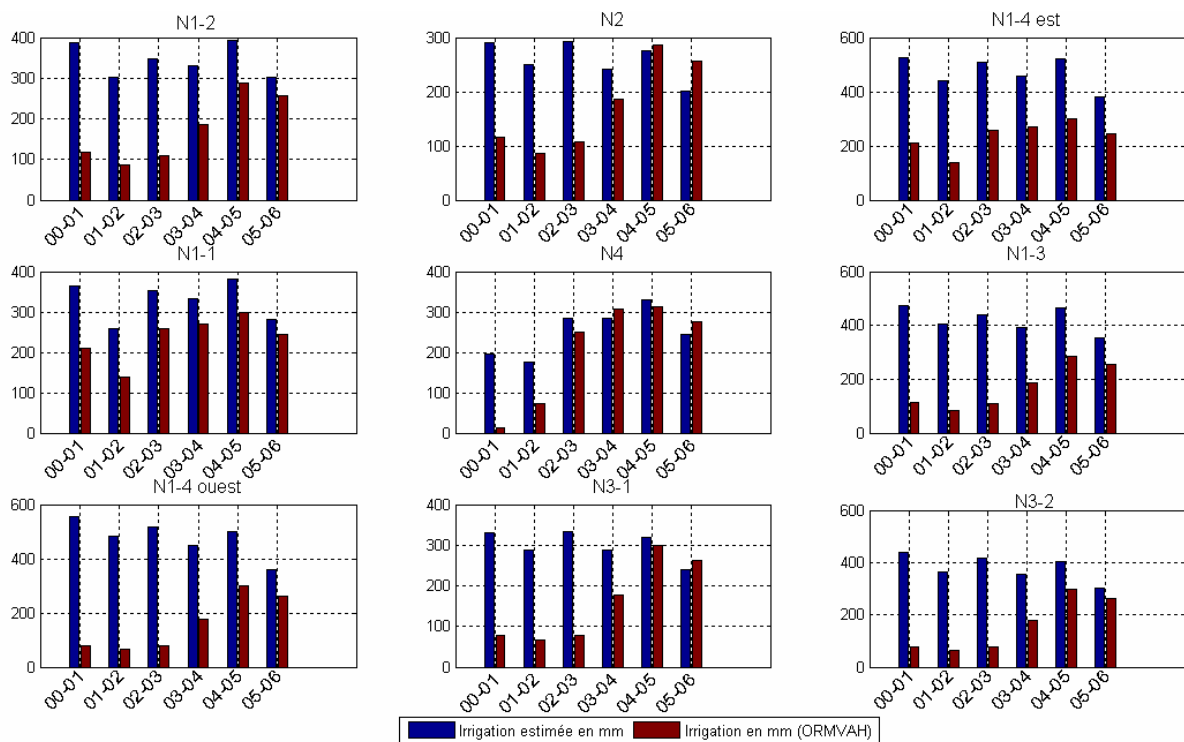


Figure IV.33 : Irrigations annuelles estimées et observées sur les sous secteurs du NFIS (période 2000-2006). Les cumuls sont calculés de septembre à Août

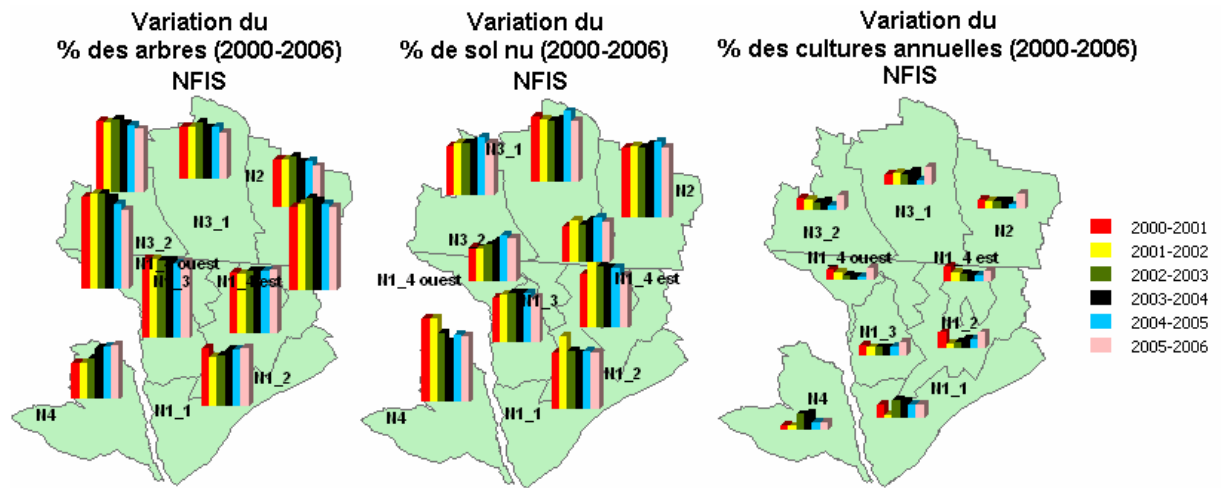


Figure IV.34: Occupation du sol dans les sous secteurs du NFIS (période 2000-2006).

Sous secteurs du Haouz central

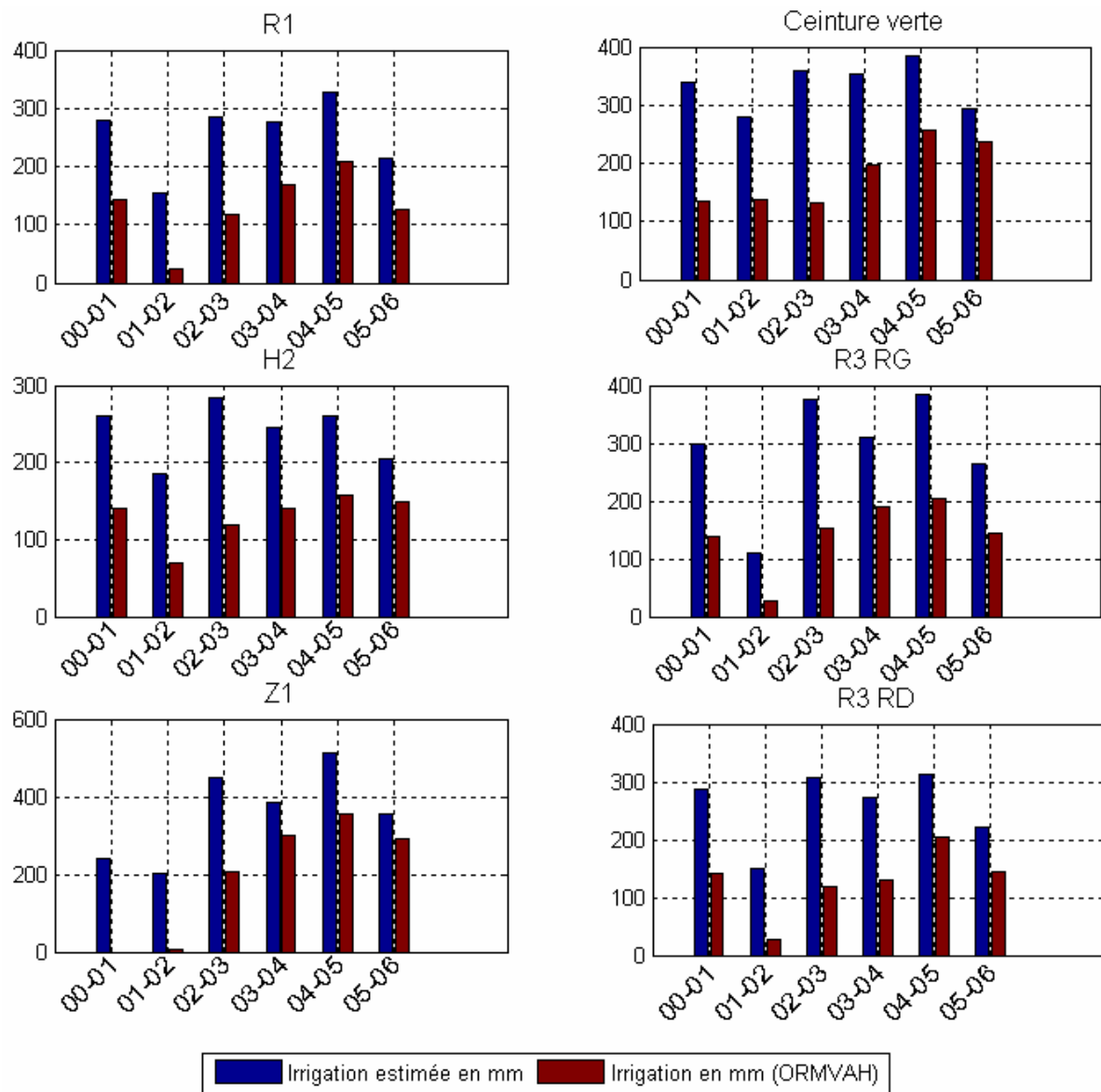


Figure IV.35: Irrigations annuelles estimées et observées sur les sous secteurs du Haouz central (période 2000-2006). Les cumuls sont calculés de septembre à Août

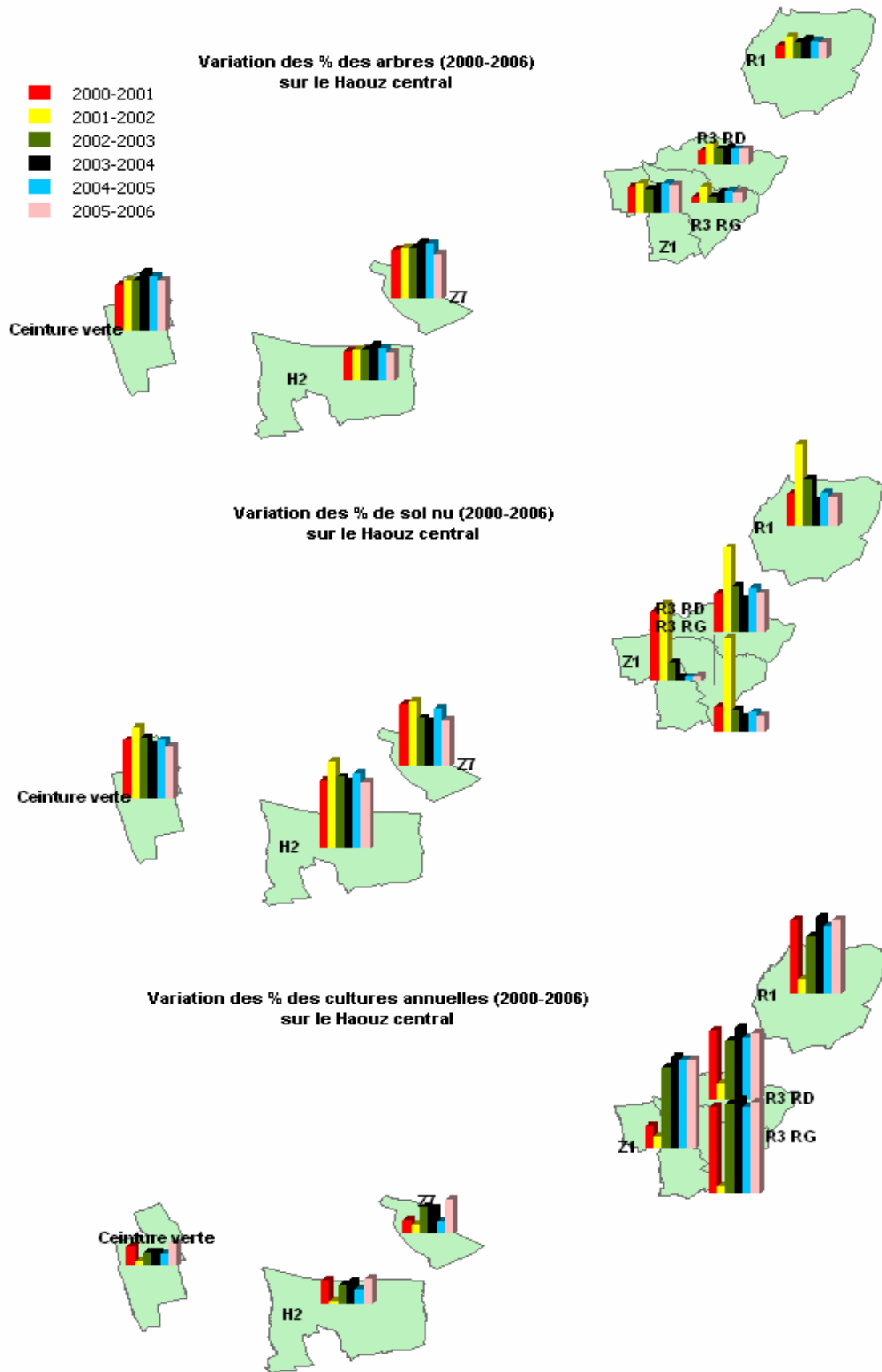


Figure IV.36: Occupation du sol dans les sous secteurs du Haouz (période 2000-2006).

Sous secteurs de la Tessaout Amont

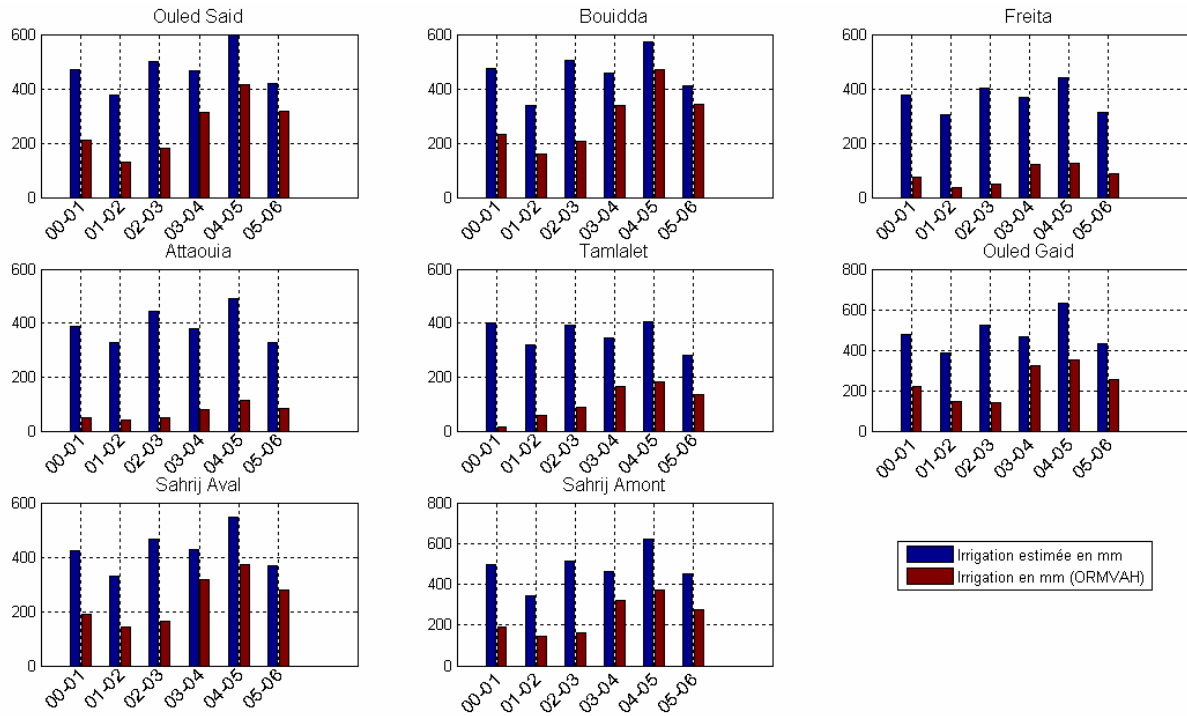


Figure IV.37: Irrigations annuelles estimées et observées sur les sous secteurs du Tessaout Amont (Période 2000-2006). Les cumuls sont calculés de septembre à Août

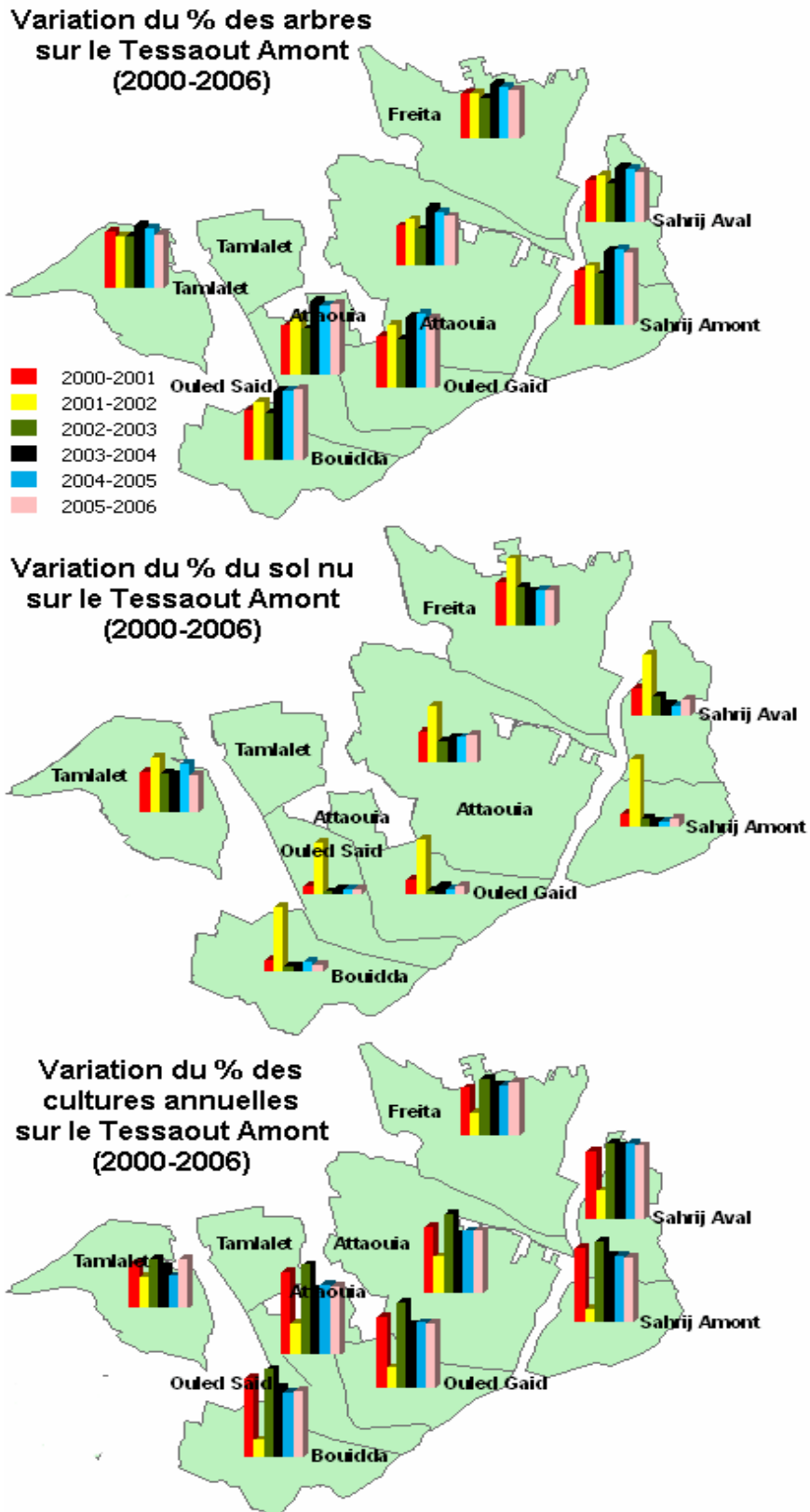


Figure IV.38: Occupation du sol dans les sous secteurs du Tessaout Amont (période 2000-2006).