



Apport des données de télédétection haute résolution et haute répétitivité dans la modélisation hydro-météorologique

Jordi Etchanchu

► To cite this version:

Jordi Etchanchu. Apport des données de télédétection haute résolution et haute répétitivité dans la modélisation hydro-météorologique. Hydrologie. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2019. Français. NNT : 2019TOU30205 . tel-02459812

HAL Id: tel-02459812

<https://theses.hal.science/tel-02459812>

Submitted on 29 Jan 2020

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 3 - Paul Sabatier

Présentée et soutenue par
Jordi ETCHANHU

Le 12 décembre 2019

**Apport des données de télédétection haute résolution et haute
répétitivité dans la modélisation hydro-météorologique**

Ecole doctorale : **SDU2E - Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de
l'Espace**

Spécialité : **Surfaces et interfaces continentales, Hydrologie**

Unité de recherche :
CESBIO - Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère

Thèse dirigée par
Gilles BOULET

Jury

Mme Florence HABETS, Rapporteur
M. Pere QUINTANA SEGUI, Rapporteur
M. Lionel JARLAN, Examineur
M. Clément ALBERGEL, Examineur
Mme Isabelle BRAUD, Examinatrice
M. Gilles BOULET, Directeur de thèse

*"Celui qui pourra résoudre les problèmes de l'eau méritera deux Prix Nobel :
un pour la paix et un pour la science. "*

John Fitzgerald Kennedy

Résumé

Les agrosystèmes sont soumis à de fortes hétérogénéités spatiales et temporelles, notamment du fait des pratiques agricoles. Les modèles de surface, qui servent à quantifier les échanges d'eau et d'énergie entre le sol, la végétation et la basse atmosphère, dits flux hydrométéorologiques, utilisent la plupart du temps des résolutions spatiales trop larges et une description des pratiques agricoles trop simple pour caractériser ces hétérogénéités, faute d'information spatialisée fiable et à fréquence temporelle suffisante pour paramétrer les simulations. Pourtant, réussir à simuler de manière plus réaliste les agrosystèmes à l'échelle du paysage, comme un bassin versant par exemple, est d'importance cruciale que ce soit pour gérer la répartition des ressources en eau ou évaluer les interactions entre pratiques agricoles et évolution climatique. La télédétection à haute résolution spatiale et temporelle, à l'image de la mission spatiale Sentinel-2 de l'ESA, permet de fournir des informations sur la surface terrestre à des résolutions inégalées (10 m, 5 jours) et sur l'ensemble du globe. Cette thèse visait donc à exploiter ce type de données dans un modèle de surface, le modèle SURFEX-ISBA développé par le CNRM, afin d'améliorer la représentation des pratiques agricoles et évaluer son impact sur les flux hydrométéorologiques à l'échelle du paysage.

Le premier volet de la thèse avait pour objectif de représenter l'hétérogénéité spatio-temporelle des cultures, du fait des choix des dates de semis et de récolte ainsi que des rotations de culture, dans le modèle. Pour ce faire, j'ai exploité les produits issus des données du satellite optique Formosat-2 (8m, acquisitions programmées), sous la forme de cartes d'occupation des sols et de cartes multi-temporelles d'indice de surface foliaire (LAI) afin de simuler un agrosystème du Sud-Ouest de la France sur une zone de 576 km². Afin de simuler de telles étendues en exploitant la haute résolution des produits satellite tout en limitant le temps de calcul, une approche de simulation par parcelle a été mise en place. La comparaison de l'usage des produits satellitaires à une paramétrisation climatologique issue de la base ECOCLIMAP-II sur deux stations de mesure de flux a mis en évidence une nette amélioration de l'estimation de l'évapotranspiration, variable clé pour la compréhension du fonctionnement thermo-hydrique des couverts végétaux, et notamment de sa temporalité, tout particulièrement sur les cultures d'été comme le maïs et le tournesol. La comparaison spatiale des deux simulations réalisées a également permis de montrer que cette conclusion était transposable à l'ensemble de l'agrosystème. Néanmoins, ces résultats montraient que la non-prise en compte d'une irrigation réaliste induisait de fortes erreurs sur le volume d'évapotranspiration durant les mois d'été.

Le second volet de la thèse a donc visé à proposer des méthodes pour représenter fidèlement l'irrigation de manière spatialisée. Pour ce faire, j'ai d'abord développé un schéma d'irrigation pour SURFEX-ISBA utilisant les principaux paramètres utilisés pour décrire l'irrigation dans les modèles de surface, notamment la période irrigable et l'humidité

du sol seuil pour le déclenchement de l'irrigation, en leur octroyant des possibilités de variation temporelle et spatiale. Afin de renseigner cette variabilité des pratiques d'irrigation, j'ai utilisé une approche combinant des valeurs basées sur l'expertise des pratiques faite par des agences comme la CACG et Arvalis, et des produits de télédétection optique (Landsat, SPOT, Formosat), permettant de spatialiser ces pratiques d'irrigation théoriques. En particulier, cela a consisté à utiliser le LAI des parcelles pour déterminer la période irrigable et adapter temporellement les règles de décision du déclenchement de l'irrigation sur chaque parcelle. La comparaison à des volumes d'irrigation observés sur une vingtaine de parcelles de maïs irrigué suivies par la CACG a montré que l'usage de cette méthode améliore le réalisme de l'irrigation simulée par rapport à l'usage de paramètres d'irrigation climatologiques mais restait tout aussi sensible à l'estimation de la réserve maximale d'eau accessible par la plante.

Enfin, le troisième volet s'est appliqué à utiliser ces méthodes, sur la base des données SPOT (10m, 5 jours), afin de comprendre l'impact de la prise en compte de pratiques agricoles plus réalistes sur les flux simulés de manière intégrée à l'échelle du paysage dans l'agrosystème semi-aride de la plaine de Kairouan, en Tunisie. La présence d'un scintillomètre à large ouverture dans la zone d'étude a permis de mettre en place une méthode novatrice de validation des simulations de surface de manière intégrée, moins incertaine que le recours à des simulations hydrologiques comparées aux débits de rivière. Une paramétrisation cohérente a été déterminée pour chacun des types de couvert majoritaires de la zone d'étude grâce aux stations de mesure de flux installées par le CESBIO et l'INAT. La comparaison des simulations, agrégées spatialement, aux mesures scintillométriques a permis de valider la paramétrisation ainsi déterminée et de montrer que la prise en compte de l'irrigation améliorerait le flux de chaleur sensible simulé à l'échelle de l'emprise du scintillomètre (quelques km²). Cependant, certains types de couverts, comme l'arboriculture, ont montré les limites de l'usage de la télédétection à cette résolution pour la caractérisation de leurs paramètres. Une comparaison à d'autres approches de modélisation, faisant l'estimation de l'évapotranspiration instantanée par la résolution du bilan d'énergie sur la base d'acquisitions satellitaires dans le domaine de l'infrarouge thermique, a également permis de mettre en lumière des pistes d'amélioration des simulations de surface spatialisées actuelles. Cela ouvre également la voie à un usage combiné de ces deux types d'approches, notamment par assimilation des produits d'évapotranspiration dans le modèle de surface, pour déterminer une répartition spatiale de l'évapotranspiration cohérente.

Ce travail de thèse démontre ainsi l'intérêt de la télédétection à haute résolution pour prendre en compte les pratiques agricoles dans l'estimation des flux de manière spatialisée à l'échelle du paysage, ouvrant ainsi la voie à une meilleure gestion de l'eau et une simulation des interactions avec le climat plus réalistes.

Abstract

Agricultural practices generate strong spatial and temporal heterogeneities of the vegetation in agrosystems. Land Surface Models (LSMs), which simulate water and energy fluxes between soil, vegetation and atmosphere, use coarse spatial resolutions and very simplified agricultural practices representations. Therefore, they cannot characterize such heterogeneities. However, simulating agrosystems in a realistic way is of great interest to manage water resources at landscape scale, like a river basin, or study the interactions between climate evolution and agriculture. High resolution remote sensing, like the ESA's Sentinel-2 space mission, allows monitoring the Earth surface globally with unprecedented spatio-temporal resolution of 10 meters and 5 days. This Ph. D. thesis aimed to exploit such data in the SURFEX-ISBA LSM, developed by the CNRM, to represent agricultural practices in the hydrometeorological fluxes estimation at landscape scale.

The first part of the thesis aimed at representing the spatial and temporal heterogeneities of the vegetation due to the choice of sowing and harvesting dates and crop rotations in the model. I used multi-temporal Leaf Area Index and annual land cover maps derived from the Formosat-2 remote sensing data (8m, tasking acquisitions). Simulations were performed on a 576 km² agricultural plain in southwestern France. In order to keep the interest of high resolution while saving computation time, a plot scale simulation approach was used. The use of remote sensing data and climatological parameters provided by the ECOCLIMAP-II database were then compared. The results on two flux stations showed an improvement of the simulated evapotranspiration, key variable of the hydro-thermal functioning of the plants, especially on summer crops. A spatial comparison showed that this conclusion is likely to be transposable to the entire study area. However, omitting the irrigation practices in the simulation caused great biases in the evapotranspiration estimation during summer months.

Therefore the second part of the thesis aimed at proposing methods to realistically simulate irrigation practices. A new irrigation scheme has been developed for SURFEX-ISBA, using classical parameters of LSMs irrigation schemes, like the irrigation season delimitation or the soil moisture threshold used to trigger irrigation events, but giving it spatial and temporal liberty degrees. To inform the variability of these irrigation practices, I proposed an approach combining expertise values acquired from the CACG and Arvalis and high resolution optical remote sensing (Landsat, SPOT, Formosat) which allow spatializing these practices. It mainly consisted in using the plots LAI to determine the irrigation season and adapt the temporality of the irrigation triggering decision rules. The comparison to measured irrigation volumes over around twenty maize plots monitored by the CACG showed that this method allows simulating a more realistic irrigation compared to the use of climatological irrigation parameters. However, the sensitivity to the estimation of the maximal available water content for the plant remains similar.

The third part of the thesis shows an application of the two previous methods with SPOT data (10m, 5 days) to understand the impact of more realistic agricultural practices on hydrometeorological fluxes simulated and spatially integrated at landscape scale. The simulations were performed on the semi-arid agricultural plain of Kairouan, in Tunisia. Scintillometric measurements acquired over the study area allowed using an original method to spatially validate land surface simulations without using a more uncertain hydrological coupling and comparing it to river discharge. An appropriate parameterization has been determined for each of the major land cover types thanks to flux stations installed by the CESBIO and the INAT. The comparison between spatially integrated simulations and scintillometric measurements allowed validating such parameterization and showed that taking irrigation into account improved the simulated sensible heat flux. However, some land cover types, like arboriculture, pointed out the limits of the remote sensing resolution to determine their parameters. A comparison to other modeling approaches, based on the solving of instantaneous energy budget to estimate evapotranspiration from thermal infrared remote sensing, was then performed. While it showed some potential improvements on the land surface model parameterization, it also pointed out ways of combining these two modeling approach to simulate a realistic evapotranspiration spatial distribution, especially by assimilating instantaneous evapotranspiration products from thermal infrared remote sensing in the land surface model.

In summary, this Ph. D. work demonstrate the interest of using high resolution remote sensing to take into account more realistic irrigation practices in the spatial estimation of the hydrometeorological fluxes at the landscape scale. It thus opens the path to better water resources management and simulation of the agriculture/climate interactions.

Remerciements

“Voilà, c’est fini” comme dirait un grand groupe de rock français, citation que j’utilise évidemment à leur insu.

En général, c’est dans cette section que les doctorants racontent à quel point leur thèse, bien qu’enrichissante, fut éprouvante mentalement. Les personnes qui m’ont côtoyé sauront pourtant que je n’avais pas l’air plus stressé que cela durant mon séjour au CESBIO. Je ne dirai pas que tout a été de tout repos, bien au contraire. La contrainte d’une durée de thèse de 3 ans, qui paraissent longs quand on démarre et tellement courts quand on approche de la fin, est là pour nous rappeler qu’il ne faut pas se relâcher. A ceci s’ajouteront tous les impondérables et les différentes échéances, qui amènent toujours leur lot de stress passager. Mais j’ai toujours pu aborder les différents obstacles avec sérénité. Et ce justement grâce à mon entourage qui m’a toujours soutenu. Les étudiants de master voient souvent la thèse comme étant un travail qu’ils vont devoir mener à bien de manière indépendante, avec à la clé la rédaction d’un pavé indigeste pour les néophytes. C’est une erreur de croire qu’il est possible d’atteindre un tel résultat sans avoir le soutien d’une myriade de personnes, que ce soit des collègues avec qui vous travaillez ou des amis et de la famille qui ne comprennent pas grand-chose à votre travail mais savent que vous réalisez quelque chose qui vous tient à cœur et qu’il serait bienvenue qu’ils vous aident à relâcher la pression de temps en temps. C’est donc en les remerciant chaudement que je conclus ces 3 années, qui m’auront permis d’acquérir des connaissances scientifiques certaines, mais surtout de rencontrer de nombreuses personnes toutes plus sympathiques les unes que les autres et qui auront, chacune à sa manière, apporté leur pierre à ce magnifique édifice que l’on nomme « thèse ».

Je commencerai d’abord par remercier Vincent Rivalland et Gilles Boulet, mes encadrants de thèse, d’avoir cru en moi et de m’avoir aiguillé dans la découverte de ce monde complexe qu’est la recherche scientifique. Vincent, je tenais à te remercier pour ton extrême disponibilité et ton aide de tous les instants. Tu étais toujours là pour m’aider à comprendre ce qui n’allait pas dans les codes ou dans la paramétrisation du modèle, et pour m’accompagner dans toutes les activités que doit mener un chercheur au jour le jour. Mais surtout, j’ai apprécié ta bonne humeur et ton optimisme de tous les instants. Ça m’a permis de comprendre que, bien que toujours perfectible, je pouvais être content de ce que je réalisais et continuer d’avancer. De plus, ton sacrifice afin de rendre le jury de soutenance valide doit être reconnu à sa juste valeur, et pour cela tu mérites une double ration de remerciements ! Quant à toi Gilles, tu as toujours su guider ce travail avec le recul nécessaire, ce qui a permis d’envisager l’ensemble des pistes possibles à explorer et quelles étaient celles qui étaient les plus intéressantes scientifiquement. Même si tu te qualifiais toi-même comme le « bad cop » du duo d’encadrant que vous formiez avec Vincent, je peux t’assurer que je ne l’ai pas vécu comme ça et que nos discussions m’ont vraiment beaucoup

appris et permis de cadrer bien plus facilement ce travail, qui sans ça aurait pu partir dans tous les sens. Vous avez à vous deux réalisé un encadrement très complémentaire et extrêmement efficace, et je ne vous remercierai jamais assez pour ça.

Je tenais à remercier bien sûr mon jury de thèse, Lionel Jarlan, Florence Habets, Pere Quintana-Segui, Isabelle Braud et Clément Albergel, d'avoir accepté d'évaluer mes travaux, ainsi que mon comité de suivi, Albert Olioso, Simon Gascoin, Valérie Demarrez et Patrick le Moigne pour avoir aidé à aiguiller ces recherches.

Parmi les collègues du CESBIO, je tenais tout d'abord à remercier Simon Gascoin. Tu es celui qui, avec Vincent, m'a donné ma chance au CESBIO, dans le cadre du projet REGARD. Ça a été le tremplin qui m'a permis d'élaborer ce sujet de thèse et de le défendre auprès de l'université. Et puis nos discussions sur la montagne, la neige et les glaciers ont été un bol d'air frais au milieu de toutes ces lignes de code. Je crois que tu as bien mérité cette flûte de champagne !

Comment parler des collègues du CESBIO sans citer les assidus du club de thé du bureau 105. Je tenais donc à remercier Taeken, Ahmad, Marie, Marvin, Ludovic, Laurent B., les deux Hervé, Pierre-Alain et Cristophe F. Avec une mention spéciale pour Taeken et Ludo pour nos débats scientifiques interminables mais tellement passionnants, et bien sûr à Marie, pourvoyeuse officielle de thés en tous genres. Ce club restera un des épisodes les plus marquants et agréables de cette thèse et je vous remercie grandement pour ça.

Bien sûr, mon travail étant à l'interface de bon nombre de données et disciplines, je tenais à remercier tous les gens avec qui j'ai collaboré directement et qui m'ont toujours aidé avec la plus grande gentillesse: Emilie D., Jean-François, Marjorie, Valérie D., Florian, Tiphaine, Aurore, Sameh, Wafa, Bernard, Sylvain F., Lionel, Oliver H., Olivier M., Vincent S., Eric C., Mireille, David, Jérôme C., Patrick, Michel et Safa. Je remercie également tous les membres des autres laboratoires avec qui j'ai pu collaborer : Stéphanie Faroux, Clément Albergel, Arsène Druel, Patrick Le Moigne, Aaron Boone et Jean-Christophe Calvet au CNRM, Albert Olioso à EMMAH, Jérôme Demarty et Aubin Allies à HSM, Ludovic Lhuissier à la CACG, ainsi que les différents membres du projet REGARD. Merci également aux deux directeurs successifs, Yann Kerr et Laurent Polidori, de m'avoir accepté dans ce sympathique laboratoire qu'est le CESBIO, ainsi qu'à toutes les équipes de support à la recherche, que ce soit le personnel administratif ou le service informatique en passant par la gestion des locaux. Merci donc à maman Laurence, Bernard, Eric B., Laura, Emilie B., Dominique, Delphine, Clément, Nathalie et Yann R.. Sans vous, rien n'avancerait dans ce laboratoire et on l'oublie trop souvent. Et également merci à tous les autres membres du CESBIO que je n'ai pas cité ici mais qui m'ont accueilli si chaleureusement et permis de m'intégrer facilement.

Je souhaite également remercier tout particulièrement ceux qui m'ont supporté en montagne, au ski ou à l'escalade, de manière ponctuelle ou plus assidument. J'étais ravi de

pouvoir partager ma passion avec vous. Merci donc à mon camarade de cordée Maciej, Laurent, Marvin, Simon N., Marie, Taeken, Vincent R. et Vincent T.

De manière plus personnelle, je tenais à remercier la bande des geeks de l'ENSE3 Mahana, Bénédicte, Titi, Olivier, Aline et Guillaume. Nos escapades régulières sont un évènement que j'attends toujours avec impatience et j'espère que ça durera encore longtemps. Je remercie également mes amis de longue date, Paul, Michael et Clément. Ça fait plaisir de voir que, malgré le temps qui passe, on arrive toujours à garder le contact. En tant que gamer, je tenais également à remercier mes camarades de la guilde Lunarix, garants de ma santé mentale tous les soirs depuis de nombreuses années déjà. Avec une mention toute particulière à Saya, il comprendra pourquoi !

Et comme on dit, « le meilleur pour la fin », je tiens à remercier ma famille, mon père Didier, qui m'aura transmis son goût pour les sciences de l'eau ainsi que le virus de la montagne, ma mère Dahlia, pour qui je n'aurai pas assez d'une vie pour la remercier de tout ce qu'elle a fait pour moi et ma sœur Marie, qui m'a toujours poussé à me dépasser et voir un peu plus loin que le bout de mon nez ! Vous m'avez toujours fait confiance, sans jamais contraindre mes choix d'orientation, mais en apportant sans cesse un soutien bienveillant dans tout ce que j'entreprenais. Si j'en suis là aujourd'hui, c'est grâce à vous.

Sommaire

RESUME.....	1
ABSTRACT	3
REMERCIEMENTS.....	5
SOMMAIRE	9
INTRODUCTION	16
1. Contexte	16
2. Fonctionnement thermo-hydrique des surfaces continentales.....	17
2.1. Bilan d'énergie	17
2.2. Bilan hydrique	19
3. La modélisation hydrométéorologique dans les agrosystèmes	21
3.1 Différents types de modèles	21
3.2 Stratégies de spatialisation.....	23
4. La télédétection pour la modélisation de surface	26
5. Problématique et plan de thèse	27
CHAPITRE 1. : PRISE EN COMPTE DE L'HETEROGENEITE SPATIALE ET TEMPORELLE DE LA VEGETATION DANS LA MODELISATION DE SURFACE	30
1. Introduction	30
1.1 Contexte et problématique.....	30
1.2 Usage d'indices de végétation et de cartes d'occupation des sols issus de la télédétection dans les modèles de surface : état de l'art.....	31
2. Présentation du modèle : SURFEX-ISBA	33
3. Zone d'étude	36
4. Démarche scientifique	38
5. Résultats publiés: Effects of high spatial and temporal resolution Earth observations on simulated hydrometeorological variables in a cropland (southwestern France)	39
5.1 Introduction	39
5.2 Model and data.....	41

5.2.1 SURFEX-ISBA model and forcing.....	41
5.2.2 Data	43
5.2.2.1 Formosat-2 leaf area index	43
5.2.2.2 Formosat-2 land cover maps.....	44
5.2.2.3 In situ measurements.....	45
5.3 Methods	46
5.3.1 Numerical experiments	46
5.3.2 Comparison methods.....	48
5.4 Results.....	48
5.4.1 Local comparisons with in situ measurements.....	48
5.4.2 Spatial comparisons with the Formosat-2 image.....	52
5.5 Discussion.....	56
5.5.1 Uncertainties with remote sensing data.....	56
5.5.2 Impact of remote sensing data on simulated evapotranspiration	57
5.5.3 Limitations and perspectives.....	58
5.6 Conclusion.....	59
6. Conclusion et analyses complémentaires	60
6.1 Conclusion : vers l'intégration de l'irrigation	60
6.2 Impact sur la modélisation hydrologique	62
CHAPITRE 2. : REPRESENTATION DES PRATIQUES D'IRRIGATION ET LEUR IMPACT SUR L'ESTIMATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION	66
1. Introduction	66
1.1 Contexte et problématique.....	66
1.3 Simulation automatique de l'irrigation dans les modèles hydrométéorologiques : état de l'art	67
2. Zone d'étude	69
3. Démarche scientifique	70
4. Résultats soumis: Estimating irrigation in a land surface model with high resolution satellite imagery: application over maize crops in South-Western France	71
4.1 Introduction	71

4.2 Model and data.....	74
4.2.1 SURFEX-ISBA model.....	74
4.2.1.1 Model overview.....	74
4.2.1.2 Irrigation scheme development	76
4.2.2 Datasets.....	77
4.2.2.1 Meteorological and land surface forcing data.....	77
4.2.2.2 Satellite Leaf Area Index	78
4.2.2.3 Lamasquère flux site	79
4.2.2.4 CACG irrigation data.....	80
4.3 Methods	81
4.3.1 Determination of the irrigation parameter	81
4.3.2 Numerical experiments	83
4.4 Results.....	85
4.4.1 Irrigation estimation on CACG plots	85
4.4.1.1 Annual volumes estimation.....	85
4.4.1.2 Maximal available water content sensibility	89
4.4.2 Impact on evapotranspiration: case of the Lamasquère site.....	91
4.4.2.1 Irrigation volumes estimation	91
4.4.2.2 Impact on evapotranspiration	93
4.5 Discussion.....	94
4.5.1 Estimation of the irrigation volumes and timing	94
4.5.2 Sensitivity to the maximal available water content estimation.....	95
4.5.3 Impact on evapotranspiration	96
4.5.4 Limitations and perspectives.....	97
4.6 Conclusion.....	101
5. Conclusion.....	102

CHAPITRE 3. : ESTIMATION SPATIALISEE DES FLUX HYDROMETEOROLOGIQUES EN CONTEXTE AGRICOLE SEMI-ARIDE IRRIGUE

104

1. Introduction	104
2. Zone d'étude	105

3. Données	108
3.1 Données satellite.....	108
3.1.1 SPOT-5	108
3.1.2 LANDSAT-8.....	109
3.1.3 Pléiades	111
3.2 Données météorologiques et propriétés des sols.....	112
3.3 Mesures in-situ	113
3.3.1 Tours d'eddy-corrélation	113
3.3.2 Scintillomètre à large ouverture XLAS	114
3.3.3 Observations d'irrigation à l'échelle du périmètre irrigué	115
4. Comparaison aux mesures scintillométriques	117
4.1 Méthodes	117
4.1.1 Mise en place des simulations SURFEX-ISBA spatialisées	117
4.1.2 Détermination des paramètres des différents couverts.....	119
4.1.3 Paramètres d'irrigation.....	121
4.1.4 Méthode de comparaison aux mesures scintillométriques.....	122
4.2 Résultats.....	123
4.3 Discussion.....	124
4.3.1 Impact de l'irrigation sur la simulation spatialisée du flux de chaleur sensible	124
4.3.2 Limitations et perspectives	127
5. Inter-comparaison de modèles	128
5.1 Présentation des modèles.....	128
5.1.1 EVASPA.....	128
5.1.2 SPARSE.....	130
5.2 Méthodes	132
5.2.1 Mise en place des simulations EVASPA et SPARSE.....	132
5.2.2 Méthode de comparaison aux données scintillométriques et aux simulations SURFEX.....	134
5.3 Résultats.....	135
5.3.1 Comparaison sur l'emprise du scintillomètre.....	135

5.3.2 Comparaison spatialisée sur l'ensemble de la zone d'étude	136
5.4 Discussion.....	138
5.4.1 Répartition spatiale des flux	138
5.4.2 Limitations et perspectives	141
6. Conclusion.....	143
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	146
1. Synthèse	146
2. Perspectives.....	148
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	154
LISTE DES ABREVIATIONS.....	172
LISTE DES ILLUSTRATIONS	176
1. Liste des figures	176
2. Liste des tableaux	178

Introduction

Introduction

1. Contexte

Les scénarios d'évolution climatique actuellement proposés par le GIEC ([IPCC 2014](#)) dénotent d'une forte tendance à l'augmentation des températures ainsi qu'à la diminution des précipitations sur l'ensemble du pourtour méditerranéen. Cette évolution climatique pose de nombreux problèmes sociétaux, notamment sur la gestion des ressources en eau, dont la disponibilité se ferait de plus en plus intermittente, et par extension sur la production agricole, qui représente, à l'échelle mondiale, le secteur le plus consommateur en eau douce avec 70% de la consommation totale ([WWAP 2014](#)). Néanmoins, les modèles climatiques actuels fonctionnent à des résolutions très larges, prenant ainsi mal en compte la variabilité spatiale et temporelle de la surface terrestre. Or, les problématiques de ressource en eau et de gestion agricoles sont traitées principalement à échelle régionale. Pour pouvoir préciser quantitativement les enjeux pour les différents acteurs du territoire, et ainsi leur permettre de développer des solutions appropriées, comme l'optimisation de la gestion des ressources en eau, le choix de cultures plus adaptées à la sécheresse, des méthodes d'irrigation plus économes ou encore le recours à des pratiques agricoles novatrices, il apparaît donc nécessaire de reproduire finement le fonctionnement de la surface dans ces régions. Cela permettrait également de mieux prendre en compte les spécificités de chaque région dans les prévisions météorologiques et climatiques.

Dans cet objectif, la télédétection spatiale, de par sa capacité à recueillir des informations spatialisées à grande échelle, s'avère un outil précieux. La multitude des domaines fréquentiels observés permet ainsi de suivre les évolutions de la végétation et de l'occupation des sols ou encore de capter sa dynamique thermo-hydrigue. Depuis le lancement du satellite Landsat-1 par la National Aeronautics and Space Administration (NASA) en juillet 1972, l'usage de la télédétection pour l'observation de la terre n'a cessé de se développer. Les instruments deviennent de plus en plus précis, atteignant des résolutions spatiales métriques, à l'instar des satellites Pléiades lancés par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), et des fréquences de revisite journalière, comme le Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Néanmoins, jusque récemment, l'augmentation de la résolution spatiale se faisait au détriment, soit de la zone couverte sur le globe, soit de la revisite temporelle. L'avènement de la mission Sentinel-2, qui couvre depuis mars 2017 l'ensemble du globe à une résolution de 10 mètres tous les 5 jours, permet d'apporter une solution à ces deux problèmes. Les séries temporelles que cette mission fournit permettent ainsi d'acquérir des informations de manière très régulière sur l'évolution de la surface terrestre avec une précision spatiale excellente. Elles pourraient ainsi permettre d'étudier plus finement les processus d'interaction entre le sol, les couverts végétaux et l'atmosphère à échelle régionale.

2. Fonctionnement thermo-hydrique des surfaces continentales

La surface terrestre joue un rôle majeur dans l'évolution des variables météorologiques puisqu'elle représente la condition limite basse de l'atmosphère. Les interactions entre la surface et atmosphère se font sous plusieurs formes : énergie, eau et composés biochimiques (carbone, azote, etc.). Les flux hydrométéorologiques sont ceux qui concernent l'eau et l'énergie. La répartition de ces différents flux dans les différentes composantes de la surface peut être décrite sous forme de bilans couplés entre eux.

2.1. Bilan d'énergie

Le bilan d'énergie décrit la répartition de l'énergie solaire reçu par les surfaces continentales. Il s'écrit, en l'absence de neige ou de glace, de la manière suivante :

$$R_n = H + LE + G + PS + \Delta S \quad [\text{Eq. 1.1}]$$

R_n représente le rayonnement solaire et tellurique net reçu par la surface en W.m^{-2} . Ce dernier est calculé à partir de l'énergie solaire et du rayonnement atmosphérique que reçoit la surface (Figure 1). Une partie de cette énergie est réfléchi directement par le sol ou le couvert. Le système sol-végétation se comportant également comme un corps noir, une partie de l'énergie reçue est également réémise sous forme de rayonnement infrarouge. Le rayonnement net est donc défini de la manière suivante :

$$R_n = R_G(1 - \alpha) + \varepsilon(R_A - \sigma_{SB}T_s^4) \quad [\text{Eq. 1.2}]$$

où R_G représente le rayonnement solaire global incident en W.m^{-2} , α l'albédo de la surface adimensionnel, ε son émissivité, adimensionnelle également, R_A le rayonnement infrarouge atmosphérique W.m^{-2} , σ_{SB} la constante de Stefan-Boltzmann en $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ et T_s la température de la surface en K.

H représente le flux de chaleur sensible, qui est le flux de chaleur transféré par la surface aux couches basses de l'atmosphère par conduction thermique. Il dépend ainsi de la différence de température entre la surface et la couche basse de l'atmosphère mais également de la vitesse du vent ainsi que du niveau de turbulence atmosphérique, de ce fait. Il est défini de la manière suivante :

$$H = \rho_a c_p C_H V_a (T_s - T_a) \quad [\text{Eq. 1.3}]$$

où ρ_a représente la masse volumique de l'air en kg.m^{-3} , c_p la capacité thermique de l'air en $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, V_a la vitesse du vent, T_a la température de l'atmosphère proche de la surface en K et C_H un coefficient de diffusivité thermique lié à la turbulence de l'atmosphère.

LE quant à lui représente le flux de chaleur latente utilisé pour la vaporisation et le transport de l'eau liquide contenue dans le sol ou les plantes, exprimée de la manière suivante:

$$LE = \frac{\rho_a c_p}{\gamma} C_{LE} (e_s - e_a) \quad [\text{Eq. 1.4}]$$

où γ est la constante psychométrique, égale à 66.1 Pa.K^{-1} , e_s la pression de vapeur au niveau de la surface en Pa, e_a la pression de vapeur de l'atmosphère proche de la surface, en Pa également, et C_{LE} un coefficient de diffusivité turbulente de la vapeur d'eau lié à la nature et la géométrie de la surface, ainsi qu'à la stabilité de l'atmosphère. C'est notamment cette variable qui permet le couplage entre les bilans d'énergie et d'eau.

G représente le flux de conduction dans le sol, exprimé en fonction de la différence de température entre la surface et un niveau de sol de référence :

$$G = h_s (T_s - T_g) \quad [\text{Eq. 1.5}]$$

où h_s est le coefficient de conduction du sol, dépendant de la capacité thermique de chaque couche de sol et de la profondeur du niveau de référence, et T_g la température du sol au niveau de référence en K.

Enfin, les termes PS, qui représente l'énergie consommée par l'activité photosynthétique, et ΔS , qui représente la variation de stockage de chaleur dans les couverts, sont le plus souvent négligeables devant R_n , excepté en cas de végétation très dense (Moore et Fisch, 1986), ce qui permet de simplifier [Eq. 1.1] de la manière suivante :

$$R_n - (H + LE + G) = 0 \quad [\text{Eq. 1.6}]$$

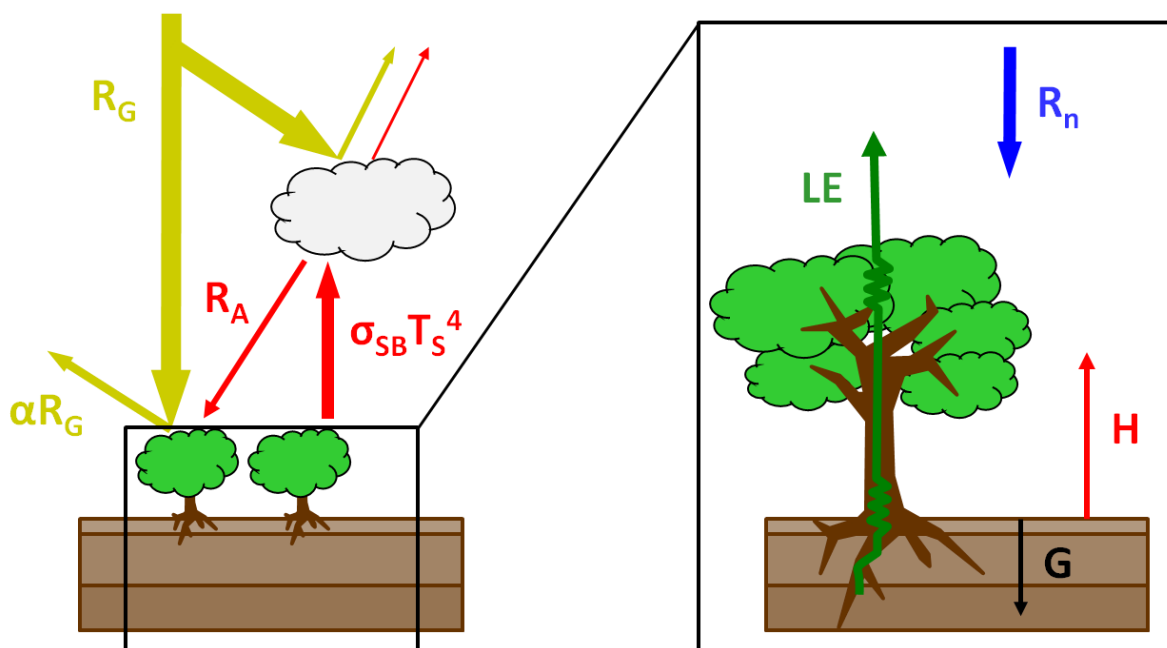


Figure 1 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.: Répartition de l'énergie solaire sur les surfaces continentales

2.2. Bilan hydrique

Le bilan en eau quant à lui traduit la façon dont l'eau de pluie se répartit au niveau de la surface (Figure 2). L'apport d'eau se fait par les précipitations. Dans le cas de précipitations liquides, l'eau va être directement drainée par la surface du sol, contribuant ainsi à augmenter son humidité. Si la surface du sol se trouve saturée en eau, un ruissellement est généré. Enfin, l'eau du sol va également être échangée avec l'atmosphère sous forme de vapeur, ce qu'on appelle l'évapotranspiration. Le bilan d'eau peut donc s'écrire, en l'absence de neige ou de glace, de la manière suivante :

$$P - ETR - R - D = \Delta SWC \quad [\text{Eq. 1.7}]$$

où P représente l'intensité des précipitations en mm.s^{-1} , ETR l'évapotranspiration, R le ruissellement, D le drainage et ΔSWC la variation de quantité d'eau stockée sous forme d'humidité dans le sol. Dans le cas des cultures, un flux additionnel lié à la présence d'irrigation peut être ajouté, donnant le bilan suivant :

$$P + Irr - ETR - R - D = \Delta SWC \quad [\text{Eq. 1.8}]$$

où Irr représente l'irrigation.

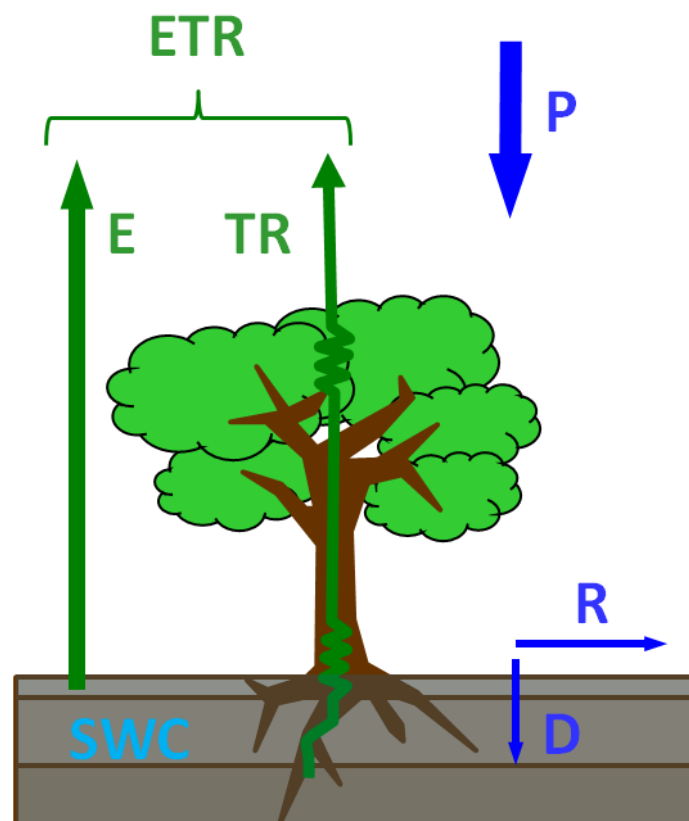


Figure 2: Répartition de l'énergie solaire sur les surfaces continentales

L'évapotranspiration (ETR) est liée au flux de chaleur latente LE de la manière suivante :

$$ETR = \frac{LE}{L_v \cdot \rho_e} \quad [\text{Eq. 1.9}]$$

où L_v est la chaleur latente de vaporisation de l'eau, valant environ 2500 kJ.kg^{-1} à 20°C , et ρ_e la masse volumique de l'eau en kg.m^{-3} . Elle se compose de deux parties distinctes : l'évaporation E et la transpiration TR. L'évaporation concerne le transfert direct de l'eau liquide contenu dans la couche supérieure du sol vers la basse atmosphère sous phase vapeur, sous l'action des différents flux d'énergie. La transpiration est quant à elle le processus lié à la quantité d'eau extraite par les racines et perdues par les stomates, dépendant donc non seulement de la demande atmosphérique en eau et de l'eau disponible dans le sol, mais également de processus physiologiques des plantes, comme la régulation stomatique, qui est l'aptitude d'une plante à retenir l'eau dans ses feuilles pour la production de biomasse.

Le drainage D représente la partie de l'eau qui quitte le sol de manière gravitaire. Le sol ayant une certaine capacité à retenir l'eau en fonction de sa porosité, la force de succion, diminuant lorsque son taux de remplissage augmente, le drainage vers les couches inférieures de sol ne peut survenir que lorsque l'humidité d'une couche donnée est supérieure à une valeur w_{fc} nommée capacité au champ. Au-delà de cette valeur, le débit de drainage peut être approximé simplement, en régime stationnaire, par la loi de Darcy (1856) :

$$D = K \cdot \frac{\Delta H}{z_g} \quad [\text{Eq. 1.10}]$$

où K est la conductivité hydraulique, en m.s^{-1} , dépendant de la porosité restant libre dans le milieu et de la viscosité du fluide, et ΔH la différence de charge hydraulique entre la surface et la profondeur z_g en m. Le drainage atteint donc sa valeur maximale lorsque la porosité du sol se retrouve complètement remplie d'eau, atteignant l'humidité w_{sat} dite de saturation. On parle alors de conductivité hydraulique à saturation du sol K_{sat} en m.s^{-1} . Le ruissellement R ne survient que lorsque la couche de sol la plus proche de la surface atteint la saturation. Si l'intensité des précipitations s'avère supérieure au débit de drainage à saturation, l'excédent alimentera le ruissellement, suivant le réseau hydrographique jusqu'à s'infiltrer dans une zone où la surface n'est pas saturée ou atteindre un cours d'eau ou un plan d'eau. Il est à noter que des phénomènes de diffusion verticale et latérale peuvent avoir lieu dans le sol, du fait de la différence de pression existant entre différentes parties du sol. Afin de décrire ces phénomènes de diffusion, on peut employer diverses formulations, comme par exemple les équations de Richards ([Richards, 1931](#)).

3. La modélisation hydrométéorologique dans les agrosystèmes

3.1 Différents types de modèles

La modélisation hydrométéorologique a pour vocation de simuler tout ou partie du fonctionnement thermo-hydrigue de la surface, présenté en [section 2](#). Dans les agrosystèmes en particulier, trois types de modèles sont couramment utilisés pour estimer les flux hydrométéorologiques sur les cultures :

- les modèles de bilan d'énergie
- les modèles de culture
- les modèles de surface

Les modèles de bilan d'énergie, à l'image de S-SEBI ([Roerink et al., 2000](#)) ou TSEB ([Norman et al., 1995](#)), ont vocation à simuler l'évapotranspiration, variable essentielle pour estimer la consommation en eau des cultures. Pour ce faire, ils utilisent en entrée les différentes composantes du rayonnement incident, ou forçage radiatif, différentes variables météorologiques nécessaires à l'estimation des conditions de turbulence ainsi que d'une estimation de la température de surface afin d'estimer les différents flux d'énergie, se dispensant ainsi de la représentation explicite des échanges hydriques dans le sol.

Les modèles de culture, tels STICS ([Brisson et al., 1998, 2002, 2003](#)) ou SAFYE ([Battude et al., 2017](#)) ont eux vocation à estimer la consommation en eau et les rendements des cultures. Ils calculent en général les variables du bilan d'eau sur la base d'une estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) modulée par un coefficient cultural K_{cb} , dépendant des paramètres physiologique de la plante, ainsi que d'un coefficient de stress K_s , représentant le stress hydrique (humidité des sols) et biochimique (azote, carbone, minéraux) des plantes. Le plus souvent, le calcul de cette évapotranspiration potentielle des cultures se base sur les recommandations de la Food and Agriculture Organization (FAO, [Allen et al., 1998](#)), reprenant la formulation de l'évapotranspiration potentielle de Penman-Monteith (Monteith, 1965). Ce type de modèle nécessite donc en entrée l'ensemble des variables météorologiques, ou forçage météorologique, ainsi que les propriétés hydriques des sols et de la végétation, se dispensant ainsi de la représentation du comportement thermique des couverts et du sol. De par leur objectif très spécifique aux cultures, ils intègrent une représentation relativement fine de la végétation et des processus associés, ainsi qu'une représentation des pratiques agricoles comme par exemple l'irrigation, la fertilisation des sols ou encore le labour entre autres. La plateforme MAELIA ([Therond et al., 2014](#)) va quant à elle encore plus loin en termes de complexité puisqu'elle utilise une

approche multi-agent pour simuler les interactions et décisions anthropiques entre un modèle de culture, un modèle hydrologique (SWAT, [Arnold et al., 1998](#)) et des facteurs socio-économiques (rendements des cultures et prix de vente, restrictions d'eau, etc.).

Enfin les modèles de surface, tels CLM ([Dai et al., 2003](#)), ORCHIDEE ([Krinner et al., 2005](#)) ou encore SiSPAT ([Braud et al., 1995](#)) simulent eux l'évolution des deux bilans de manière couplée. De ce fait, ils nécessitent un plus grand nombre de variables et paramètres d'entrée. Ils ont donc besoin, non seulement du forçage radiatif, mais également du forçage météorologique, ainsi que des propriétés thermiques et hydriques du sol et des couverts. Néanmoins, ces modèles permettent une représentation plus complète du fonctionnement thermo-hydrique des surfaces, sans toutefois simuler les échanges latéraux entre les mailles de calcul, et donc une estimation plus exhaustive des flux hydrométéorologiques de surface. Ils constituent ainsi une véritable charnière, permettant d'une part la détermination de la condition limite basse des modèles atmosphériques et climatiques, et d'autre part de restituer une estimation de la répartition des flux hydriques à la surface, servant ainsi les modélisations hydrologiques et hydrogéologiques. Dans le cadre de ma thèse, le besoin de simuler l'ensemble des variables hydrométéorologiques additionné à la perspective d'un couplage météorologique et hydrologique m'a poussé à choisir un modèle de surface.

Les modèles de surface ne sont pas tous pensés initialement pour fonctionner aux mêmes échelles spatiales, de par leurs objectifs respectifs. Certains modèles comme SeTHys ([Coudert et al., 2006](#)) ou encore SiSPAT, ont été pensés pour représenter de manière fine les processus de surface à l'échelle d'une parcelle et donc dans un contexte précis. Ces modèles calculent en général un bilan d'énergie multi-source, c'est-à-dire qu'ils considèrent un bilan d'énergie propre à chaque compartiment de la surface (i.e. la canopée et le sol), calculant une température de surface propre à chacun. La description de l'évolution de la végétation est également assez détaillée, avec un lien explicite entre la croissance de la végétation, l'activité photosynthétique et la respiration, et donc le cycle du carbone, ainsi qu'une description explicite du transfert radiatif au sein de la canopée, autrement dit la réflexion des différents rayonnements dans le couvert végétal. Les échanges d'eau dans le sol sont également décrits de manière détaillée, de par une discrétisation verticale fine et/ou la prise en compte de processus fins comme les échanges sous forme de vapeur. De par leur complexité et le nombre de paramètres qu'ils nécessitent, ces modèles sont assez difficiles à spatialiser. Au contraire, des modèles tels que NOAH ([Ek et al., 2003](#)), CLASS ([Verseghy, 1991](#)) ou encore JULES ([Best et al., 2011](#)) ont initialement pour vocation d'être couplés à des modèles de circulation générale ou des modèles météorologiques, et sont donc pensés pour fonctionner à des échelles allant du régional au global. Ces modèles utilisent en général une description plus simple des processus de surface. Ils simulent pour la majorité un bilan d'énergie à une ou deux sources pour l'ensemble du continuum sol-végétation-atmosphère et utilisent une description plus grossière des échanges dans le sol ou du fonctionnement de la canopée. Néanmoins, de par l'augmentation des capacités de calcul et les applications de plus en plus nombreuses à l'échelle du paysage (typiquement un bassin

versant ou un écosystème de quelques dizaines ou centaines de km²), ces modèles tendent actuellement à se complexifier et à intégrer des processus de plus en plus détaillés. Par exemple, et de manière non exhaustive, le modèle ISBA (Noilhan et Planton, 1989), utilisé dans cette thèse, s'est doté d'un module simulant l'activité photosynthétique (ISBA-A-Gs, Calvet et al., 1998) ainsi que de versions disposant d'une représentation plus fine des transferts d'eau et de chaleur dans le sol (ISBA-DIF, ISBA-MEB, Boone et al., 2016 ; Napoly et al., 2017). De la même manière, ORCHIDEE présente, entre autres, une version utilisant STICS pour simuler la végétation dans les agrosystème (ORCHIDEE-STICS, Noblet-Ducoudret et al., 2004) ou encore une description plus fine des processus de surface aux hautes latitudes, avec les problématiques de permafrost (ORCHIDEE_HIGHLATITUDE, Guimberteau et al., 2018). Ces développements, réalisés pour des thématiques de recherche, peuvent ensuite être intégrés de manière régulière dans la version standard de ces modèles. On assiste ainsi à un rapprochement progressif entre la complexité des approches locales et les modèles globaux.

3.2 Stratégies de spatialisation

Afin de simuler les flux hydrométéorologiques de manière spatialisée, il est nécessaire de choisir une méthode de discrétisation spatiale de la surface. Les modèles de surface étant, pour l'immense majorité d'entre eux, des modèles dits « multi-1D », à savoir qu'ils ne simulent pas d'échanges latéraux d'eau et d'énergie entre les mailles de calculs, ils n'ont pas nécessairement de contrainte quant au choix de la méthode de spatialisation. Cependant, leur architecture est bien souvent pensée pour favoriser certains types de discrétisation du paysage, souvent en lien avec les bases de données par défaut utilisées par ces modèles. Il existe trois grands types de discrétisation spatiale :

- **Par maille régulière hétérogène :**

L'idée est ici de prendre comme unité de calcul des mailles régulières. A l'intérieur de chaque maille, plusieurs types d'occupation des sols peuvent être présents (Fig. 3.a). Le modèle va ainsi simuler séparément chaque couvert puis calculer un flux résultant sur l'ensemble de la maille en faisant une moyenne des flux obtenus pondérée par la fraction de chaque couvert. Cette approche est souvent utilisée pour les simulations à échelle globale (Lawrence et al., 2007; Yang et al., 2011), qui sont contraintes d'utiliser des résolutions assez grossières pour des raisons de temps de calcul. C'est pourquoi les bases de données d'occupation des sols utilisées par défaut dans les modèles de surface pensés pour les grandes échelles, comme ECOCLIMAP (Masson et al., 2003), décrivent la surface terrestre de cette manière (Chap. I, Sect. 2). En général, les autres paramètres de surface, comme la texture des sols, sont considérés homogènes sur chaque maille.

- **Par maille régulière homogène :**

Cette approche est liée à une résolution de maille suffisamment fine, en général inférieure au kilomètre, permettant de satisfaire l'hypothèse d'une maille homogène, i.e. présentant un seul type de couvert (Fig. 3.b). Afin de pouvoir satisfaire au mieux cette hypothèse, il faut que la résolution de la maille utilisée soit suffisamment fine en général inférieure au kilomètre. Cette approche est la plus couramment utilisée dans des simulations à plus fine échelle (Courault et al., 2005; Simonneaux et al., 2009) où le temps de calcul à une telle résolution reste acceptable. Néanmoins, l'augmentation des moyens de calcul permet d'envisager des simulations à échelle continentale, sur des bases de données utilisant cette approche, à l'image d'ECOCLIMAP-SG (<https://opensource.umr-cnrm.fr/projects/ecoclimap-sg/wiki>) qui vise à décrire la surface de l'ensemble du globe à 300 m de résolution.

- **Par unité cartographique homogène :**

Cette méthode de discrétisation spatiale s'inspire de la philosophie des modèles semi-distribués en hydrologie (Lagacherie et al., 2010). Le principe est d'utiliser une maille de calcul non régulière qui utilise comme entité de calcul des unités géographiques considérées comme homogènes d'un point de vue de la surface (Duchemin et al., 2015). Cela peut se traduire par exemple par un découpage de la surface en parcelles de type de couvert homogène (Fig. 3.c). En pratique, cela revient souvent, par rapport à l'approche par maille régulière homogène, à regrouper ensemble des pixels connexes qui possèdent les mêmes propriétés de surface. Cette approche présente ainsi l'avantage de pouvoir simuler des entités homogènes dont les flux seront plus faciles à analyser que dans une approche par tuile tout en diminuant le temps de calcul par rapport à l'approche par maille régulière homogène. Particulièrement adaptée à des simulations à l'échelle du paysage, cette méthode reste malgré tout assez peu utilisée de par la complexité qu'elle impose pour mettre en place des couplages avec des modèles hydrologiques ou atmosphériques.

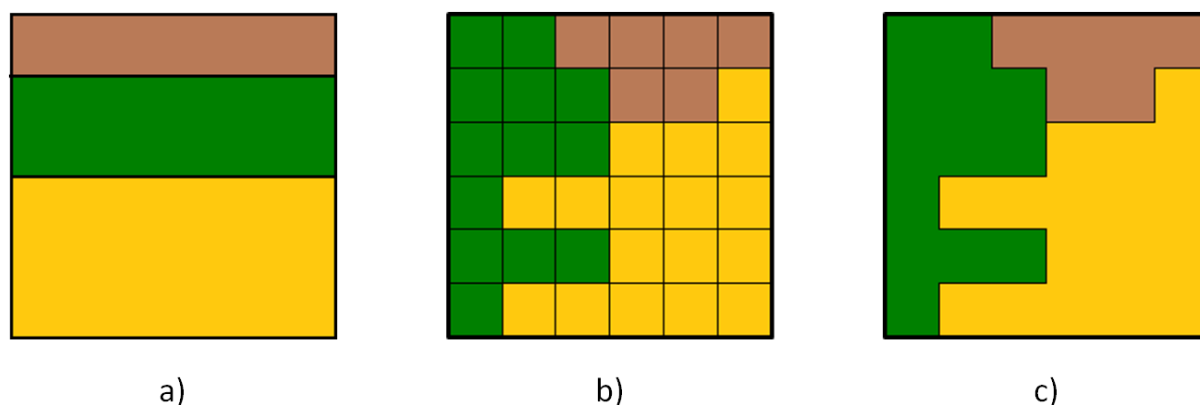


Figure 3: Schéma des méthodes de spatialisation par maille régulière hétérogène (a), par maille régulière homogène (b) ou par unité cartographique homogène (c) avec trois types de couverts différents.

Quelque soit l'approche utilisée, la difficulté pour mettre en place des simulations spatialisées pertinentes réside bien souvent dans le fait de déterminer des paramètres de surface appropriés en mettant en adéquation des sources de données à des résolutions souvent très différentes. Des méthodes d'agrégation ou de désagrégation, que ce soit des paramètres de couvert en entrée ou des flux en sortie de simulation doivent alors être utilisées. Ainsi, les bases de données climatologiques à grande échelle ([Wilson et Henderson, 1985](#) ; [Sellers et al., 1996](#) ; [Masson et al., 2003](#)), utilisées par défaut dans la plupart des modèles de surface, se basent avant tout sur des valeurs climatologiques mesurées ou déduites in-situ pour décrire des paramètres par typologie de couvert, comme l'albédo de la végétation ou la résistance stomatique minimale par exemple. De ce fait, même en simulant avec des entités homogènes, il est facile d'obtenir des paramètres réalistes pour chaque type de couvert en utilisant ces bases. Le problème devient plus prégnant lorsqu'il s'agit de paramètres qui ne peuvent être déterminés de manière unique pour un type de végétation à l'échelle du globe, notamment les indicateurs de la phénologie de la végétation, intrinsèquement liés aux conditions climatiques. En-effet, du fait de la résolution assez grossière (en général supérieure au kilomètre) de ces bases, et de leur faible fréquence de réactualisation, il existe une forte incertitude sur la répartition des types de couverts. Et cette incertitude peut avoir des répercussions fortes, que ce soit sur l'agrégation des flux dans la modélisation par maille hétérogène, sur les méthodes de désagrégation du type de couvert en entités homogènes (régulières ou non), ou encore sur la désagrégation de ces paramètres de couvert variables, souvent issus de données satellite à basse résolution ([Bahir et al., 2017](#)).

4. La télédétection pour la modélisation de surface

Comme présenté en [section 3](#), les modèles hydrométéorologiques ont besoin de connaître les propriétés thermo-hydriques des surfaces qu'ils simulent. Néanmoins, accéder à ces propriétés de manière spatialisée n'est pas envisageable par des mesures in-situ, irréalisables sur de grandes étendues spatiales. La télédétection spatiale constitue donc un candidat de choix pour aider à renseigner les surfaces dans les modèles. Les différents domaines spectraux d'observation permettent de renseigner sur les différents processus.

Ainsi, la détection dans le domaine optique (de longueur d'onde 400 à 900 nm) permet notamment de suivre l'évolution des couverts végétaux, notamment par le calcul d'indices de végétation tels le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI, [Kriegler et al., 1969](#)) ou l'indice de surface foliaire (Leaf Area Index, LAI, [Chen et Black, 1992](#)), ou encore la détermination de l'albédo. La dynamique des indices de végétation permet également de réaliser une classification des surfaces et ainsi produire des cartes d'occupation des sols ([Tucker et al., 1985](#)). Ces informations peuvent s'avérer précieuses dans les modèles ([Sellers et al., 1995](#)) pour déterminer la répartition des flux entre sol et couvert végétal, notamment la partition entre évaporation et transpiration, la quantité d'énergie réfléchie, ou encore déduire des informations sur la physiologie des plantes, notamment le processus de régulation stomatique ou encore l'activité photosynthétique. Le domaine infrarouge thermique quant à lui permet une estimation de la température de surface et de l'émissivité ([Wan et Dozier, 1996](#)), deux informations essentielles dans la détermination des flux de surface ([section 2.1](#)). Enfin, la télédétection dans le domaine des micro-ondes (de longueur d'onde 3mm à 30cm) permet entre autres un suivi de l'humidité de surface des sols ([Choudhury et Golus, 1988](#)), permettant ainsi de préciser les différents flux du bilan hydrique ([section 2.2](#)).

La prise en compte de la télédétection dans les modèles peut se faire de trois manières :

- **Le forçage direct**

Le forçage direct consiste à utiliser une variable issue ou déduite de la mesure satellitaire afin de déterminer de manière directe la variable correspondante en entrée ou calculée par le modèle à la date de passage du satellite. Cette méthode a déjà été utilisée à de nombreuses reprises dans la modélisation de surface, que ce soit par le forçage de la température de surface ([Seguin et al., 1994](#)), d'indices de végétation ([Leblon et al., 1991](#)) ou de l'albédo ([Li et al., 2009](#)).

- **L'étalonnage**

L'étalonnage consiste à modifier un ou plusieurs paramètres du modèle de manière à minimiser l'écart entre une ou plusieurs des variables simulées et celles issues de systèmes de mesure. Fait sur la base de données de télédétection, cette méthode permet d'obtenir des cartes de paramètres optimaux pour les modèles, et ainsi les adapter à l'ensemble de la zone à simuler. Elle a notamment été utilisée pour ré-estimer les paramètres hydrodynamiques du sol sur la base de données de température de surface (Coudert et al., 2006), d'humidité de surface (Demarty et al., 2005) ou encore d'indices de végétation (Dewaele et al., 2017). Elle est également utilisée pour déterminer des paramètres physiologiques dans les modèles qui simulent la phénologie des couverts (Battude et al., 2016).

- **L'assimilation**

L'assimilation consiste à recalculer certaines variables en cours de simulation à partir d'une pondération entre la valeur simulée et la valeur observée par télédétection aux dates de passage du satellite (Dorigo et al., 2007). L'assimilation trouve son principal intérêt dans la rectification de la trajectoire des simulations en prévision au fur et à mesure de l'obtention d'informations de systèmes de mesures, dont les observations satellitaires. Plusieurs travaux utilisent l'assimilation d'indice de végétation ou d'humidité de surface (Albergel et al., 2018) afin d'améliorer la représentation des flux hydrométéorologiques.

5. Problématique et plan de thèse

Les agrosystèmes représentent un défi de taille pour la modélisation hydrométéorologique. Les enjeux de gestion des ressources en eau et sécurité alimentaire y sont particulièrement prégnants. La dynamique de ces écosystèmes a également une influence sur la météorologie et le climat à échelle régionale (Roy et Avissar, 2002 ; Pielke et al., 2007). Cependant, ces derniers sont caractérisés par une forte hétérogénéité spatio-temporelle, essentiellement liée aux pratiques agricoles : rotation des cultures, choix des dates de semis et de récolte, irrigation, etc. Comme expliqué en section 3.2, ces hétérogénéités et ces pratiques agricoles sont difficilement représentables dans les modèles de surface du fait de la complexité d'acquérir des connaissances spatialisées à l'échelle d'un bassin versant ou d'un périmètre de gestion de l'irrigation. La télédétection optique, de par l'amélioration de la résolution spatiale et de la fréquence de revisite des instruments, à l'image de Sentinel-2, permet un suivi plus fin et plus régulier des surfaces. L'objectif de ma thèse est donc de démontrer et quantifier l'apport que peut avoir ce type de données pour représenter les pratiques agricoles et ainsi améliorer la modélisation de surface dans les agrosystèmes.

La thèse se décompose en 3 chapitres :

- **Le chapitre 1** traite de la prise en compte de la variabilité spatiale et temporelle de la végétation dans la modélisation de surface des agrosystèmes. Ce chapitre met en avant le potentiel de la télédétection optique à haute résolution pour capturer la phénologie des cultures et ainsi intégrer l'influence de pratiques agricoles telles que le choix des variétés ou la rotation des cultures dans l'estimation des flux hydrométéorologiques.
- **Le chapitre 2** présente une méthode d'utilisation de la télédétection pour estimer l'irrigation. Il s'agit ici de pointer le potentiel de la télédétection pour spatialiser des pratiques d'irrigation théoriques et ainsi estimer une répartition spatio-temporelle des volumes irrigués.
- **Le chapitre 3** étudie l'impact des méthodes précédentes sur la représentation spatiale des flux hydrométéorologiques à l'échelle du paysage via la comparaison à des mesures spatialisées et à d'autres approches de modélisation, notamment avec des modèles de bilan d'énergie.

Chapitre 1

Chapitre 1. : Prise en compte de l'hétérogénéité spatiale et temporelle de la végétation dans la modélisation de surface

1. Introduction

1.1 Contexte et problématique

Le projet RTRA-STAE REGARD ([Martin et al., 2016](#)), terminé en 2017, avait pour ambition d'étudier et d'intégrer l'impact anthropique sur la modélisation des ressources en eau dans le bassin versant de la Garonne, en France, qui est majoritairement un bassin agricole. Le projet visait à développer une base de données commune à plusieurs laboratoires du bassin toulousain, que ce soit des mesures in-situ, résultats d'enquêtes ou des sorties de simulation, qui permettrait à terme le couplage entre plusieurs plateformes de modélisation simulant les différents compartiments de l'hydrologie : SAFRAN-ISBA-MODCOU ([Habets et al., 1999a, 1999b](#)) pour ce qui est de la modélisation de surface et ses couplages météorologiques et hydrologiques, SWAT ([Arnold et al., 1998](#)) qui permet un routage hydrologique mais également hydrogéologique, et MAELIA ([Therond et al., 2014](#)), qui est un modèle multi-agents qui simulent les interactions entre socio-économie et fonctionnement des milieux agricoles. Le projet s'articulait en 4 volets : évaluer l'apport de la télédétection pour la modélisation hydrologique, simuler les activités humaines, modéliser les échanges entre nappe et rivière, et enfin réaliser une modélisation hydrologique intégrée sur l'ensemble du bassin de la Garonne. Le CESBIO s'est montré très présent sur le premier volet du projet, profitant du nombre abondant de données recueillies et structurées en base de données dans le cadre de l'Observatoire Spatial Régional (OSR). De nombreuses données de mesure in-situ ainsi que des produits satellite (modèles numériques de terrain cartes d'occupation des sols, indices de végétation, etc.) issus de différents capteurs (SPOT, LANDSAT, Formosat-2) sont ainsi disponibles sur le Sud-Ouest de la France, ce qui a permis la mise en place relativement rapide des simulations. Le premier axe de ma thèse s'inscrit donc dans la continuité de ce premier volet du projet REGARD. L'objectif était ici de comprendre comment la télédétection pouvait aider à la représentation des pratiques agricoles dans les modèles de surface et ainsi d'en évaluer l'impact hydrométéorologique.

En-effet, les modèles de surface, à l'instar du modèle SURFEX-ISBA utilisé dans cette thèse, utilisent en général des bases de données climatiques pour décrire les surfaces continentales. Il n'y a donc aucune variabilité interannuelle de la phénologie ou de

l'occupation des sols. Elles ne peuvent donc pas représenter certaines pratiques culturelles essentielles, comme le choix des dates de semis et de récolte, ou encore les rotations des cultures. De plus, elles décrivent la surface à des résolutions kilométriques ou supérieures, résolution qui englobe potentiellement plusieurs parcelles avec des phénologies très différentes dans un même pixel. Cela pose problème quand il s'agit d'estimer les besoins en eau des cultures de manière spatialisée et donc de gérer la ressource dans les bassins versants agricoles, notamment les bassins irrigués comme le bassin de la Garonne. Pour répondre à cette problématique, la télédétection doit apporter des informations relatives à la phénologie et à l'occupation des sols au modèle. J'ai donc opté pour l'utilisation de données acquises dans le domaine optique. En-effet, les indices de végétation, tel l'indice de surface foliaire (LAI), que l'on peut déduire des réflectances dans le domaine visible et proche-infrarouge, permettent de suivre l'évolution de la végétation et ainsi de renseigner la période exacte de culture. Le CESBIO développe également des cartes annuelles d'occupation des sols à haute résolution sur la base d'algorithmes de classification supervisés, tels la chaîne IOTA2 (Inglada et al., 2015). Le principe est ici d'utiliser les cycles de végétations de parcelles dont le type de couvert est connu, ce qu'on appelle l'échantillon d'apprentissage, afin de classer l'ensemble des pixels du domaine en fonction de la ressemblance entre leurs cycles. L'usage combiné de ces deux types de produits devrait donc permettre de renseigner le modèle sur les pratiques modifiant les cycles de végétation en milieu agricole.

1.2 Usage d'indices de végétation et de cartes d'occupation des sols issus de la télédétection dans les modèles de surface : état de l'art

Le LAI est défini comme étant la moitié de la surface totale des feuilles d'une plante, soit la partie active photosynthétiquement, par unité de surface de sol (Chen et Black, 1992). C'est le plus souvent la variable utilisée pour déterminer la surface servant à l'évapotranspiration des plantes dans les modèles de surface (Ducoudré et al., 1993; Liang et al., 1994; Oleson et al., 2008; Best et al., 2011). Comme dit précédemment, les modèles de surface, quand ils ne simulent pas eux même le LAI via un module de végétation, utilisent des climatologies décrivant une phénologie type (Verseghy et al., 1993; Maurer et al., 2002). Plusieurs études ont déjà montré qu'utiliser un LAI satellite pour prendre en compte sa variabilité interannuelle améliorerait l'estimation de l'évapotranspiration (Van den Hurk et al., 2003; Jarlan et al., 2008). Ford et Quiring (2012) ont également montré l'impact notable que cela avait sur l'estimation dynamique de l'humidité du sol, conséquence d'une meilleure simulation de l'évapotranspiration. Cependant, ces études utilisent des LAI issus de données de télédétection à résolution moyenne, comme AVHRR (Van den Hurk et al., 2003) ou MODIS (Tang et al., 2012; Ford and Quiring, 2013).

Or, dans le Sud-Ouest de la France, comme dans de nombreuses régions agricoles, un pixel MODIS (500m de résolution) englobe bien souvent plusieurs parcelles, qui peuvent avoir des phénologies très différentes, comme les cultures d'été et d'hiver qui ont des phénologies pour l'essentiel disjointes temporellement. Outre le fait que l'hétérogénéité spatiale sera mal représentée, le fait de moyenner ces deux types de phénologie contribue à calculer un LAI dont la dynamique saisonnière peut se trouver grandement atténuée, et de ce fait difficile à désagréger par type de couvert ([Faroux et al., 2013](#)). Et les incertitudes liées à la répartition des types de couvert, présentes dans les bases de données climatologiques, peuvent ici impliquer de fortes erreurs, que ce soit sur l'estimation du LAI de chaque type de végétation ou sur les flux résultants ([Introduction sect. 3.2](#)), rendant plus incertaine encore l'estimation de flux désagrégés spatialement sur la base de simulations à basse résolution ([Franks et Beven, 1997](#)). Ainsi, l'usage de données à haute résolution, à l'image de Sentinel-2 (10m) permet de bien dissocier la phénologie de chacune des parcelles d'un agrosystème. Quelques études ont déjà montré le potentiel d'utiliser des produits satellite d'une telle résolution, à l'image de Formosat-2 (8m) pour modéliser les milieux agricoles où la résolution de MODIS s'avère trop large ([Ferrant et al., 2014, 2016](#)).

L'évapotranspiration, qui est une des variables les plus directement influencées par un changement de phénologie, dépend également de paramètres physiologiques des plantes, notamment la résistance stomatique, qui représente la capacité de la plante à retenir l'eau dans ses feuilles. Afin de bien représenter celle-ci, il apparaît donc nécessaire de prendre en compte des paramètres physiologiques adaptés à chaque type de plante. Pour ce faire, la plupart des modèles de surface utilisent ce qu'on appelle des Types Fonctionnels de Plante (PFT). Ces PFT sont liés à des tables de paramètres physiologiques incluses dans les bases de données climatologiques utilisées par défaut dans ces modèles. Bien décrire l'occupation des sols s'avère donc crucial dans l'estimation de l'évapotranspiration ([Liu et al., 2008](#)). Cependant, la plupart des modèles de surface actuels utilisent des cartes d'occupation uniques, comme CORINE Land Cover, qui au même titre que le LAI, n'a pas de variation interannuelle. Utiliser des cartes d'occupation des sols plus récurrentes permet d'associer spatialement les bons paramètres physiologiques aux entités simulées, représentant ainsi les rotations de culture et améliorant de ce fait la représentation des flux hydrométéorologiques ([Battude et al., 2016 ; Ferrant et al., 2016](#)).

Ce premier chapitre vise donc à proposer une méthode prenant en compte le LAI à haute résolution ainsi que des cartes d'occupation des sols annuelles pour réaliser une simulation de surface à l'échelle du paysage tout en limitant le temps de calcul imposé par une approche de simulation par pixel.

2. Présentation du modèle : SURFEX-ISBA

Dans cette thèse, le modèle de surface utilisé est le modèle ISBA (Noilhan et Planton, 1989) intégré à la plateforme de modélisation SURFEX (Masson et al. 2013) développée par le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM). Ce modèle a pour objectif de simuler le comportement hydrométéorologique des surfaces continentales naturelles afin d'alimenter les modèles de circulation générale, ARPEGE, et atmosphériques, AROME, de Météo-France. Pour ce faire, il réalise donc un couplage entre bilans d'eau et d'énergie. Par défaut, SURFEX utilise la base de données de couverts ECOCLIMAP-2 (Faroux et al., 2013) pour décrire les paramètres de surface à une résolution kilométrique. L'ensemble du globe est décrit à l'aide de 273 écosystèmes, déterminés en croisant un algorithme de classification sur la base de NDVI satellite et des cartes d'occupation des sols existantes. Chaque écosystème est décrit par une combinaison unique de PFT. La version 7.3 de SURFEX, utilisée dans ce chapitre, utilise 12 PFT différents (Table I.1). Chaque pixel appartient donc à un unique écosystème et, en conséquence, contient plusieurs PFT. L'ensemble des paramètres physiologiques utiles à SURFEX sont fournis sur chaque PFT par ECOCLIMAP-2, dont un LAI climatologique issu de données MODIS et SPOT-Végétation auquel a été appliqué un algorithme de démixage spectral pour dissocier les cycles phénologiques de chaque PFT.

SURFEX V7.3	SURFEX V8.1
1. Sol nu	1. Sol nu
2. Roche	2. Roche
3. Neige et glace permanentes	3. Neige et glace permanentes
4. Forêt à feuilles caduques	4. Forêt tempérée de feuillus caducs
5. Forêt à feuilles persistantes	5. Forêt boréale de conifères à feuilles persistantes
6. Forêt de conifères	6. Forêt tropicale de feuillus à feuilles persistantes
7. Cultures en C3	7. Cultures en C3
8. Cultures en C4	8. Cultures en C4
9. Cultures irriguées en C4	9. Cultures irriguées en C4
10. Herbacées en C3	10. Prairie
11. Herbacées en C4	11. Prairie tropicale
12. Zone humide	12. Espaces verts urbains
	13. Forêt tropicale de feuillus caducs
	14. Forêt tempérée de feuillus à feuilles persistantes
	15. Forêt tempérée de conifères à feuilles persistantes
	16. Forêt boréale de feuillus caducs
	17. Forêt boréale de conifères caducs
	18. Toundra
	19. Végétation ligneuse

Tableau I-1: Types Fonctionnels de Plante (PFT) présents dans les différentes versions de SURFEX

Les bilans d'eau et d'énergie sont calculés, pour un même pixel, sur chaque PFT séparément. Le bilan d'énergie est dit mono-source car une seule température de surface est calculée pour l'ensemble du continuum Sol-Végétation-Atmosphère. R_n , LE et H sont calculés en suivant les équations [Eq. 1.2], [Eq. 1.3] et [Eq. 1.4]. G est quant à lui calculé comme étant le résidu du bilan d'énergie. Pour ce qui concerne LE en particulier, il est, en l'absence de neige, divisé en deux termes, le premier décrivant l'évaporation du sol E et le second décrivant l'évapotranspiration de la végétation ET_{veg} , prenant en compte la transpiration des feuilles mais également l'évaporation de l'eau interceptée par la canopée :

$$E = (1 - veg) \rho_a C_E V_a (h_u q_s(T_s) - q_a) \quad [\text{Eq. I-1.1}]$$

$$ET_{veg} = veg \rho_a C_E V_a h_v (q_s(T_s) - q_a) \quad [\text{Eq. I-1.2}]$$

où veg représente la fraction de sol couverte par la végétation, C_E un coefficient de diffusion lié à la turbulence de l'atmosphère, h_u l'humidité relative à la surface du sol, q_{sat} l'humidité spécifique à saturation de l'atmosphère, en masse d'eau par masse d'air humide, q_a l'humidité spécifique de l'atmosphère et h_v le coefficient de Halstead. Le LAI intervient dans la détermination de la fraction de couverture végétale veg , suivant la formulation empirique :

$$veg = 1 - \exp(-0.6 * LAI) \text{ pour les cultures} \quad [\text{Eq. I-1.3.a}]$$

$$veg = k \quad [\text{Eq. I-1.3.b}]$$

avec $k=0.95$ pour les autres types de végétation et $k=0$ pour le sol nu, la roche et le bâti.

Les humidités spécifiques q_i utilisées dans les équations [Eq. I-1.1] et [Eq. I-1.2] sont reliées aux pressions de vapeur saturante e_i par l'approximation suivante :

$$q_i = \frac{0.622e_i}{p - 0.378e_i} \quad [\text{Eq. I-1.4}]$$

où p est la pression de l'atmosphère en Pa, permettant ainsi de se rapporter à la forme présentée dans l'équation [Eq. 1.4].

Le coefficient h_v est déterminé en utilisant les notions de résistances aérodynamiques et stomatiques décrite par [Jarvis \(1976\)](#) :

$$h_v = \frac{(1 - \delta)R_a}{(R_a + R_s)} + \delta \quad [\text{Eq. I-1.5}]$$

avec R_a la résistance aérodynamique et R_s la résistance stomatique, toutes deux exprimées en $s.m^{-1}$, δ représentant la fraction de la canopée couverte par de l'eau interceptée.

Le LAI intervient ainsi également, dans ce formalisme, dans la détermination de la résistance stomatique de la manière suivante :

$$R_s = \frac{R_{smin}}{(F_1 F_2 F_3 F_4 LAI)} \quad [\text{Eq. I-1.6}]$$

avec R_{Smin} la résistance stomatique minimale de la plante, renseignée pour chaque PFT dans ECOCLIMAP-2, et F_i quatre coefficients calculés comme suit :

$$F_1 = \frac{f + R_{Smin}/R_{Smax}}{(1+f)} \quad [\text{Eq. I-1.7}]$$

$$F_2 = \frac{(w_2 - w_{wilt})}{(w_{fc} - w_{wilt})} \text{ et } 0 \leq F_2 \leq 1 \quad [\text{Eq. I-1.8}]$$

$$F_3 = 1 - \gamma_{F_3}(q_s(T_s) - q_a) \quad [\text{Eq. I-1.9}]$$

$$F_4 = 1 - 1.6 \times 10^{-3}(T_a - 298.15)^2 \quad [\text{Eq. I-1.10}]$$

où R_{Smax} est une valeur arbitrairement fixée à 5000 s.m^{-1} , w_2 représente l'humidité volumique du sol en zone racinaire, w_{wilt} l'humidité du sol au point de flétrissement, w_{fc} l'humidité du sol à la capacité au champ et γ_{F_3} un paramètre inhérent au type de végétation (Jacquemin and Noilhan, 1990). Enfin, f représente la quantité du rayonnement incident R_G qui sert à la photosynthèse de la plante, normalisée par une valeur seuil R_{GI} dépendante du type de végétation :

$$f = 0.55 \frac{R_G}{R_{GI}} \frac{2}{LAI} \quad [\text{Eq. I.10}]$$

F_1 représente donc l'influence de la quantité d'énergie reçue sur la régulation des stomates. F_2 traduit l'effet du stress hydrique. F_3 prend en compte la demande atmosphérique en vapeur d'eau et enfin F_4 représente l'effet de la température de l'air sur l'ouverture des stomates. La version A-gs d'ISBA (Calvet et al., 1998), non utilisée dans cette thèse, couple cette formulation de résistance stomatique avec un schéma de photosynthèse, permettant ainsi de simuler l'évolution de la biomasse et du LAI.

Le transfert d'eau et d'énergie dans le sol peut être calculé de plusieurs manières : soit en utilisant une approche dite « force restore », décrite par Deardoff (1977), soit en utilisant une version 1D des équations de diffusion de Richards (1931). L'approche « force restore », utilisée dans ce premier axe, discrétise le sol en deux (Mahfouf et Noilhan, 1996) ou trois couches (Boone et al., 1999), correspondant à une couche de surface (5cm de profondeur), une couche racinaire et, pour la version trois couches, une zone tampon générant un drainage profond vers la nappe phréatique. Ce premier chapitre utilise la version trois couches, une discrétisation plus fine du sol n'ayant pas d'intérêt particulier dans la mesure où l'on n'a pas une connaissance suffisante de la stratification du sol ou du profil racinaire des couverts végétaux simulés. Le principe est de créer une diffusion verticale de l'eau entre la couche de surface et la zone racinaire, dépendant du contenu en eau des deux couches et de leurs propriétés hydrodynamiques. La troisième couche ne peut que recevoir le flux de drainage issu de la zone racinaire et la réalimenter sous forme de remontées capillaires.

L'intérêt de l'utilisation de SURFEX-ISBA dans cette thèse est multiple. Premièrement, l'usage d'un tel modèle de surface permet l'étude des flux d'énergie comme des flux hydriques, permettant ainsi une compréhension plus générale du fonctionnement thermo-

hydrique des surfaces que les modèles ne simulant qu'un seul des deux bilans ([Introduction sect. 2](#)). Il offre également des possibilités de couplage hydrologique, hydrogéologique, météorologique et climatique qui permettent d'étudier l'impact des méthodes présentées dans cette thèse sur les autres composantes environnementales et d'en évaluer les résultats sur des variables plus ou moins intégratrices, comme les variables atmosphériques, les débits des cours d'eau ou encore l'évolution du niveau des nappes phréatiques. Ces capacités de couplage, notamment à des modèles de circulation générale, combinées à la résolution des bilans d'eau et d'énergie de manière conjointe, confèrent également à SURFEX-ISBA de bonnes capacités prédictives. Tous ces éléments en font un modèle de choix pour étudier le comportement thermo-hydrique actuel et futur des surfaces continentales, et plus particulièrement des zones à fort enjeux que sont les agrosystèmes.

3. Zone d'étude

La zone d'étude de ce premier axe est un carré de 576 km² situé dans le bassin versant de la Garonne, au Sud-Ouest de Toulouse ([Figure I-2.1](#)). Cette zone correspond à l'emprise des acquisitions du satellite Formosat-2 dans le secteur. Le climat y est tempéré, avec des influences majoritairement atlantique et méditerranéenne. Le printemps est en général humide alors que l'été est chaud et sec ([Figure I-1](#)). Il pleut ainsi en moyenne 638 mm.an⁻¹. On note cependant une variabilité interannuelle relativement importante, notamment sur les années 2006-2010 qui concernent cette étude. La zone est essentiellement agricole ([Figure I-2.2](#)) avec environ de 50% de terres cultivées, le reste étant couvert essentiellement par des forêts ou du bâti. On y trouve plusieurs types de culture, allant des cultures d'hiver (blé, colza, etc.) aux cultures d'été (maïs, sorgho, tournesol, soja) irriguées ou non. La topographie est essentiellement constituée par la plaine et les terrasses à alluviales de la Garonne. On note cependant la présence de coteaux au Nord-Ouest et au Sud-Est de la zone d'étude.

Deux parcelles expérimentales instrumentées par le CESBIO dans le cadre de l'Observatoire Spatial Régional (OSR), sur les communes d'Auradé et de Lamasquère, sont incluses dans la zone d'étude. Ces parcelles sont décrites en [section 5.2.2.3](#), y compris l'instrumentation et les différentes mesures ponctuelles pratiquées sur ces sites.

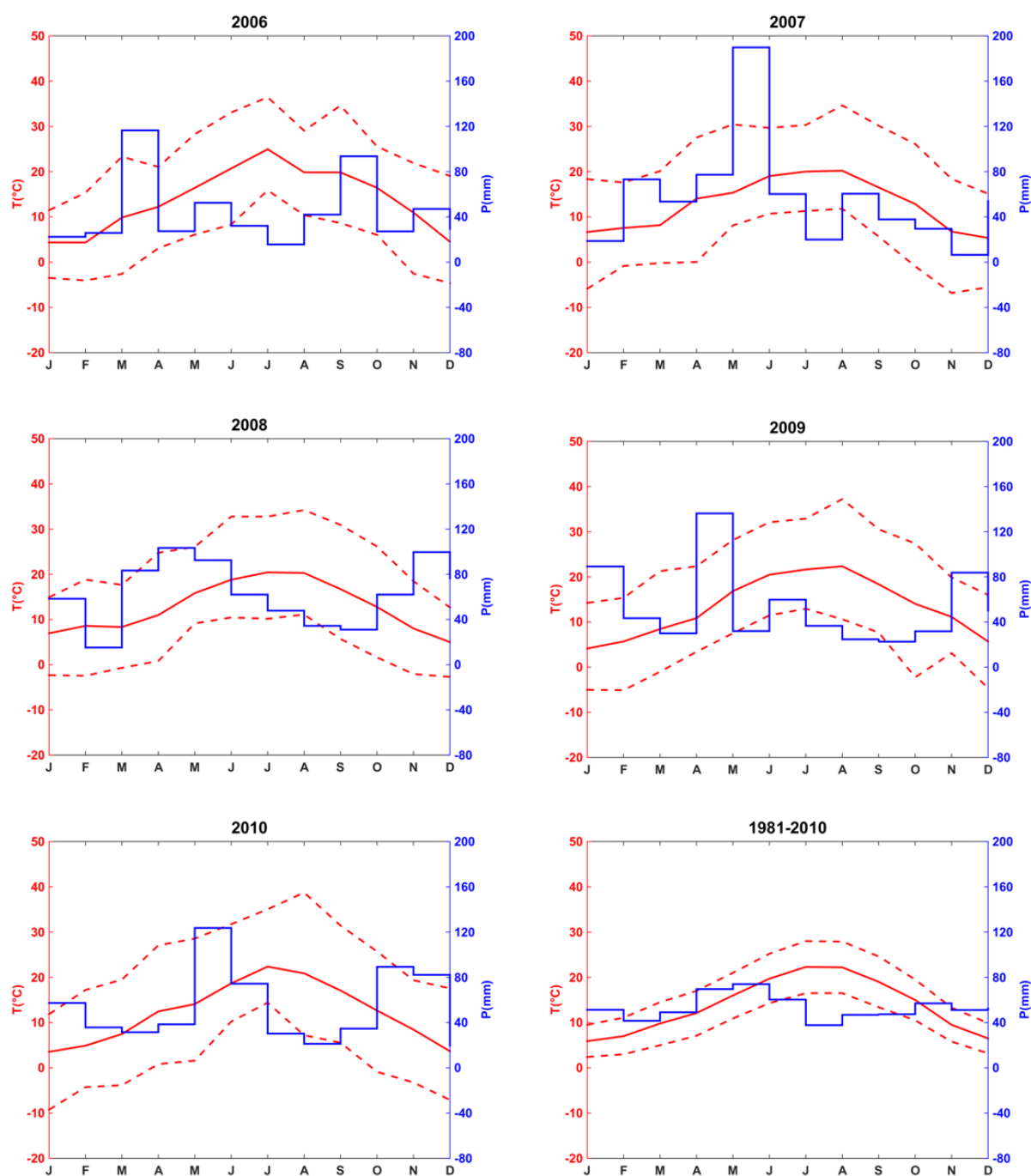


Figure I-1: Diagramme ombrothermique (Gausson et Bagnouls, 1953) pour la station météorologique de Toulouse-Blagnac. En rouge, la température journalière moyenne chaque mois, les pointillés rouges représentant les températures maximales et minimales journalières moyennes sur le mois. En bleu, le cumul mensuel de précipitations.

4. Démarche scientifique

Le but de ce premier axe de travail était de montrer la contribution d'informations satellite à haute résolution concernant la phénologie et l'occupation des sols dans la simulation hydrométéorologique, comparé à l'utilisation d'une base de données climatologique (dans notre cas ECOCLIMAP-2). Pour ce faire, j'ai opté pour l'utilisation de produits de LAI et d'occupation des sols issus des données du satellite taïwanais Formosat-2 à 8m de résolution. Le LAI a été calculé grâce au réseau de neurones BVNET dans le cadre de la thèse d'Amanda Veloso (Veloso, 2014). Les cartes d'occupation des sols ont quant à elles été réalisées par Claire Marais-Sicre grâce à un algorithme de classification supervisée.

La zone d'étude comptant 9 millions de pixels, il paraissait difficilement envisageable en termes de temps de calcul, d'utiliser une simulation discrétisée par pixel. Néanmoins, on aurait perdu tout l'intérêt de la haute résolution en agrégeant les valeurs sur des pixels bien plus grands, du fait de l'apparition de pixels à occupation des sols mixtes. Afin d'éviter ces problèmes tout diminuant le temps de calcul, j'ai pensé à une approche de simulation par parcelles (Intro., sect. 3.2). L'hypothèse principale est ici de considérer qu'une parcelle, d'un type de végétation donné, a une phénologie suffisamment homogène pour être considérée comme étant un seul point de calcul. J'ai donc segmenté la zone d'étude, chaque année, sur la base des cartes d'occupation des sols. Tous les ensembles de pixels connexes ayant une même occupation des sols ont ainsi été regroupés sous une même unité de calcul. Afin d'éviter les effets de bord ainsi que les incertitudes de géo-localisation des données satellite lors du calcul du LAI, la segmentation réalisée a été érodée de 16m, équivalent à deux fois la largeur d'un pixel Formosat-2. Les centroïdes de ces parcelles, ainsi réduites au nombre de 13 000 environ, ont donc servi de points de grille pour la simulation avec SURFEX-ISBA. Les 12 PFT de SURFEX-ISBA en version 7-3 ne détaillant pas aussi bien les couverts que la carte d'occupation des sols, il a fallu établir des règles d'agrégation des classes (Tableau I-2.1). Pour ce qui est du LAI, afin d'obtenir une phénologie unique pour chaque parcelle, les pixels ont été moyennés sur l'ensemble de la parcelle après érosion. Afin d'obtenir une phénologie qui corresponde aux attentes de SURFEX d'un point de vue numérique, le LAI a été interpolé quotidiennement entre les dates d'acquisition de Formosat-2, puis moyenné mensuellement. Ces traitements ont ainsi permis d'obtenir un forçage direct, mensuel pour le LAI et annuel pour l'occupation des sols, pour SURFEX.

Afin de comparer l'usage d'une climatologie à l'usage de produits satellite, j'ai réalisé deux expériences sur la grille précédemment définie. La première utilise des PFT multiples issus d'ECOCLIMAP-2 ainsi que le LAI climatologique pour chaque PFT. La seconde utilise les données Formosat-2 pour déterminer un PFT unique et une phénologie propre à chaque parcelle. Les différents flux sont ainsi comparés, localement aux mesures in-situ sur les sites d'Auradé et de Lamasquère, afin d'évaluer si les différences entre expériences représentent effectivement une amélioration, puis spatialement, pour vérifier si cette tendance est

applicable à l'ensemble de la zone d'étude. La méthode ainsi que les résultats sont ainsi détaillés dans la [section 5](#).

5. Résultats publiés: Effects of high spatial and temporal resolution Earth observations on simulated hydrometeorological variables in a cropland (southwestern France)

Jordi Etchanchu^{1*}, Vincent Rivalland¹, Simon Gascoin¹, Jérôme Cros¹, Tiphaine Tallec¹, Aurore Brut¹, and Gilles Boulet¹

¹ CESBIO, Université de Toulouse, CNES, CNRS, IRD, UPS, Toulouse, France

Hydrology and Earth System Sciences, 21, 5693-5708, <https://doi.org/10.5194/hess-21-5693-2017>, 2017.

5.1 Introduction

In an agricultural river basin, farmers' practices have an impact on crop functioning. Farmers manage crop rotations, select variety, decide the seeding and harvest dates, and organize irrigation supplements. In such basins, more accurate description of crop dynamics and their effects on hydrometeorological fluxes is critical to improve the monitoring of water resources ([Foley et al., 2005](#); [Martin et al., 2016](#)).

Land surface models (LSMs), such as the Variable Infiltration Capacity (VIC; [Liang et al., 1994](#)) or Interactions between the Surface Biosphere Atmosphere (ISBA; [Noilhan and Planton, 1989](#)) models, are increasingly used as distributed hydrological models to study and forecast water resource evolution (e.g., [Habets et al., 2008](#); [Tesemma et al., 2015](#)). The leaf area index (LAI) is defined as "half of the total developed area of green (i.e., photosynthetic active) leaves per unit ground horizontal surface area" ([Chen and Black, 1992](#)). It is the main variable used to parameterize the effect of vegetation dynamics on evapotranspiration in most LSMs. [Garrigues et al. \(2015\)](#) showed the importance of the LAI in evapotranspiration simulations. When it is not simulated by the model, the LAI is often derived or directly taken from reference tables organized by vegetation type ([Versegny et al., 1993](#); [Maurer et al., 2002](#)). This LAI is generally computed from low- to mid-resolution long-term satellite records and provided as a climatology. Thus it does not allow one to determine the impact of observed annual vegetation variability on water and energy fluxes on the land surface ([Tang et al., 2012](#); [Ford and Quiring, 2013](#)). Studies have shown that prescribing a remotely sensed LAI with year-to-year variability in LSMs improves estimations of water and energy fluxes between the soil and atmosphere, mainly through more realistic

evapotranspiration (Van den Hurk et al., 2003; Jarlan et al., 2008). These studies used LAI values drawn from low- to mid-resolution satellite imagery, i.e., AVHRR (Van den Hurk et al., 2003) or MODIS (Tang et al., 2012; Ford and Quiring, 2013). However, for many cultivated areas and particularly in European countries (Fritz et al., 2015), field plot areas rarely exceed typical MODIS product pixel sizes (500 m, i.e., 25 ha). As a result, MODIS pixels can contain mixed LAI signatures of different crop types with different phenologies. It thus degrades the actual temporal variability of the LAI on these fields. Consequently, it is not representative of the actual hydrometeorological behavior of each land cover type (Trezza et al., 2013; Nagler et al., 2013). This is particularly the case for regions where both summer and winter crops are cultivated, as in southwestern France. Indeed, summer and winter crops have anti-correlated phenologies, so mixing these two LAI signatures leads to attenuating, or even suppressing of, the LAI variability throughout the year.

A potential solution to access realistic vegetation dynamic could be the use of high-resolution remote sensing products. The recently launched Sentinel-2 mission generates multispectral imagery of land areas at a decametric resolution (10 to 60m depending on the band) over a 5-day revisit period with global coverage. Previous studies have already shown that higher-resolution data can improve the description of the vegetation and modeled water processes in agricultural landscapes for which mid-resolution imagery is unsuitable (Ferrant et al., 2014, 2016). In this study, we used the Interactions between Surface Biosphere Atmosphere (ISBA) LSM as part of the EXternalized SURFace (SURFEX) modeling platform (Masson et al., 2013). SURFEX was developed by the French National Center for Meteorological Research (CNRM) to represent and interface the surface processes for atmospheric and hydrological models. This platform is also used for research purposes in the fields of climatology, meteorology, and hydrology. Within SURFEX, ISBA is the submodel in charge of simulating variables over natural emerged areas. It uses the ECOCLIMAP-II database to determine vegetation types and associated parameters (e.g., temporal LAI, fractional vegetation cover, albedo) at a spatial resolution of 1 km (Masson et al., 2003; Faroux et al., 2013). Each ECOCLIMAP-II grid cell is composed of up to 12 vegetation types or plant functional types (PFTs). Each PFT LAI forcing in ECOCLIMAP-II database has a temporal resolution of 10 days. It is a climatology derived from MODIS satellite observations collected between 1999 and 2005. The LAI of each PFT is determined by unmixing the LAI of the MODIS grid cell using neighboring, unmixed pixels. The method, detailed in Faroux et al. (2013), consists of using the LAI of the nearest MODIS pixels with a pure PFT to unmix the effect of each PFT in the LAI signature.

Our study aims at evaluating the impact of introducing high-resolution information on vegetation type and LAI from Sentinel-2-like observations instead of the low-resolution climatology of ECOCLIMAP-II in ISBA-SURFEX simulations. The main objective is to assess if this more accurate description of the phenological cycle, especially the agricultural practices mentioned above, translates into a better representation of the simulated evapotranspiration. We also aim at evaluating the impact on simulated drainage and runoff.

The study area is a pilot site in southwestern France ([Dejoux et al., 2012](#)). It is considered to be representative of the cultivated area in the upper Garonne River basin. A fraction (estimated at 13 %) of crop fields in the area is irrigated, but we chose not to focus on effects of irrigation due to a lack of spatially distributed data on irrigation quantity and timing. LAI and land cover maps were determined from a 5- year (2006–2010) time series of Formosat-2 satellite images, which has similar spectral and spatiotemporal characteristics as Sentinel-2. The LSM was applied at the plot scale to place it under homogeneous vegetation type conditions for each computation unit (one computation unit has only one PFT). This plot-scale modeling approach allows us to take account of the spatial variability of LAI values between plots while limiting the computation time in comparison to a pixel-based approach. Our results are first compared to evapotranspiration in situ measurements. Then we perform a spatial comparison between simulation results using the MODIS-based ECOCLIMAP-II LAI forcing and the FORMOSAT-2-based LAI forcing. This way, we will point out the contribution on surface fluxes dynamics of using high spatial and temporal resolution vegetation forcing instead of a low-resolution climatology. Finally, we discuss the limitations of this work and challenges that must be addressed in order to upscale this study to the Garonne River basin scale using Sentinel-2 data.

5.2 Model and data

5.2.1 SURFEX-ISBA model and forcing

EXTERNALIZED SURFACE (SURFEX) is a modeling platform developed by the CNRM/Meteo-France. It simulates exchanges between land surfaces and the atmosphere ([Masson et al., 2013](#)). It is composed of four modules to simulate radiative budget and hydrological flux patterns for towns, lakes, oceans, and natural areas. In this study, we used the Interactions between Surface Biosphere Atmosphere (ISBA; [Noilhan et Planton, 1989](#)) nature model included in the version 7-3 of SURFEX. The ISBA model uses meteorological and physiographic data to simulate energy and water fluxes between land surfaces and the atmosphere.

The version used in this study is the standard version of ISBA. It does not include a coupled stomatal conductancephotosynthesis scheme like in the A-gs version ([Calvet et al., 1998](#)). The water transfer in the soil is simulated on three layers with a force-restore approach presented by [Deardorff \(1977\)](#). This approach was integrated in ISBA by [Mahfouf and Noilhan \(1996\)](#). The three layers were described and calibrated by [Boone et al. \(1999\)](#). The surface layer volumetric water content is restored depending on the water content of both surface and root zone layer. A gravitational drainage flux is simulated when the soil water content of a layer exceeds the field capacity. In the version we used, a subgrid runoff is also calculated using the variable infiltration capacity scheme first described by [Dumenil and Todini \(1992\)](#) and included in SURFEX by [Habets et al. \(1999a\)](#). It allows simulating a

runoff flux even when the soil is not fully saturated. A unique energy budget is simulated for each vegetation type on the vegetation–soil layers composite by a single source scheme. A single surface temperature is used to compute the different energy fluxes. The energy budget calculation method is detailed by [Noihlan and Planton \(1989\)](#).

The meteorological forcing for the study area is drawn from the Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige (SAFRAN; [Durand et al., 1993](#)) reanalysis data ([Quintana-Segui et al., 2007](#)), which provides precipitation data (in solid and liquid form), air temperature and specific humidity data at 2 m, air pressure data, and wind and solar radiation data at hourly time intervals at 8 km resolution. The SAFRAN data were spatially linearly interpolated to match plot centroids. Regarding soil parameters, by default, ISBA uses the Harmonized World Soil Database ([FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2012](#)), which gives the percentage of clay and sand at a 30 arcsec (1 km) resolution. Soil parameters were then computed using empirical pedotransfer functions ([Noilhan and Lacarrère, 1995](#)).

The ECOCLIMAP-II database ([Faroux et al., 2013](#)) is used to describe land cover at a 1 km resolution, thus corresponding to the resolution of the SURFEX-ISBA simulation grid. This land cover database is divided in 273 ecosystems. These ecosystems were determined by crossing a land cover classification derived from the SPOT/VEGETATION normalized difference vegetation index (NDVI) series and pre-existing land cover maps, as described by [Faroux et al. \(2013\)](#). Twelve different plant functional types (PFT, also referred to as patches) are considered to describe these ecosystems. Each ecosystem is described by a correspondent composition of these 12 patches. Each grid cell in ISBA belongs to a unique ecosystem and thus is described as a combination of these patches. Vegetation parameters are thus determined for each patch of this ecosystem. Some of the parameters are fixed such as root depth and minimal stomatal resistance, and some are temporally variable such as albedo and LAI. In particular, the LAI follows a cycle determined from MODIS LAI analysis data for 2000 to 2005 averaged for each vegetation type of each ecosystem with a temporal resolution of 10 days. Because of the low spatial resolution of MODIS, the LAI signatures of several vegetation types are often mixed in a pixel. An unmixing method is then used by [Faroux et al. \(2013\)](#). It uses the nearest unmixed pixels of each PFT present in the MODIS pixel considered to assess the contribution of each PFT in the LAI climatology. ISBA then uses these data to separately simulate all variables for each vegetation type present in the pixels, and then based on the fraction of each type as a weighting coefficient, it calculates global pixel fluxes.

By default, ISBA simulates the fluxes on a 1km regular grid corresponding to the ECOCLIMAP-II grid. But interpolation routines are included in it. It allows simulating on irregular grids, as done in this study.

5.2.2 Data

All remote sensing and in situ data were collected as part of the Observatoire Spatial Régional (OSR) project for an agricultural area of southwestern France near Toulouse (Fig. I-2.1, Dejoux et al., 2012). This area is considered to be representative of the cultivated area of the Garonne River basin, which is characterized by a variety of land cover forms. The two main types of crops found in this area are irrigated summer crops such as maize or soy plants and rain-fed rotation crops such as wheat and sunflower plants.

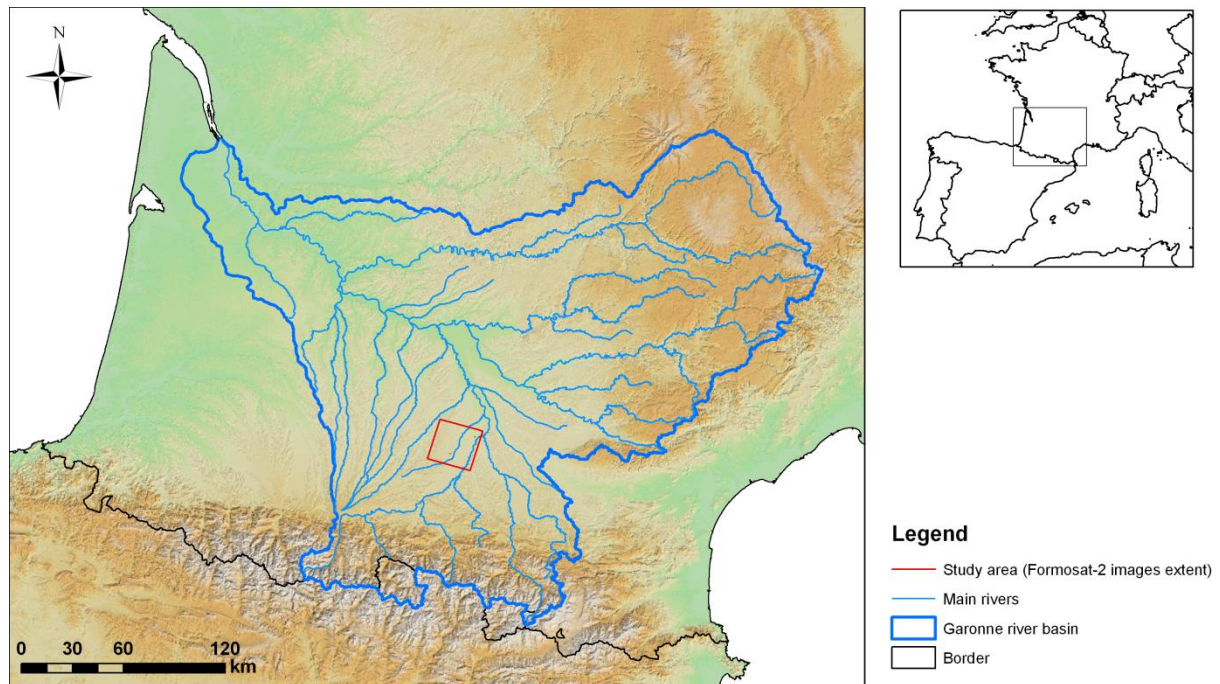


Figure I-2.1: Study area location (red).

5.2.2.1 Formosat-2 leaf area index

Formosat-2 is an NSPO (Taiwan) satellite that can generate daily multispectral images of the Earth's surface at 8m resolution and with a swath of 24 km. It functions on tasking mode; i.e., it does not acquire data systematically like Sentinel-2 but rather must be programmed for a target area. Its sensor detects radiation within four frequency bands of blue, green, red, and near-infrared. After geometric, atmospheric, and radiometric corrections were made and clouds are detected (Hagolle et al., 2008, 2010), measured reflectances were entered into the neural network BVNET, which inverts the PROSAIL radiative transfer model (Claverie, 2012). This neural network deduces a set of vegetation parameters (among them the LAI and fraction of vegetation cover – FCOVER) for each pixel. It thus generates 8m resolution LAI maps for each date and pixels without cloud obstruction. Finally, we had access to 105 clear images on our study area for 2006–2010. The LAI product was validated by Veloso et al. (2012) for the same area and time period as those used in this study with destructive measurements on the vegetation. The time series of LAI maps was

then spatially averaged at the plot scale using the land cover map (Sect. 5.2.2.2 below), interpolated between available dates, and finally temporally averaged to obtain monthly forcings of LAI for each plot of the study area. The spatial averaging over each plot has been done with 16m erosion of the plots (twice the size of a Formosat-2 pixel) to avoid border effects and impact of geolocation uncertainty (Sect. 5.5).

5.2.2.2 Formosat-2 land cover maps

Annual land cover maps were generated using the previously described Formosat-2 image time series (Fig. I-2.2, Ducrot, 2005; Ducrot et al., 2007, 2009). Then, a supervised classification algorithm based on the iterative conditional method (ICM) was applied to determine the vegetation type of each plot (Ducrot et al., 1998; Masse et al., 2011). This algorithm uses a learning sample composed of selected plots where the vegetation type is known. These plots are extracted from the Politique Agricole Commune database, made of farmers' official land use declarations. The algorithm then uses the annual NDVI profiles of these plots to separate all the pixels into 34 classes with similar NDVI profiles.

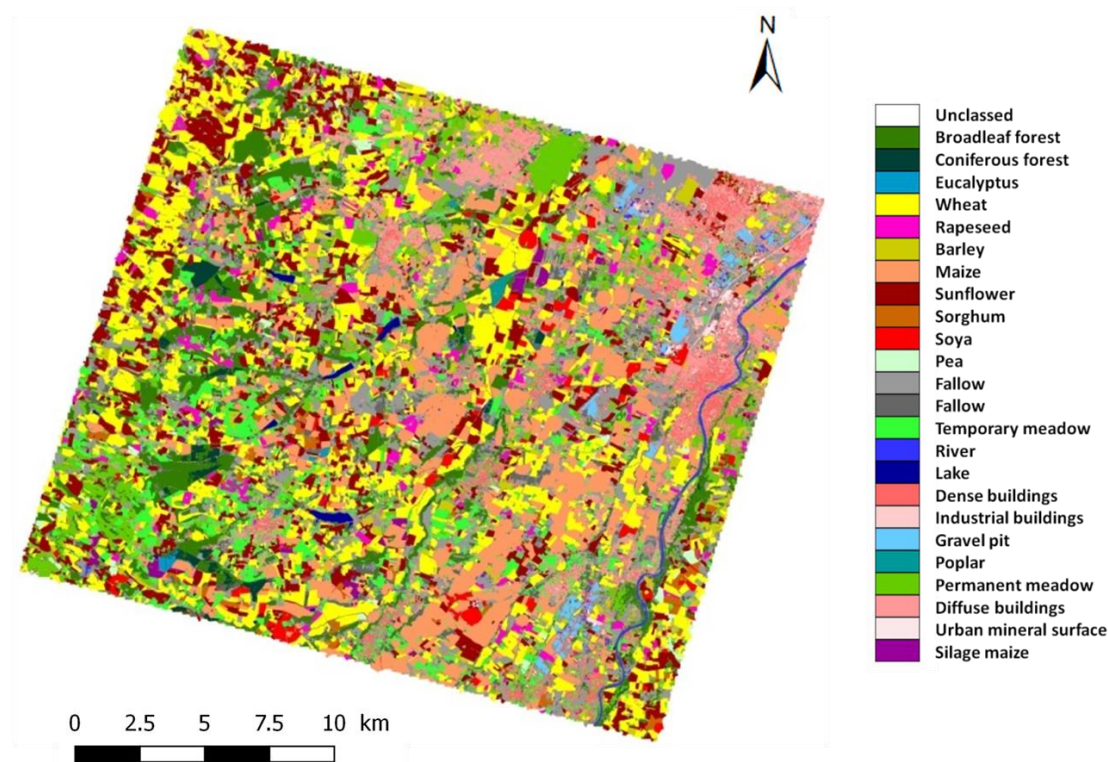


Figure I-2.2: Land cover map for 2006.

5.2.2.3 In situ measurements

We used in situ measurements drawn from two eddy covariance stations in the study area located at Auradé (43°32'58.81" N, 01°06'22.08" E) and Lamasquère (43°50'05" N, 01°24'19" E) to evaluate the simulations. The Auradé plot is located on a hillside near the Garonne River terraces. It belongs to a private cereal production farm with a wheat–sunflower–wheat–rapeseed rotation. At this site, only grain is exported, straw is stored and the plot is never irrigated. The Lamasquère plot is part of an experimental milk production farm. It is positioned along the Touch River and is characterized by a maize–winter wheat–maize–winter wheat rotation. All aboveground biomass is exported as cow feed and bedding. Maize grown in the Lamasquère plot is irrigated. In 2006, irrigation levels were measured at 147mm between June and August.

Each flux site is equipped with (1) eddy covariance systems to measure half-hourly sensible heat flux and evapotranspiration, installed at 2.8 and 3.65m above the soil at Auradé and Lamasquère sites, respectively; (2) meteorological sensors to measure radiation (CNR1, Kipp&Zonen), wind speed (Windvane/prop Young), air temperature, and humidity (HMP35, Vaisala); and (3) soil profile probes for water content measurements (CS616, Campbell Scientific) collected at depths of 5, 10, 30, and 60 cm (and also 100 cm at Lamasquère site). The eddy covariance (EC) system allows for monitoring turbulent fluxes at the field scale combining synchronized measurements of 3-D wind components (Campbell, CSAT 3) and fluctuations of atmospheric CO₂ and H₂O concentrations using a fast open-path infrared gas analyzer (LI-COR LI-7500, IRGA). Evapotranspiration (ET) and energy fluxes (latent heat, LE, and sensible heat, H) are calculated and integrated over 30 min according to CarboEurope-IP recommendation (Aubinet et al., 1999; Béziat et al., 2009). Half-hourly fluxes were corrected for spectral frequency loss (Moore, 1986) and corrected for air density variations (Webb et al., 1980). Flux data were filtered and flagged according to statistics and objectives criteria: data out of range, rain event, friction velocity threshold, integral turbulence characteristic, stationarity test (Papale et al., 2006; Reichstein et al., 2005), and spatial representativeness (footprint) of the fluxes. For the latter, if the calculated fetch including 90% of the flux (Kljun et al., 2004) model for each half-hourly EC flux value (F-90) was higher than the distance between the mast and the edge of the plot in the main wind direction, fluxes were discarded. Gap filling was finally performed depending on the duration of missing data, either following the linear regression method (duration<1.5 h) or following the mean diurnal variation or look up table method (duration>1.5 h) according to Béziat al. (2009).

The LAI was also measured for these sites using a destructive method (Claverie, 2012; Ferrant et al., 2014). At both flux sites, vegetation samples were collected along two transects crossing the field over the entire growing season until harvesting, roughly once a month. Ten to 20 1.5m long rows were collected on each sampling day. The organs of the collected plants were separated into green and yellow leaves, stems, flowers, and fruits. The

plant area index (PAI) was defined as half the surfaces of all green organs (i.e., leaves and stems), and the LAI was defined as half the surfaces of green leaves; it was measured by means of a LI-COR planimeter (LI3100, LI-COR, Lincoln, NE, USA).

5.3 Methods

5.3.1 Numerical experiments

We conducted two experiments to evaluate effects of the Formosat-2 LAI and land cover maps on ISBA simulations. The study area covers a 24 km x 24 km area near Toulouse in southwestern France (Fig. I-2.1). Simulations were carried out from 2006 to 2010. Our objective was to preserve the uniqueness of vegetation types within computation units to avoid mixing the LAI profiles of several crop types. A discretization of the area with a regular grid based on cartographic coordinates as it is done by default in ISBA would require employing a grid resolution of at least 50m to capture the spatial heterogeneity of the landscape (230 400 grid cells). The study area was thus discretized using an original approach: rather than using a regular grid, we used the land cover map to identify connected regions of pixels sharing a common PFT (using GDAL polygonize utility with fourpixel connectedness). This discretization does not necessarily match actual crop fields because two adjacent plots with the same PFT are merged into one plot. However, in general, a “numerical plot” corresponds to a cultivated plot. A plot can also correspond to an uncultivated area, such as a forest patch. These homogeneous plots were determined for each year of the simulation period, as the land cover maps differ from one year to another mainly due to crop rotations. The plot approach generates lower computation costs than the regular grid approach. The study area is composed of 12 500 to 14 500 plots depending on the year considered, representing 84 to 91% of the total image area. The remaining surface corresponds to roads, walkways, rivers, and strips of grass between fields, which are not simulated in this study.

The first experiment (ECOCLIMAP) is the reference simulation. It simulates fluxes based on ECOCLIMAP-II vegetation parameters, including the LAI climatology and vegetation fraction (Sect. 5.2.1). ECOCLIMAP parameters are interpolated on plot centroids with interpolation functions included in ISBA.

The second experiment (FORMOSAT) was carried out by prescribing the LAI using the monthly Formosat-2 LAI (Sect. 5.2.2.1) rather than the ECOCLIMAP-II LAI. Each plot was also assigned a unique PFT obtained from the FORMOSAT land cover maps. We first aggregated the 34 classes of the original land cover maps to match the 12 standard PFTs of SURFEX (Table I-2.1). The other vegetation parameters were drawn from ECOCLIMAP-II for the corresponding PFT.

Formosat-2 cover map class	SURFEX class
16. Bare soil	1. Bare soil
4. Urban area 33. Gravel pit 41. Dense buildings 42. Diffuse buildings 43. Industrial buildings 44. Urban mineral surface	2. Rocks
-	3. Permanent snow and ice
231. Mixed broadleaf forest 2311. Poplar 2312. Eucalyptus	4. Deciduous forest
-	5. Evergreen forest
232. Mixed coniferous forest	6. Coniferous forest
15. Dual crops 121. Wheat 122. Barley 123. Rapeseed 132. Sunflower 134. Soya 135. Hemp 141. Protein plants 142. Spring barley 1321. Late sunflower 1411. Pea	7. C3 crops
131. Maize 133. Sorghum 1311. Non-irrigated maize 1312. Silage maize	8. C4 crops
-	9. Irrigated crops
22. & 112. Fallow 111. Meadow 1111. Temporary meadow 1112. Permanent meadow	10. C3 herbaceous plants
-	11. C4 herbaceous plants
31. River 32. Lake	12. Wetland

Table I-2.1: Aggregation rules of Formosat-2 cover maps by SURFEX vegetation type

5.3.2 Comparison methods

First, we did a local comparison with in situ measurements. We extracted the outputs of both simulations from the Auradé and Lamasquère station plots. We then calculated correlation coefficient (R^2) and root mean square error (RMSE) values between monthly cumulated measured and simulated evapotranspiration (ET) fluxes.

Then, we did a spatialized comparison over the entire study area. We analyzed differences between both simulations for the entire study area by calculating correlation coefficients between the monthly simulated evapotranspiration time series for each plot. These correlation maps allow one to identify plots where effects of using Formosat- 2 data on the temporal evolution of evapotranspiration are more pronounced. Eventually, we aggregated the simulated LAI, evapotranspiration, drainage, runoff, and soil water index (SWI, [Eq. I-2]; [Le Moigne 2012](#)) values of all of the plots based on PFT values to analyze effects of the Formosat-2 products by vegetation type. Each plot has a unique ISBA patch in the FORMOSAT experiment, forced by the land cover map. Thus only the corresponding patch was taken into account when comparing with the ECOCLIMAP experiment. If the corresponding patch was not present in the combination of patches given by ECOCLIMAP-II for the plot, then this plot was excluded from the results. In this way we are sure that we can compare the fluxes on specific vegetation types.

$$SWI = \frac{w - w_{wilt}}{w_{fc} - w_{wilt}} \quad [\text{Eq. I-2}]$$

where w is the volumetric soil water content, w_{wilt} is the volumetric soil water content at the wilting point, and w_{fc} is the volumetric soil water content at field capacity.

5.4 Results

5.4.1 Local comparisons with in situ measurements

First, the simulated ET of both experiments has been compared to the measured ET on the study sites Auradé and Lamasquère. It shows that using LAI derived from Formosat- 2 data in the SURFEX simulation improves the correlation and RMSE of almost every year with respect to the ECOCLIMAP experiment ([Tables I-2.2 and I-2.3](#)). The data for the years 2008 and 2010 at the Auradé site are not presented due to technical problems with the eddy covariance tower which affect fluxes estimations on these periods. The improvement is more significant when measurement fields are covered in sunflower or maize crops, i.e., summer crops, with an improvement of the R^2 of roughly 0.3 and a decrease of RMSE by around 30 %. By contrast, the effects of Formosat-2 data are not as strong for wheat and rapeseed crops, i.e., winter crops, where the improvement on R^2 rarely exceeds 0.1, the decrease in RMSE being around 20 %.

Year	Crop type	R ² ECOCLIMAP	R ² FORMOSAT	RMSE ECOCLIMAP	RMSE FORMOSAT
2006	Wheat	0.90	0.94	8.07	6.86
2007	Sunflower	0.66	0.89	20.9	12.1
2008	Wheat	-	-	-	-
2009	Rapeseed	0.97	0.96	6.71	7.66
2010	Wheat	-	-	-	-

Table I-2.2: Correlation coefficient and RMSE of evapotranspiration for the Auradé site.

Year	Crop type	R ² ECOCLIMAP	R ² FORMOSAT	RMSE ECOCLIMAP	RMSE FORMOSAT
2006	Maize	0.15	0.65	34.4	23.5
2007	Wheat	0.76	0.95	21.9	14.6
2008	Maize	0.58	0.82	21.5	12.4
2009	Wheat	0.94	0.95	18.7	12.6
2010	Maize	0.46	0.62	27.2	22.8

Table I-2.3: Correlation coefficient and RMSE of evapotranspiration for the Lamasquère site.

To understand why these differences appear, we compared the time series of measured and simulated LAI and evapotranspiration for both sites in 2006 (Figs. I-2.3 and I-2.4). Silage maize was grown in Lamasquère in 2006. This crop is harvested before plant senescence. Hence, the observed cycle is shorter than a typical maize cycle. Figure 3 shows that the LAI is more realistic when using Formosat-2 data rather than the ECOCLIMAP-II MODIS climatologic LAI. The FORMOSAT LAI phenological cycle is shorter. It is in agreement with the LAI cycle observed in situ. LAI value increase due to crop growth and sudden drop due to harvesting are well represented. By contrast, the ECOCLIMAP LAI is too high in the autumn and winter. This better description of the LAI based on Formosat-2 data leads to a better simulation of evapotranspiration timing (Fig. I-2.4). In particular, the evapotranspiration peak is delayed by 1 month for summer crops (i.e., on Lamasquère). It thus fits the measurements better. However, the FORMOSAT experiment results do not match the actual amplitude of the measured evapotranspiration peak. This difference will be discussed in Sect. 5.5. By contrast, differences in evapotranspiration levels are minor for winter wheat at the Auradé site. LAI dynamics are similar. The main difference between observation and simulations for both experiments occurs after the harvest period but does not lead to large differences in ET values (Sect. 5.4.2).

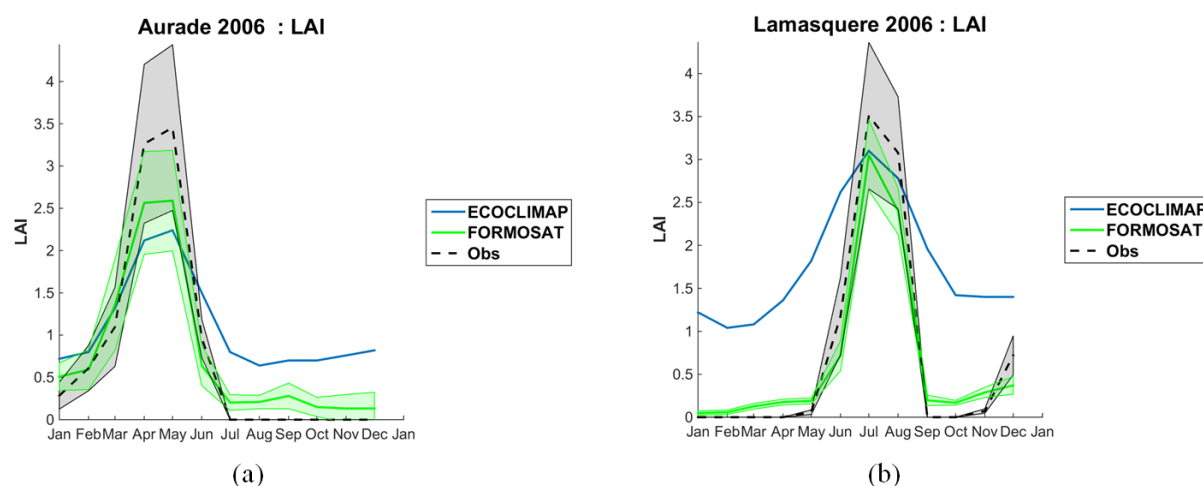


Figure I-2.3: LAI time series for Auradé (a) and Lamasquère (b) for 2006. The filled areas represent the standard deviations for the measured (gray) and remotely sensed (green) time series.

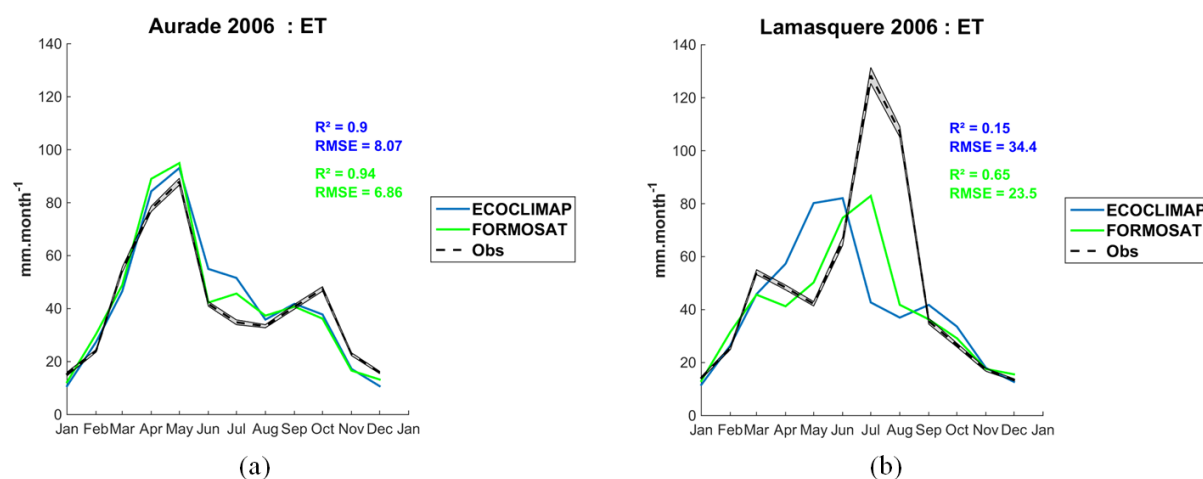
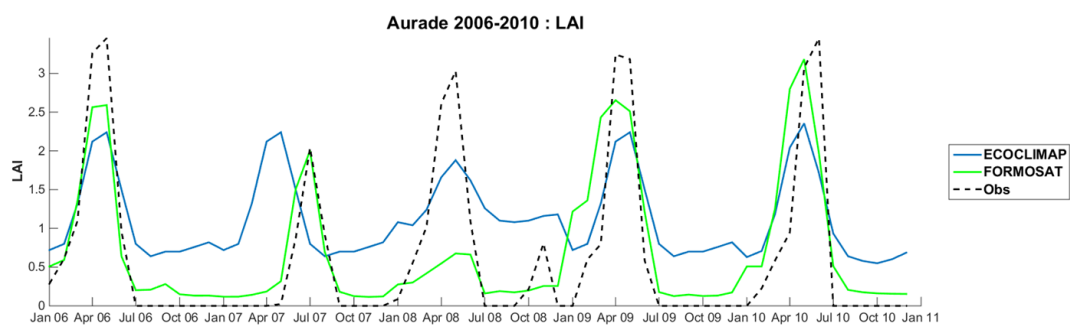
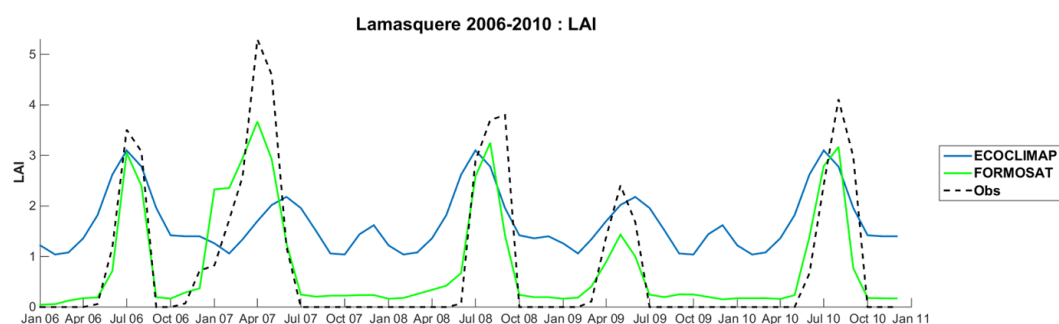


Figure I-2.4: Evapotranspiration time series for Auradé (a) and Lamasquère (b) for 2006. The gray filled areas represent the standard deviations for the measured time series.

Analyzing the results over the entire period (2006–2010) for both sites (Figs. I-2.5 and I-2.6) confirms what was observed in 2006. Indeed, the effect remains small on winter crops (Auradé: 2006 and 2009; Lamasquère: 2007 and 2009), but the delay in the evapotranspiration peak is clearly visible on summer crops (Auradé: 2007; Lamasquère: 2006, 2008 and 2010). The underestimation of the simulations is also visible for the Lamasquère site on 2008 and 2010 but not as marked in 2008. This point will also be discussed in Sect. 5.5.

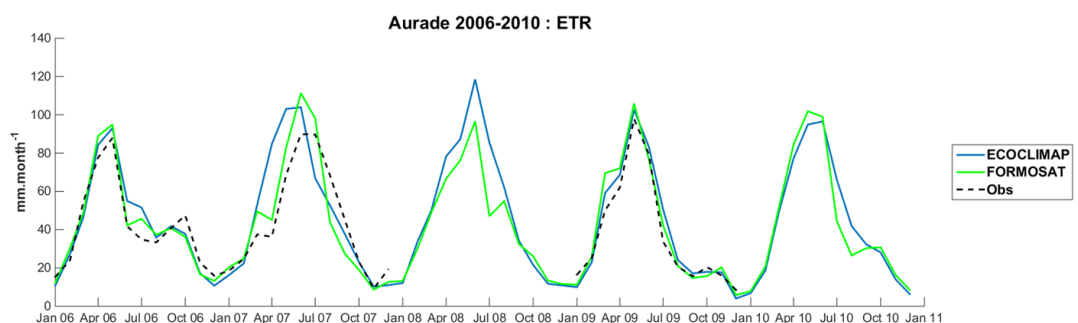


(a)

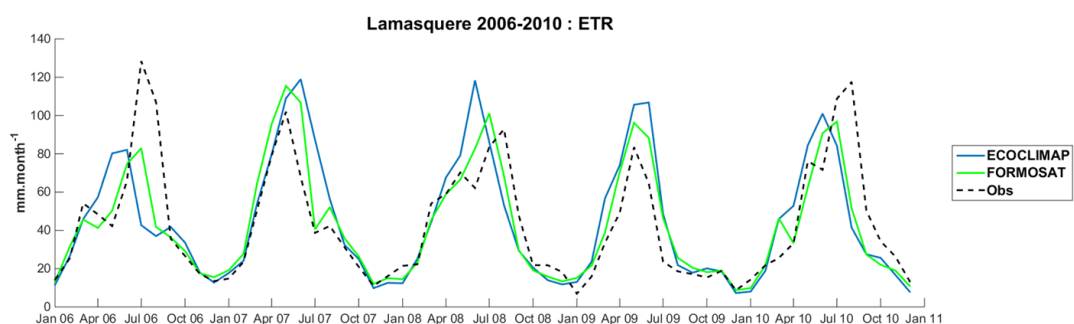


(b)

Figure I-2.5: LAI time series for Auradé (a) and Lamasquère (b) for 2006 to 2010. The crop type for each year is described in Tables I-2.2 and I-2.3.



(a)



(b)

Figure I-2.6: Evapotranspiration time series for Auradé (a) and Lamasquère (b) for 2006 to 2010. The crop type for each year is described in tables I-2.2 and I-2.3.

5.4.2 Spatial comparisons with the Formosat-2 image

We computed the correlation coefficient between the simulated evapotranspiration time series for both experiments for each plot of the study area. [Figure I-2.7](#) illustrates the distribution of correlation coefficients grouped by land cover type. A small correlation value denotes that the evapotranspiration time series are not in phase. Evapotranspiration patterns are not heavily modified outside of the crop fields ([Fig. I-2.7a](#)). It generates a correlation coefficient of almost 1 and low levels of value dispersion. From the crop areas, two populations can be identified: winter and summer crops. The temporal evolution of winter crop evapotranspiration (mostly wheat, C3) is not heavily modified ([Fig. I-2.7b](#)). However, the effect is much more significant for summer crops (mostly maize, C4; sunflower, C3; and soy, C3, plants). In this case the median correlation coefficient is lower than that of wheat. The degree of value dispersion is also considerable depending on the year ([Fig. I-2.7c and d](#)).

To further understand effects on hydrometeorological processes, we compared the monthly differences between both experiments on LAI and ET dynamics. The results were aggregated by averaging each variable of all of the C4 crop fields (maize and sorghum) for 2008 ([Fig. I-2.8a](#)). We also compared daily SWI ([Fig. I-2.8b](#)), drainage (DRAIN), and runoff ([Fig. I-2.8c](#)) differences. As observed previously ([Sect. 5.4.1](#)), the difference in ET denotes the delay in the evapotranspiration peak with a negative difference occurring during the spring (ECOCLIMAP is higher than FORMOSAT) and with a peak occurring during the summer ([Fig. I-2.8a](#)). It is strongly correlated with the difference in LAI. The lower LAI level occurring during the spring in the FORMOSAT experiment induces a lower transpiration level because the evaporative surface is restricted, thus enhancing stomatal resistance. As a result, the SWI in the FORMOSAT experiment remains higher than that of the ECOCLIMAP experiment until the summer ([Fig. I-2.8b](#)). Then more water remains available for evapotranspiration during summer. Consequently the ET is higher during this period according to FORMOSAT experimental results. This explains why the ET difference is positive during the summer even when there is almost no difference in LAI values between the experiments. In ISBA, drainage only occurs when the SWI is higher than 1 ([Le Moigne, 2012](#)). Hence, an increase in the SWI during the spring causes an increase in the drainage volume ([Fig. I-2.8c](#)). This increase can be significant over the year ([Table I-2.4](#)), averaging approximately 4% of annual precipitation and up to 8% for sunflower and wheat fields. Runoff is also affected by differences in the SWI ([Table I-2.5](#)) but in smaller proportions. Indeed, the function used in both of our experiments to simulate runoff is based on the premise that even when the SWI is lower than 1, rain can saturate part of a pixel's upper soil layer, thus generating runoff in the pixel. This runoff section of a pixel increases with soil moisture. This is not the case for drainage patterns, which require a saturation of the entire soil root and sub-root layers to occur. Thus, a higher SWI, even if it remains below a value of 1, suggests that a larger part of a

pixel is generating runoff, thus causing runoff levels to be higher in the FORMOSAT experiment (Fig. I-2.8c).

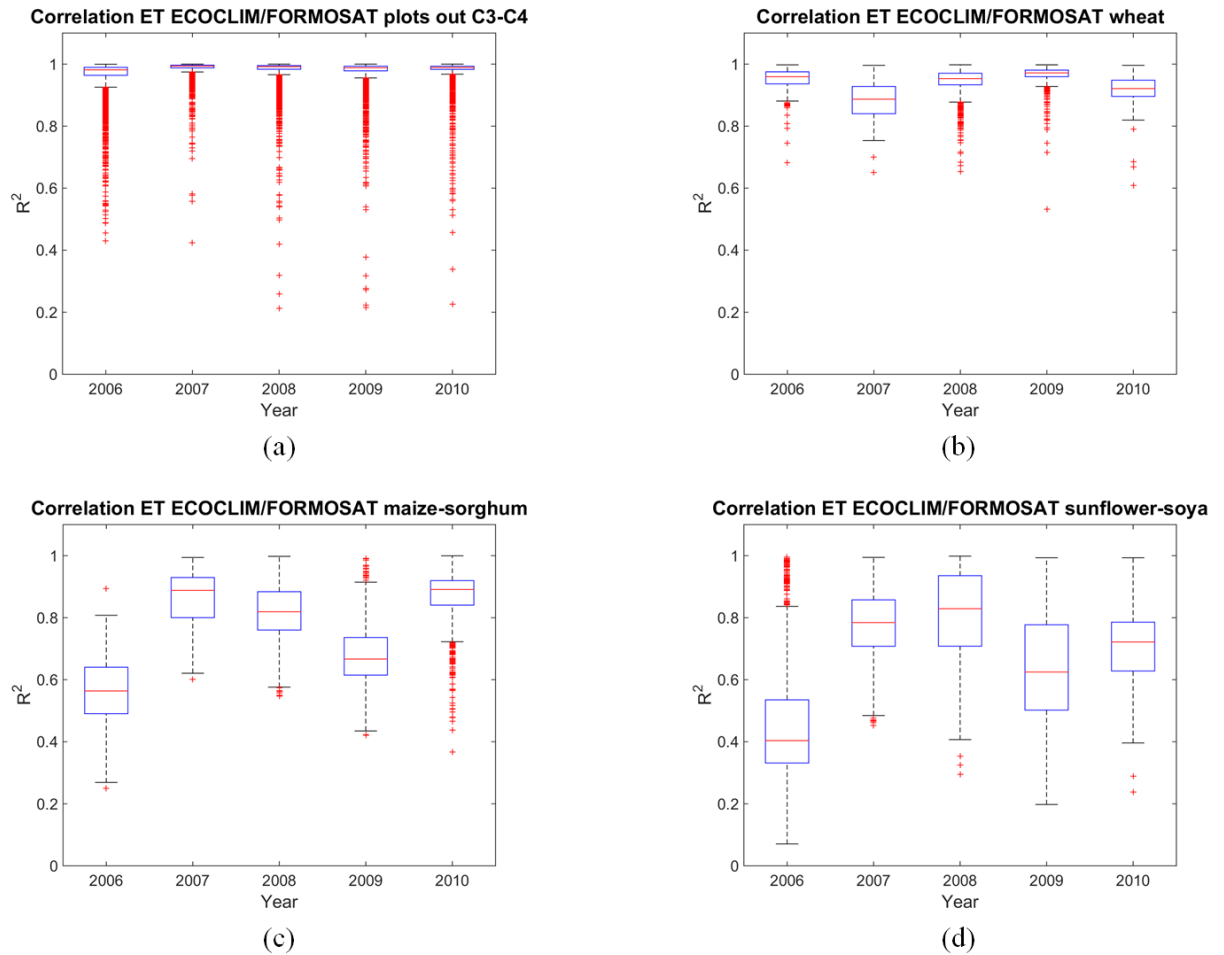
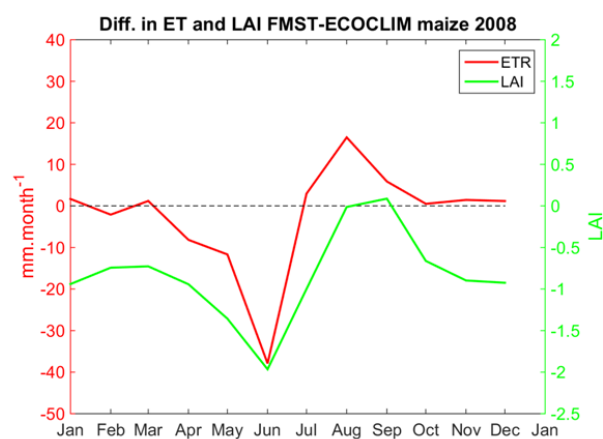
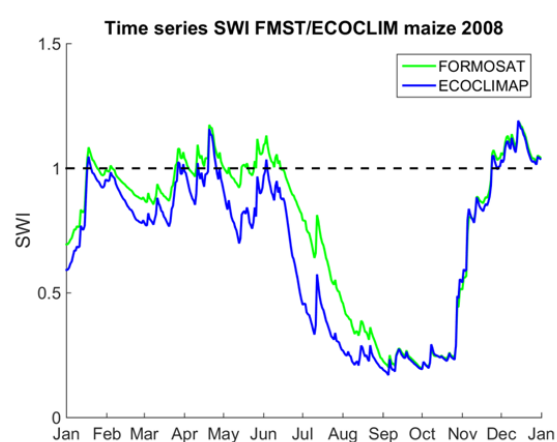


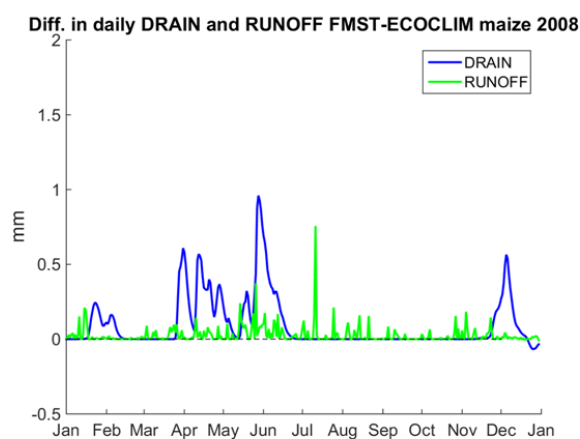
Figure I-2.7: Correlations between the evapotranspiration time series of the two experiments on: (a) uncultivated plots; (b) wheat crops; (c) C4 crops (maize and sorghum); and (d) sunflower and soy crops. The boxplots show the medians in red. Edges of each box represent quartiles whereas whiskers represent extreme values not considered as outliers (red dots for the outliers).



(a)



(b)



(c)

Figure I-2.8: (a) Differences (diff.) in LAI (green) and evapotranspiration (red) between the two experiments (FORMOSAT-ECOCLIMAP) ; (b) Time series of Soil Water Index; (c) Differences in drainage (blue) and runoff (green) values; Averaged across C4 crops for 2008

Vegetation type	2006	2007	2008	2009	2010	Interannual mean
Outside the crops	+15 (+2.9%)	+16 (+2.3%)	+41 (+5.3%)	+20 (+3.1%)	+30 (+4.7%)	+24 (+3.7%)
Wheat	-3 (-0.6%)	-1 (-0.2%)	+61 (+8.0%)	+15 (+2.3%)	+20 (+3.1%)	+18 (+2.8%)
Sunflower/soya	+5 (+0.9%)	+54 (+7.9%)	+47 (+6.1%)	+30 (+4.7%)	+48 (+7.5%)	+37 (+5.7%)
Maize/sorghum	+4 (+0.7%)	+35 (+5.2%)	+35 (+4.6%)	+18 (+2.8%)	+32 (+5.0%)	+25 (+3.8%)

Table I-2.4: Differences between FORMOSAT and ECOCLIMAP experiments on the annual drainage level in mm.yr-1 and the corresponding fraction of annual precipitations in % (FORMOSAT-ECOCLIMAP).

Vegetation type	2006	2007	2008	2009	2010	Interannual mean
Outside the crops	+3 (+0.6%)	+4 (+0.6%)	+7 (+0.9%)	+4 (+0.6%)	+4 (+0.7%)	+4 (+0.6%)
Wheat	+1 (+0.2%)	+5 (+0.7%)	+17 (+2.3%)	+7 (+1.1%)	+4 (+0.6%)	+7 (+1%)
Sunflower/soya	+7 (+1.4%)	+13 (+1.9%)	+10 (+1.4%)	+11 (+1.7%)	+13 (+2.0%)	+11 (+1.7%)
Maize/sorghum	+6 (+1.1%)	+9 (+1.3%)	+10 (+1.3%)	+9 (+1.4%)	+9 (+1.4%)	+9 (+1.3%)

Table I-2.5: Differences between FORMOSAT and ECOCLIMAP experiments on annual runoff in mm.yr-1 and the corresponding fraction of annual precipitations in % (FORMOSAT-ECOCLIMAP).

5.5 Discussion

5.5.1 Uncertainties with remote sensing data

Thanks to the high spatial resolution of Formosat-2, the plotscale modeling approach could be applied at regional scale. It allows one to distinguish the effects on specific vegetation types in the context of LSM studies. The revisit frequency is also sufficient to clearly monitor the phenological cycle and its critical stages at the plot scale. The local comparison between model and measurements ([Sect. 5.4.1](#)) clearly shows that the use of Formosat-2 (Sentinel-2 like) data allows the model to capture the seeding and harvest dates ([Figs. I-2.3 and I-2.5](#)) unlike with the ECOCLIMAP-II forcing. Note that the quality of the Formosat-2 acquisition is quite similar to that of Sentinel-2 ([Koetz et al., 2017](#)). In particular, the geolocation uncertainty is smaller than the size of a pixel, which allows precise extraction of LAI values from plot geometries. We thus assume that it has no impact given the erosion of the polygons within our LAI retrieval method ([Sect. 5.2.2.1](#)). The uncertainties with radiometry are also rather small compared to the measurements' uncertainties while the signal-to-noise ratio (SNR) is satisfying. The inner-field variability (green area, [Fig. 3](#)) is also clearly smaller than the measurements' uncertainties. However, some differences between the measured and remotely sensed LAI can be found. Particularly, the maximum LAI in Formosat-2 data tends to be lower than the measured one. This is due to a saturation effect of the remotely sensed LAI, pointed out by [Veloso et al. \(2012\)](#). But the impact on the simulated evapotranspiration amplitude is not significant, as shown by the example of a winter wheat field ([Figs. I-2.3a and I-2.4a](#)). The growth and senescence periods might also be inaccurate for some plots of the area, or even completely missing, because of the cloud obstruction. Indeed, cloud coverage is the main limitation of the use of optical remote sensing products. Even with such a high revisit frequency, a plot can remain obstructed over all the revisit dates during the phenologic cycle. The Auradé site in 2008 shows a typical example of this phenomenon ([Fig. I-2.5](#)). It means that for some regions of the world, like tropical regions where the cloud coverage is frequent, this method would not be appropriate.

5.5.2 Impact of remote sensing data on simulated evapotranspiration

The high-resolution LAI forcing has modified the simulated evapotranspiration, giving more realistic temporal dynamics. The uncertainties with eddy covariance measurements (gray area in Fig. I-2.4) are calculated from the frequency response correction uncertainty, the Webb correction (turbulent environment) uncertainty, the calibration correction uncertainty, and the random uncertainty, following Kroon et al. (2010). Total uncertainty is proportional to the flux itself, and therefore uncertainty grows with the evapotranspiration flux. However, these uncertainties remain very small, representing barely 5% of the flux value during summer. Another approach to evaluate the uncertainty is the verification of the energy budget closure. Béziat (2009) evaluated the energy budget closure on both sites for the period 2005–2007. His conclusion is that the uncertainty related is very acceptable, the energy budget being closed at around 85–90 %. The best results are obtained during the crop cycle. The difference between the evapotranspiration simulated in the ECOCLIMAP experiment and the measurements shows relative error exceeding 100% in spring and summer crops (Figs. I-2.4 and I-2.6). Thus, it exceeds by far the relative uncertainty expected from the eddy covariance measurements even while taking the energy budget closure uncertainty into account.

The results (Sect. 5.4) show that the effect is more significant on specific crops, i.e., summer crops like maize or sunflower. The impact on evapotranspiration seems to be quite similar for all summer crops fields. But the causes of this impact differ from one cultivation type to the next. The case of the maize crops (Figs. I-2.3b and I-2.8a) shows the limits of the ECOCLIMAP-II unmixing algorithm of MODIS LAI data. In the case of C4 crops, the ECOCLIMAP-II LAI remains far too high during winter and growth and senescence periods. The resulting fluxes are thus particularly affected (Figs. I-2.4b and I-2.8a). It may be attributable to (i) the unmixing algorithm itself, (ii) the temporal averaging method used to create the LAI climatology, or (iii) small woodland areas or strips of lawn between crops fields that cannot be resolved using MODIS, although they maintain moderate LAI values during the winter. The case of sunflower and soy crops (Fig. I-2.7b) is slightly different. These plants are considered as C3 crops like wheat. But the ECOCLIMAP-II phenology for C3 crops is mainly that of wheat in this region. Consequently, the sunflower is always simulated as wheat whereas their phenologies and hydrometeorological behaviors are very different. Replacing the C3 and C4 classes of ECOCLIMAP-II with a more detailed classification separating summer and winter crops could be of great interest for land surface modeling. Even with a MODIS LAI climatology based on the same unmixing algorithm, it could increase the precision of the simulated evapotranspiration especially for the summer crops. The interannual variability of the results on evapotranspiration (Fig. I-2.7) may be justified by the climatic conditions of each year. Indeed, climatic conditions influence the farmers' decisions

concerning the seeding and/or harvest dates. If these dates are closer than the ones simulated by ECOCLIMAP LAI, the effect on evapotranspiration is weaker.

5.5.3 Limitations and perspectives

Even if the evapotranspiration dynamic is more realistic when using Formosat-2 products, the model remains unable to simulate the actual amplitude of the measured evapotranspiration flux (Fig. I-2.4b). This is most likely due to the fact that the model does not simulate irrigation while the Lamasquère site was irrigated between June and August 2006 (147 mm). The same conclusion applies for 2010 for the Lamasquère site (Fig. I-2.6). Concerning 2008, also for Lamasquère, the precipitation amount was sufficient to limit the irrigation. Hence the amplitude of the measured evapotranspiration is lower. Thus the lack of irrigation in the model does not lead to a big difference with the measurements of the maximal amplitude of the evapotranspiration, in contrast with 2006 and 2010. Outside of the irrigation period, as well as on rain fed plots, the simulated evapotranspiration when the model is forced by the Formosat-2 appears really close to the measured evapotranspiration (Figs. I-2.4 and I-2.6). The discrepancy between the simulations and the measurements is larger than the observation uncertainties as computed with the method of Kroon et al. (2010, Fig. I-2.4). However, by considering the energy balance closure approach to estimate the observation errors (Béziat, 2009), the difference between the model and the observations is significant only during irrigation periods (Fig. I-2.6). Adding the measured irrigation rates to the SAFRAN precipitation forcing improves this simulation with respect to ET measurements (not shown here). Ignoring irrigation remains the main limitation of our study given that roughly 13% of the plots in our study area are irrigated. Including irrigation will improve the simulations (Garrigues et al., 2015). An automated irrigation module might therefore be a significant improvement even if it often relies on poorly known soil parameters, like the available water content for evapotranspiration depending on the field capacity, the wilting point, and the root depth. Incorporating irrigation rules similar to those of the MAELIA platform (Therond et al., 2014) could add up to the differences observed in this study and give even better results. Adding a new set of spatialized soil parameters, to estimate more efficiently the maximum available water content of the soil, could be of great interest. These issues will be addressed in the future. The spatialized comparison also shows that the soil water content, the drainage, and the runoff are significantly increased (Fig. I-2.8b and c), especially for summer crops. Such a difference in these fluxes could have an impact on the river discharge and groundwater recharge. Hence, further work is necessary to upscale this study at the scale of a river basin, which is the scale of the water management agencies. Sentinel-2A already images the Earth's land area at a similar radiometric spatial resolution than Formosat-2 over a 10-day revisit period. The optimal revisit period of 5 days should be achieved after the launch of Sentinel-2B. Scalable algorithms for crop-type mapping and LAI retrieval are now available (Li et al., 2015; Inglada et al., 2015), allowing for the processing of large areas. While the computation costs of the

hydrometeorological model at this spatial resolution may be an issue, the SURFEX modeling platform can run in parallel mode using the Message Passing Interface protocol. These advances could allow studying the impact on the river discharge.

5.6 Conclusion

This study deals with the inter-comparison between two spatialized hydrometeorological ISBA modeling approaches in an agricultural zone in southwestern France from year 2006 to 2010. A first experiment was performed with LAI forcing from ECOCLIMAP-II database which was generated from MODIS data. It was considered as the reference simulation. The second experiment included LAI forcing from high-resolution Formosat-2 (Sentinel-2 like) time series data. Both simulations were performed with plots as computing units, where plot segmentation was derived from Formosat-2 high-resolution land cover maps classifications. The use of the plot-scale approach allowed for exploiting the high spatial resolution on coherent hydrometeorological units while limiting the calculation time compared to a pixel-based approach. Thanks to the high revisit frequency of Formosat-2, the complex anthropogenic effects which affect land surface properties (e.g., seeding and harvest dates, crop rotations) can be captured. The comparison between the two experiments reveals significant differences in the simulated water fluxes. The results show that summer crop LAI dynamics appear more realistic when using Formosat-2 data. Consequently, the modeled evapotranspiration also appears more realistic on this kind of crop. These results point out the limitations of both the LAI retrieval method of ECOCLIMAP-II and the lack of interannual variability of the vegetation in the model. As expected, however, the incorporation of satellite LAI was not sufficient to capture the amplitude of the evapotranspiration peak in the validation site where irrigation is practiced. Indeed, there is no parameterization for irrigation practices in our model while the irrigated area is known to be 13% of plots in the study area. Hence, the focus will now be put on the representation of the irrigation in the model. This will allow further evaluation of the model at the catchment scale based on the observed river discharge.

6. Conclusion et analyses complémentaires

6.1 Conclusion : vers l'intégration de l'irrigation

Dans ce premier chapitre, l'objectif était de développer une méthode pour la prise en compte de la phénologie réelle des cultures dans le modèle de surface SURFEX-ISBA. Un des principaux enjeux était de réussir à exploiter le potentiel de produits satellite à haute résolution tout en limitant le temps de simulation. L'idée de discrétiser le domaine d'étude, non pas en mailles régulières, mais en parcelles de végétation homogène, sur la base des cartes d'occupation des sols issues des données satellite, a rendu cela possible. Cela permet une spatialisation de la simulation relativement peu couteuse en temps de calcul tout en conservant la capacité de la télédétection haute résolution à reproduire l'hétérogénéité spatiale et temporelle de la végétation. L'usage de produits de LAI issus de Formosat-2 a permis de montrer l'impact d'une non prise en compte des pratiques influençant la période culturale (rotation de cultures, choix des dates de semis et de récolte). En comparant l'usage d'une base de données climatologique et l'usage de LAI satellite ([section 5](#)), on remarque un impact relativement fort sur l'évapotranspiration, notamment sur les cultures d'été, où le cycle d'évapotranspiration peut se retrouver décalé d'un mois. Malgré une différence sur le volume annuel d'évapotranspiration relativement faible ([Table I-3](#)), cette différence de variabilité temporelle pourrait conduire, dans les agrosystèmes, à de fortes différences de répartition des flux à l'échelle du paysage ([Fig. I-3](#)), puisque les cultures d'été y représentent une grande part de l'occupation des sols. On peut donc penser qu'un couplage à un modèle météorologique ou climatique pourrait montrer des différences non négligeables sur l'évolution des variables atmosphériques.

Néanmoins, l'étude des années de maïs sur Lamasquère ([section 5.4.1](#)) montre qu'un biais relativement important sur l'amplitude du cycle d'évapotranspiration est visible durant l'été. Ce biais est lié à l'absence d'irrigation dans le modèle ([Fig. I-3.2](#)). Or, l'irrigation représente un flux hydrique très important, pouvant représenter jusqu'à 40% des précipitations reçues sur les parcelles irriguées. Cela impacte également l'hydrologie dans la mesure où cette eau va être prélevée dans la nappe, les rivières ou des retenues d'eau. Afin de palier à cela, je me suis attaché dans la seconde partie de la thèse à représenter une irrigation réaliste dans SURFEX-ISBA.

Type de végétation	2006	2007	2008	2009	2010
Hors cultures	-22 (-4.1%)	-25 (-3.6%)	-35 (-4.6%)	-30 (-4.7%)	-31 (-4.9%)
Blé	-6 (-1.1%)	-21 (-3.1%)	-60 (-7.8%)	-34 (-5.3%)	-18 (-2.9%)
Tournesol/soja	-19 (-3.7%)	-68 (-10.1%)	-36 (-4.7%)	-51 (-7.9%)	-51 (-8.1%)
Maïs/Sorgho	-7 (-1.4%)	-40 (-5.9%)	-28 (-3.7%)	-35 (-5.4%)	-32 (-5.0%)
Toutes parcelles	-19 (-3.6%)	-28 (-4.1%)	-39 (-5.1%)	-33 (-5.1%)	-31 (-4.9%)

Table I-3: Différence d'ETR, en mm, entre les expériences FORMOSAT et ECOCLIMAP par an et type de végétation. La valeur entre parenthèse représente l'équivalent en pourcentage des précipitations annuelles.

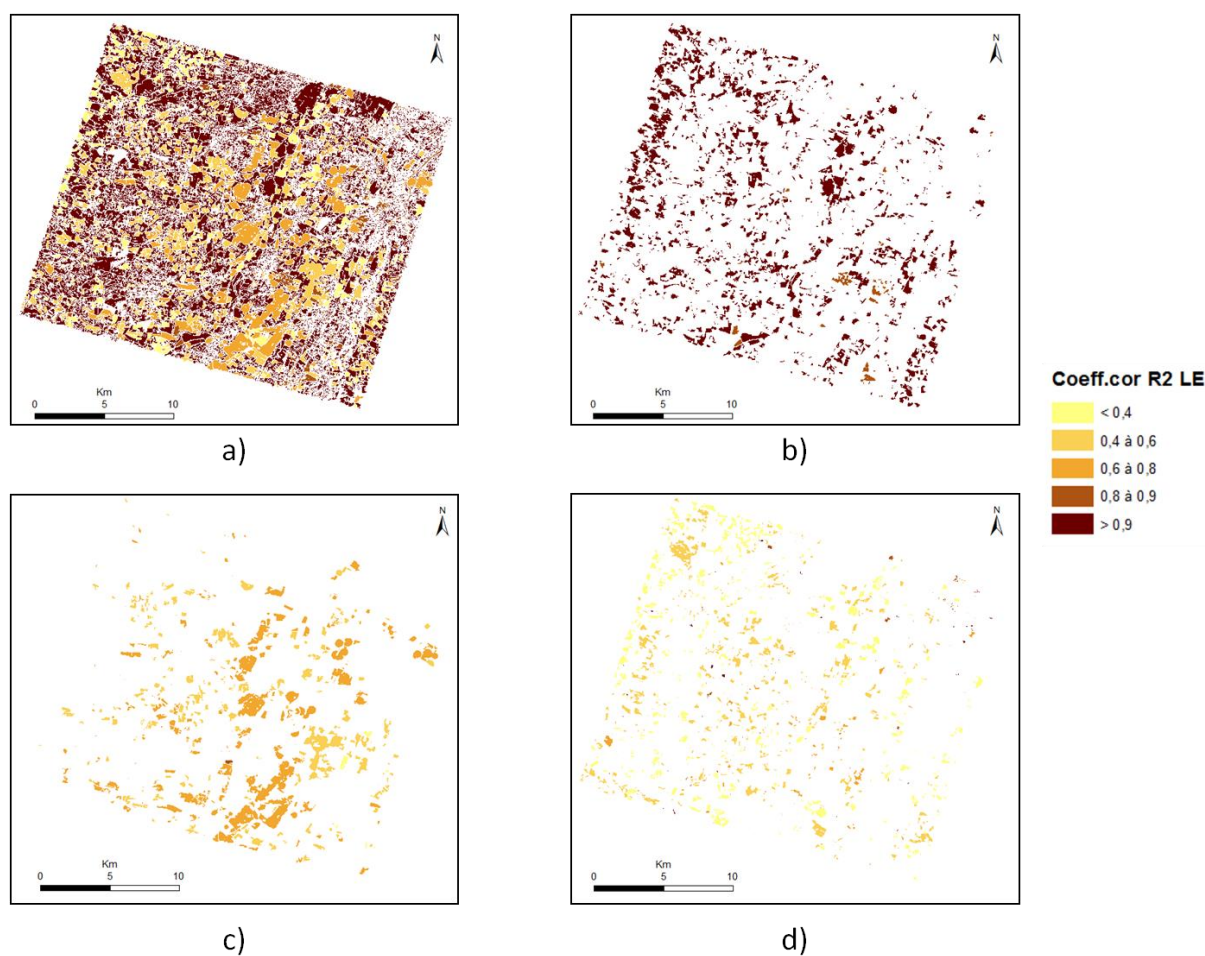


Figure I-3.1: Coefficient de corrélation entre les LE simulés par les expériences ECOCLIMAP et FORMOSAT en 2006. La figure a) montre toutes les parcelles, la b) uniquement le blé, la c) le maïs et la d) le tournesol et le soja.

6.2 Impact sur la modélisation hydrologique

L'étude précédente montre également que l'impact sur les flux d'eau, particulièrement le drainage vers la nappe et dans une moindre mesure le ruissellement, est notable sur les cultures. Afin d'estimer l'impact que cela peut avoir sur le débit des cours d'eau, la méthode présentée dans cet axe a également été appliquée, dans le cadre du projet RTRA-STAE REGARD, sur le bassin versant de la Save (Fig. I-4.1), cours d'eau affluent de la Garonne et coulant à quelques dizaines de kilomètres à l'Ouest de notre zone d'étude. Le climat y est similaire mais le relief y est un peu plus vallonné que sur la précédente zone d'étude. L'occupation des sols (Fig. I-4.2) est assez similaire sur la partie aval du bassin mais plutôt composée de prairies en partie amont. Le routage hydrologique de cette simulation a été réalisé par le CNRM grâce au modèle hydrologique MODCOU (Ledoux et al., 1989).

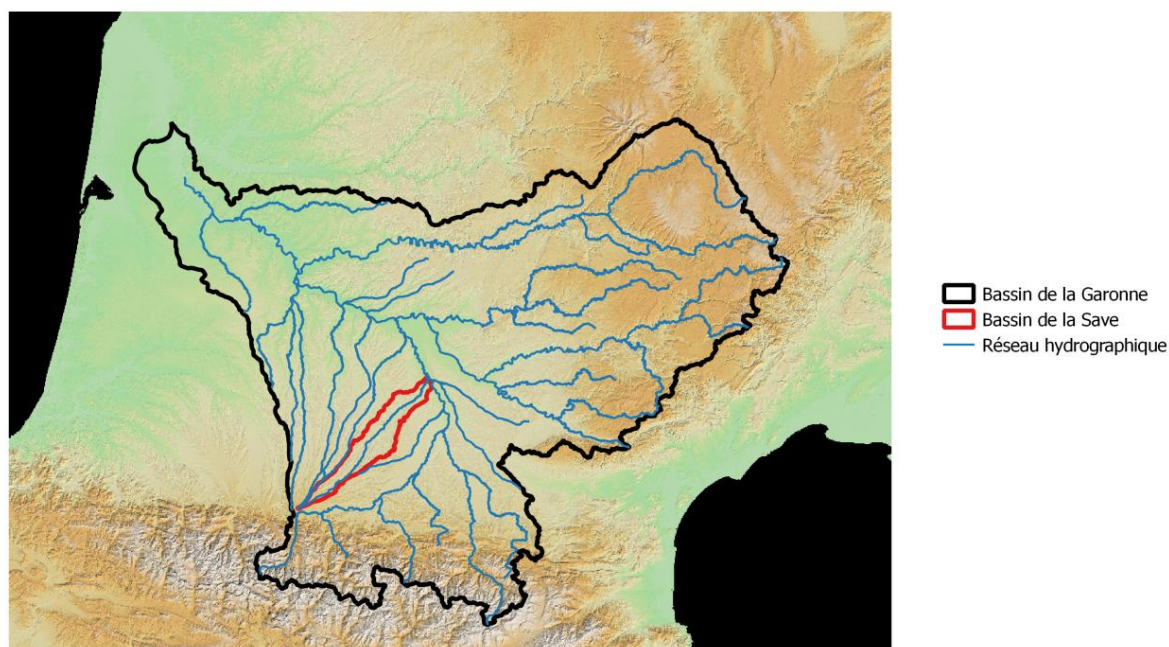


Figure I-4.1: Bassin versant de la Save

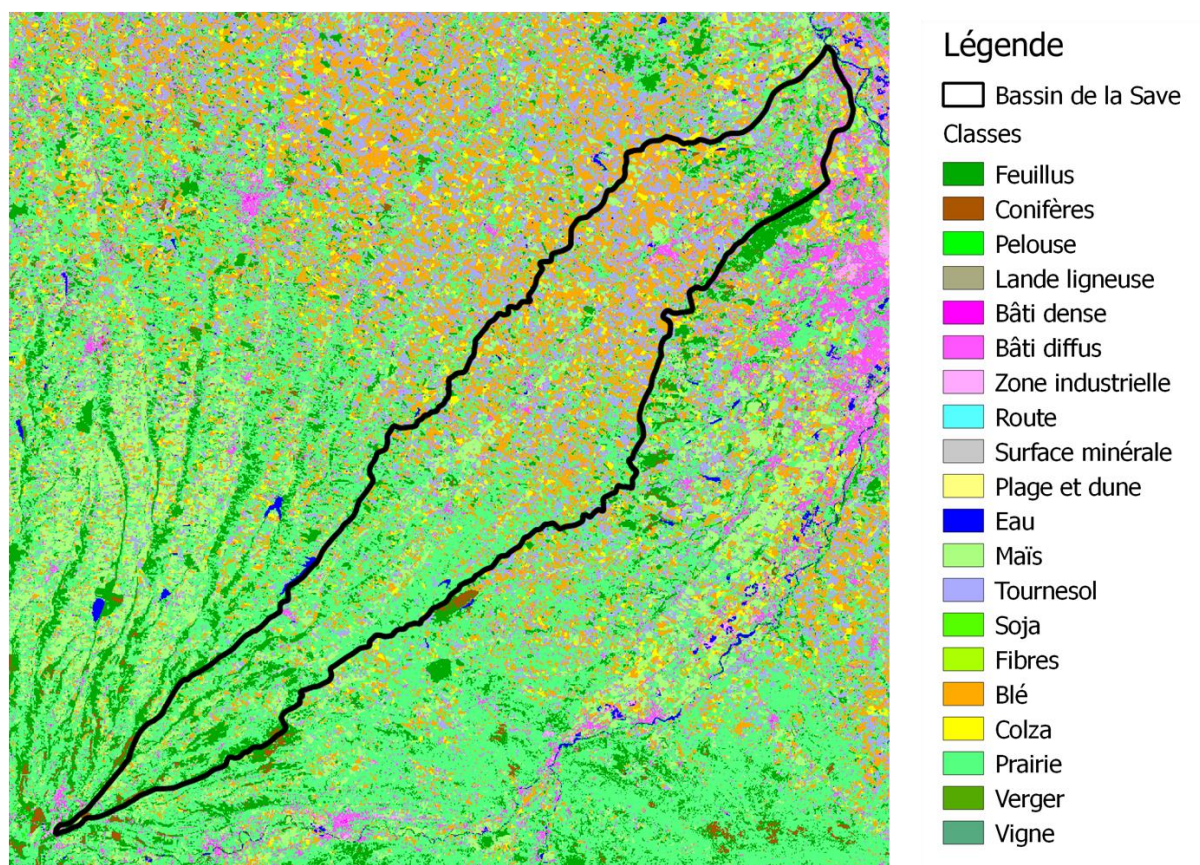


Figure I-4.2: Occupation des sols sur le bassin de la Save

La [figure I-4.3](#) montre la comparaison entre les débits simulés à l'exutoire du bassin pour l'année 2009, avec en entrée :

- une simulation de la surface par défaut à 8 km de résolution utilisant ECOCLIMAP-II réalisée par le CNRM, nommée CNRM.
- une simulation utilisant ECOCLIMAP-II mais effectuée par parcelles, à la manière de l'expérience REF en [section 5](#), nommée CESBIO_REF.
- une simulation utilisant des séries temporelles de LAI issues du réseau de neurones BVNET ([Sect. 5.2.2.1](#)), ainsi que des cartes d'occupation des sols issues de la chaîne IOTA2 ([Inglada et al., 2015](#)), toutes produites sur la base des données Landsat-5 (30 m de résolution, 16 jours de revisite), nommée CESBIO_LAI.

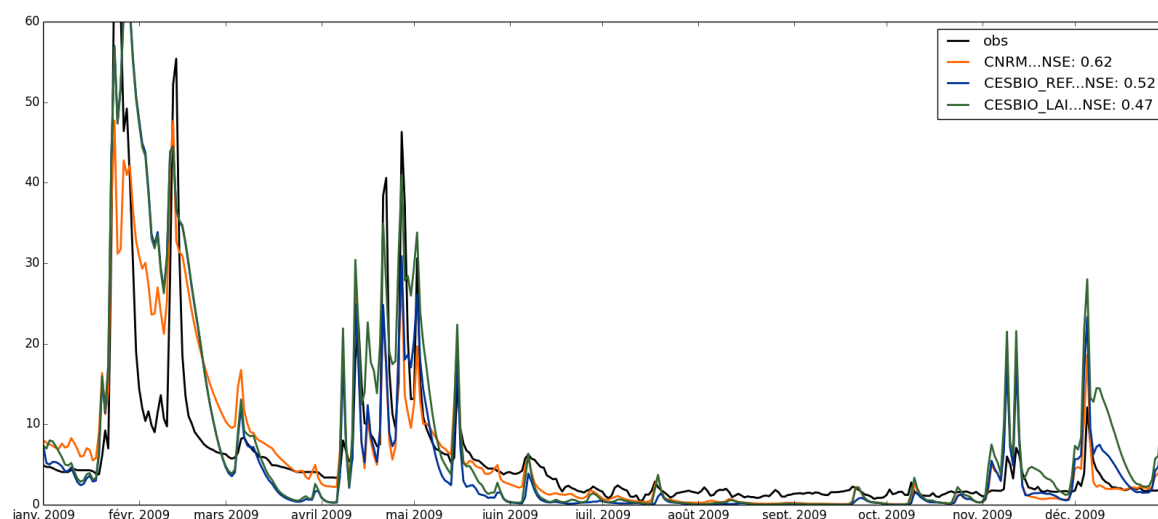


Figure I-4.3: Débits simulés et observé de la Save à la station de Larra (Haute-Garonne).

Il est tout d'abord intéressant de noter que les conclusions faites sur les flux hydrométéorologiques sur ce bassin versant sont les mêmes que celles présentées en [section 5](#). Les deux expériences CESBIO engendrent néanmoins une dégradation des débits simulés par rapport à la simulation CNRM, avec un critère de Nash ([Nash et Sutcliffe, 1970](#)) passant de 0.62 à 0.47. Le débit semble plus élevé en hautes-eaux et plus faible en basses-eaux que celui de l'expérience CNRM. Cette dégradation peut être expliquée par plusieurs facteurs. Premièrement, le routage hydrologique nécessite une agrégation des sorties de simulation de CESBIO_REF et CESBIO_LAI à 8km. Cette agrégation peut être une source importante d'incertitudes. La Save est également un cours d'eau alimenté en amont par le canal de la Neste, géré par la CACG. Ce canal sert essentiellement pour le soutien du débit d'étiage en été. Néanmoins, il n'a pas été pris en compte dans la simulation, ce qui induit des erreurs notables. Enfin, le routage hydrologique a été réalisé pour les trois expériences avec un même paramétrage de MODCOU, qui a été calibré pour fonctionner correctement à 8 km de résolution avec ECOCLIMAP-II en entrée. Cette paramétrisation pourrait ainsi ne pas être adaptée à une description aussi fine de la surface et des couverts. Réaliser un nouvel étalonnage sur la base des simulations intégrant du LAI satellite pourrait, au-delà de l'amélioration des performances de restitution des débits, permettre de rendre le paramétrage de MODCOU plus réaliste, du point de vue de la description de la surface. Enfin, cette simulation n'intègre pas l'irrigation et donc ne simule pas les différents prélèvements et retenues modulant le débit du cours d'eau à l'exutoire du bassin. Intégrer l'impact de l'irrigation et réaliser un étalonnage de MODCOU sur cette base permettrait potentiellement une restitution plus fidèle des débits.

Chapitre 2

Chapitre 2. : Représentation des pratiques d'irrigation et leur impact sur l'estimation de l'évapotranspiration

1. Introduction

1.1 Contexte et problématique

L'irrigation représente environ 70% de la consommation humaine en eau douce à l'échelle de la planète (WWAP, 2014). Estimer son usage est d'une importance cruciale, que ce soit pour des questions de sécurité alimentaire ou de gestion des usages de l'eau, dans un contexte de changement climatique et de raréfaction de la disponibilité de l'eau douce (Schewe et al., 2014). Bien prendre en compte l'irrigation dans les modèles hydrométéorologiques est donc très important, que ce soit pour l'optimisation des rendements à l'échelle de la parcelle ou la gestion des ressources à l'échelle du périmètre irrigué ou du bassin versant. Haddeland et al. (2006) ont ainsi montré que l'irrigation avait un impact notable sur les débits des rivières, principalement du fait du prélèvement de l'eau dans les cours d'eaux ou les aquifères (Leng et al., 2013, 2017). Son impact sur les flux hydrométéorologiques à grande échelle est significatif (De Rosnay et al., 2003 ; Lobell et al., 2009; Qian, et al., 2013), notamment l'augmentation de l'évapotranspiration, ainsi que la baisse du flux de chaleur sensible et de la température de surface, ce qui concorde bien avec les conclusions du chapitre 1. Le couplage à des modèles de circulation générale ou météorologiques a également montré un effet notable sur les variables atmosphériques, avec un refroidissement et une humidification des couches basses de l'atmosphère par rapport aux cultures non irriguées (Zaitchik et al., 2005; Ozdogan et al., 2010; Lawtson et al., 2015). Prendre en compte une irrigation réaliste dans les modèles s'avère donc important pour réaliser des prévisions météorologiques et climatiques plus précises.

Le CESBIO, via son implication dans différents projets, à l'image des projets ANR AMETHYST (<http://osr-cesbio.ups-tlse.fr/Amethyst/>), REC (<http://rec.isardsat.com/>) ou MAISEO (<http://www.pole-eau.com/Les-Projets/Projets-innovation-finances/Maiseo>), ou encore son implication dans des groupes de recherche inter-laboratoires comme l'UMT-EAU ou encore le CES THEIA « Cartographie des Surfaces Irriguées », fait de l'estimation spatialisée de l'irrigation un de ses principaux axes de recherche. Les travaux décrits dans ce second chapitre s'inscrivent dans ces différentes initiatives, prenant la suite des travaux de thèse de Sameh Saadi (Saadi et al., 2015) et de Marjorie Battude (Battude et al., 2017)

concernant l'estimation des volumes irrigués dans la modélisation hydrométéorologique des cultures.

1.3 Simulation automatique de l'irrigation dans les modèles hydrométéorologiques : état de l'art

L'irrigation est employée dans de nombreux agrosystèmes afin de soutenir la croissance et le rendement de certaines cultures, à l'image du maïs, qui, du fait des conditions climatiques, ne pourraient pas être rentables, voire ne pas pousser. On discerne trois grandes méthodes d'irrigation :

- **L'aspersion** : Il s'agit ici d'utiliser un système pulvérisant l'eau au-dessus de la canopée. Ces systèmes peuvent se déplacer automatiquement, à l'image des pivots d'irrigation ou des enrouleurs, afin de couvrir périodiquement de grandes surfaces avec peu d'intervention humaine, ou être fixes, nécessitant ainsi, soit un grand nombre d'asperseurs pour une couverture intégrale de la parcelle, soit une intervention humaine afin de déplacer le matériel régulièrement.
- **L'irrigation gravitaire** : Dans ce cas, l'eau est acheminée par des canaux vers les parcelles agricoles. L'ouverture d'une ou plusieurs vannes permet ensuite d'inonder la parcelle de manière gravitaire. Ce procédé convient particulièrement utilisé pour des cultures s'accommodant bien de la vie dans l'eau, comme le riz, mais peut également être pratiquée pour de l'arboriculture ou des cultures céréalières.
- **Le goutte-à-goutte** : Le goutte-à-goutte vise à réduire les pertes que peuvent engendrer les deux types d'irrigation précédents, du fait de l'évaporation de l'eau, interceptée par la canopée dans le cas de l'aspersion, ou à la surface du sol pour l'irrigation gravitaire. Il s'agit ici d'amener l'eau directement au pied de la culture via des tuyaux percés par endroits, alimentant les plantes avec des débits faibles mais de manière continue. Cette méthode convient ainsi particulièrement bien à l'arboriculture ou au maraichage, où les plantations par rangées se prêtent bien au positionnement des tuyaux et au positionnement des trous sur chaque individu.

L'eau utilisée pour l'irrigation peut être prélevée de différentes manières : depuis les cours d'eau existants, que ce soit par pompage ou gravitairement par des canaux, soit prélevée dans des lacs et retenues collinaires, ou enfin extraite par pompage dans des aquifères plus ou moins profonds.

Les modèles de surface simulent de manière assez simple l'irrigation. La grande majorité utilisent un seuil d'humidité du sol en zone racinaire comme critère de déclenchement des événements d'irrigation (Evans et Zaitchik, 2008; Lobell et al., 2009;

Ozdogan et al., 2010; Kueppers et Snyder, 2012; Williams et al., 2016). Ce seuil est le plus souvent défini comme un pourcentage de la capacité au champ, de l'humidité à saturation ou encore du SWI [Eq. I-2.1]. Ce pourcentage étant fixe spatialement et temporellement, il ne tient pas compte de la sensibilité au stress hydrique des cultures, qui peut varier très grandement d'une espèce à l'autre, nécessitant ainsi des volumes d'irrigation plus importants sur certaines cultures que sur d'autres. Certains modèles, plus rares, déclenchent l'irrigation lorsque la transpiration de la plante se retrouve limitée (De Rosnay et al., 2003; Haddeland et al., 2006) prenant ainsi en compte la phénologie de la plante. Dans toutes ces études, le volume d'irrigation est ensuite calculé de manière à combler le déficit d'eau dans le sol en zone racinaire par rapport à une humidité cible (Lobell et al., 2009; Kueppers et Snyder, 2012), qui bien souvent se résume à la capacité au champ (Haddeland et al., 2006; Evans et Zaitchik, 2008 ; Williams et al., 2016). Ce fonctionnement n'est pas très réaliste dans la mesure où les agriculteurs vont avoir tendance à ne pas ou peu faire varier leurs doses dans la saison et ne tiennent pas compte du déficit réel dans le sol. Seulement certaines études déterminent une saison d'irrigation, période durant laquelle le déclenchement d'un événement d'irrigation est possible (Evans et Zaitchik, 2008 ; Ozdogan et al., 2010 ; Pokhrel et al., 2011), les autres faisant l'hypothèse que la demande évaporative de l'atmosphère n'est pas suffisamment forte hors période de culture pour qu'un déclenchement de l'irrigation soit nécessaire, ce qui peut ne pas être vrai partout, notamment dans les agrosystèmes semi-arides. Ces modèles n'offrent ainsi pas les degrés de liberté nécessaires pour appliquer des pratiques d'irrigation théorique de manière spatialisée, possibilité qui serait intéressante pour pouvoir étudier l'impact de l'évolution des pratiques agricoles sur la modélisation de surface et ses couplages hydrologiques et météorologiques.

Les modèles de cultures, quant à eux, de par leur objectif de conseil aux agriculteurs, utilisent une description plus fine de l'irrigation. Ainsi, des modèles agronomiques détaillés, comme le modèle STICS (Brisson et al., 2008), utilisent des fonctions basées sur les différents indices de stress de la plante, nécessitant une connaissance approfondie du fonctionnement physiologique de la plante. STICS intègre également de nombreux paramètres liés à la conduite de l'irrigation comme le type d'irrigation (goutte-à-goutte, aspersion, etc.), la profondeur et la durée d'application, la saison d'irrigation ou même l'efficacité du réseau de distribution d'eau de l'agriculteur et la possibilité de déclencher un événement d'irrigation au semis en cas de sécheresse. Le modèle agro-économique multi-agents MAELIA (Therond et al., 2014) utilise quant à lui des règles décisionnelles encore plus poussées pour le déclenchement de l'irrigation, prenant non seulement en compte l'aspect physiologique des cultures et les contraintes sur le matériel d'irrigation, mais également l'analyse des agriculteurs concernant les cumuls de pluies antérieurs et prévus, ou encore la mise en place de restrictions d'eau par les services publics. Ces modèles sont cependant extrêmement difficiles à spatialiser de par le nombre et la complexité de leurs paramètres. D'autres modèles de culture ayant pour objectif la gestion de l'eau à l'échelle de la parcelle

ou du périmètre irrigué, utilisent des formulations pour le déclenchement automatique de l'irrigation assez proches de celles des modèles de surfaces, mais en intégrant certaines contraintes simples liées au matériel et à la conduite de l'irrigation. Ainsi SAFYE (Battude et al., 2017) utilise un seuil de SWI [Eq. I-2.1] en zone racinaire pour le déclenchement de l'irrigation, au même titre que SAMIR (Saadi et al., 2015) et SISPAT (Braud et al., 2013). Néanmoins, comme pour les modèles de surface, ce critère est fixe temporellement, empêchant de l'adapter selon les stades phénologiques, à l'instar de ce qui est préconisé par Arvalis ou la CACG. SAFYE et SAMIR utilisent ensuite une dose prescrite, ce qui n'est pas le cas de SISPAT, qui calcule le volume de chaque événement d'irrigation sur la base d'un déficit d'eau en zone racinaire par rapport à une humidité cible. Ces trois modèles intègrent également la possibilité de renseigner la période d'irrigation. SISPAT intègre quant à lui le type d'irrigation ainsi que la durée d'application, quand SAMIR utilise une contrainte sur la fréquence maximale des irrigations liée à la durée des tours d'eau sur certains matériels d'irrigation. Ces différents paramètres présentent l'avantage d'être accessibles dans de nombreux agrosystèmes auprès des agences en charge du conseil aux agriculteurs et de permettre de représenter de manière réaliste et relativement simple l'irrigation. Ces modèles ne permettant pas de couplage atmosphérique et hydrologiques directs, il apparaît intéressant de transposer ce type de schéma d'irrigation dans un modèle de surface.

2. Zone d'étude

Les travaux de ce second chapitre s'appuient sur un ensemble de parcelles de maïs irrigué, dont la parcelle de Lamasquère (chapitre 1 section 5.2.2.3), ainsi que celles suivies par la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG) à travers le département du Gers (Figure II-1.1). Le climat sur ces dernières est très similaire à celui de la zone d'étude du chapitre 1 (chapitre 1 section 3) mais le relief y est plus vallonné, à l'image de l'amont du bassin de la Save (chapitre 1 section 6.2). La CACG gère les ressources en eau dans de nombreux cours d'eau de la moitié ouest du piémont pyrénéen, dont la majeure partie (17) sont alimentés par le canal de la Neste. Ils suivent ces parcelles afin d'estimer le fonctionnement et la consommation en eau des cultures de maïs sur l'ensemble de leur territoire et ainsi adapter le débit du canal aux besoins. D'autre part, cela leur permet aussi d'émettre des recommandations aux agriculteurs concernant l'usage de l'eau. Pour chacune de ces parcelles, les itinéraires techniques, relevant toutes les opérations agricoles effectuées par les agriculteurs, sont disponibles, détaillant notamment les volumes et dates d'irrigation. Ces données ont été récoltées, pour les années 2013 et 2014, par Marjorie Battude dans le cadre du projet MAISEO. Elles sont disponibles sur 23 parcelles en 2013 et 13 parcelles en 2014. Pour certaines parcelles (10 en 2013 et 11 en 2014), des mesures à la tarière ainsi qu'un compte rendu d'expertise sur la profondeur et la typologie des sols est également disponible.

3. Démarche scientifique

SURFEX-ISBA, dans sa version 8.1, dispose d'un schéma d'irrigation automatique. Néanmoins, celui-ci n'est utilisable qu'avec le modèle de végétation activé (ISBA A-Gs). La première étape de mon travail a donc consisté à rendre l'usage de ce module d'irrigation possible dans n'importe quelle configuration du modèle, y compris en végétation forcée, à l'instar des travaux décrits dans le [chapitre 1](#). Ce module d'irrigation, décrit par [Sophie Voirin-Morel \(2003\)](#) a ainsi servi de référence pour la simulation de l'irrigation. Néanmoins, ce module possède plusieurs limitations. Premièrement, ce module a été pensé uniquement pour simuler l'irrigation du maïs en Europe de l'Ouest. De ce fait, plusieurs paramètres ont des valeurs fixées dans le modèle qui ne sont valables que pour le maïs, sans possibilité d'y appliquer une variation spatiale ou temporelle. C'est notamment le cas des conditions de déclenchement de l'irrigation, de leur fréquence maximale ainsi que de leur durée. Or, nombre d'autres cultures que le maïs peuvent être irriguées à l'échelle d'un paysage agricole. On pensera notamment au tournesol et au sorgho dans le sud-ouest. De même les céréales à paille, les arbres fruitiers ou encore le maraichage seront irriguées dans les régions semi-arides. Ces cultures présentent une gestion de l'irrigation tout à fait différente qu'il est impossible de représenter dans le modèle actuel. La seconde étape de mon travail a donc consisté à développer un module d'irrigation très similaire à l'existant mais donnant la possibilité de faire varier l'ensemble des paramètres, fixés dans la version par défaut, de manière spatiale et temporelle, et ainsi d'adapter l'irrigation à la culture et à la phénologie de chaque parcelle irriguée. Cependant, afin de pouvoir exploiter le potentiel de ce gain de flexibilité, il est nécessaire d'obtenir de l'information complémentaire. L'idée a donc été d'utiliser des recommandations émises par différents instituts publics ou privés (dans notre cas Arvalis et la CACG) concernant l'irrigation de chaque type de culture. Ces dernières présentent des règles de décision concernant le déclenchement de l'irrigation qui dépendent, entre autres, du stade phénologique des cultures. L'utilisation de l'information satellite concernant la phénologie de chaque parcelle, par l'usage d'un produit haute-résolution comme le LAI Formosat-2 décrit dans le [chapitre 1](#), peut ainsi permettre de spatialiser ces pratiques d'irrigation « type » et de les adapter pour chaque parcelle irriguée. Afin de montrer la plus-value que cette approche combinant expertise et télédétection peut avoir, j'ai appliqué cette méthode sur un ensemble de parcelles de maïs, décrites en [section 2](#), où des mesures précises d'irrigation ont été effectuées. Quatre expériences ont été réalisées : une première utilisant le module d'irrigation standard de SURFEX-ISBA avec ses paramètres par défaut, une seconde utilisant ce même module mais en déterminant la saison d'irrigation sur la base de données de LAI satellite, la troisième utilisant le nouveau module avec la saison d'irrigation déterminée à partir du LAI et un critère de déclenchement de l'irrigation fixe, recommandé par la FAO ([Allen et al., 1998](#)), à l'image de ce qui est actuellement utilisé dans SAFYE, et enfin la quatrième utilisant en plus le LAI comme proxy pour adapter la variation temporelle du critère de déclenchement de l'irrigation aux

pratiques recommandées par Arvalis et la CACG. Cette méthode est décrite en détail en [section 4](#).

4. Résultats soumis: Estimating irrigation in a land surface model with high resolution satellite imagery: application over maize crops in South-Western France

Jordi Etchanchu^{1,2}, Vincent Rivalland¹, Stéphanie Faroux³, Aurore Brut¹, Gilles Boulet¹

¹ CESBIO, Université de Toulouse, CNES, CNRS, IRD, UPS, INRA, Toulouse, France

² HSM, Université de Montpellier, CNRS, IRD, 34090 Montpellier, France

³ CNRM-GAME, Météo France, CNRS, Toulouse, France

Agricultural Water Management, soumis

4.1 Introduction

Nowadays Land Surface Models (LSM) are often used to forecast the water resources availability at basin scale ([Habets et al., 2008](#); [Tesemma et al., 2015](#)) as they can be coupled with meteorological and hydrological models. Hence, many developments in LSMs aim at tackling the issue of anthropogenic effects in the simulation of surface water and energy fluxes (introduction of farm dams, [Habets et al., 2014](#); urban heat island, [Chen et al., 2004](#)). Irrigation is one of the most important issues in agricultural areas. Indeed, about 70% of the global freshwater consumption is used for agriculture, mainly for irrigation ([WWAP, 2014](#)). Unfortunately irrigation is most often needed in periods with a relatively high water stress and low water availability. It is thus critical that water management agencies assess the use of irrigation water to forecast the water resources availability. By coupling LSMs with atmospheric or hydrological models, several studies evaluated the effects of irrigation on the water cycle. [Haddeland et al. \(2006\)](#) showed that irrigation can significantly impact rivers discharges. This effect is mainly due to the water uptake in the rivers themselves, but also reservoirs or aquifers ([Leng et al., 2013, 2017](#)). Irrigation also impacts the hydrometeorological fluxes and therefore the surface-atmosphere coupling. Particularly, it increases the latent heat flux and decreases the sensible heat flux compared to rain-fed crops ([De Rosnay et al., 2003](#); [Lobell et al., 2009](#), [Qian, 2013](#)). Consequently, there is a cooling effect of the irrigation as well as an increase of the humidity near the surface ([Zaitchik et al., 2005](#); [Ozdogan et al., 2010](#); [Lawtson et al., 2015](#)). Those studies show that modeling realistic irrigation practices is a major issue not only to monitor the water

resources and assess its future availability, but also to provide realistic lower boundary conditions for the atmosphere.

The most common way used to simulate irrigation in LSMs is to trigger irrigation events based on a fixed soil moisture threshold. When the soil moisture drops below this threshold, irrigation occurs (Evans and Zaitchik, 2008; Lobell et al. 2009, Kueppers and Snyders, 2012, Williams et al., 2016). Some studies include phenological considerations by using a triggering threshold on evapotranspiration (De Rosnay et al., 2003) or linking the soil moisture threshold to the stress level of the different crops (Haddeland et al., 2006; Pokhrel et al., 2011; Leng et al., 2013). The irrigation amount for each event is then determined by evaluating the water needed to replenish the soil to its field capacity (Haddeland et al., 2006, Evans and Zaitchik, 2008, Willimas et al., 2016) or to a level where the plant is assumed to avoid water stress (Lobell et al., 2009; Pokhrel et al., 2011, Leng et al., 2013). Some of these studies do not account for an explicit irrigation season (De Rosnay et al., 2003, Lobell et al., 2009, Leng et al., 2013). So they rely on the assumption that the irrigation will trigger only in the cropping period when the soil moisture is the most likely to drop under the prescribe threshold. Others base their irrigation season on climatologic values (Evans et Zaitchik, 2008, Ozdogan et al., 2010, Pokhrel et al., 2011). Such fixed climatological parameterizations, calibrated on statistics on irrigated areas such as the Food and Agriculture Organization (FAO, Siebert et al., 2013) one, are very relevant for regional to global scale applications, as it can give a quite realistic integrated estimation over large agricultural areas. However, each agricultural area has its own specificities, like crop varieties or particular agricultural practices which can deeply impact the irrigation demand spatially and temporally. These specificities must be taken into account to accurately simulate the irrigation demand at the water management scale (i.e. catchment scale) and thus the impact on water availability.

Agro-hydrological models, like SAFYE (Battude et al., 2017) or SAMIR (Saadi et al., 2015), are meant for water management and farmer advice at the farm scale. Their irrigation schemes explicitly accounts for irrigation management rules. Particularly, it allows the user to prescribe the irrigation period and the amount for each event. They also include rules inherent to the irrigation material or the crop management, like the minimal return period between two irrigation events or the drying period before harvest for cereals. However, they also use fixed irrigation threshold. This means that the irrigation practice cannot be modulated according to the crop growth stage. Agronomic models like STICS (Brisson-Cohen et al., 2009) or MAELIA (Therond et al., 2014) offer this possibility. But using these two kinds of models over an entire catchment is difficult due to the number of input data they need, besides the irrigation parameters, and their inability to simulate other land surfaces than crops. A recent study (Chen et al., 2019) showed the interest of integrating more detailed irrigation practices in a LSM to forecast the water demand or evaluate the impact of irrigation scenarios on the water resources. Hence, the present study proposes to adapt the irrigation scheme of agro-hydrological models into the SURFEX-ISBA (Noilhan et Planton,

1989, Masson et al., 2013) LSM to simulate irrigation demand over the most common irrigated crops in South-Western France: maize. This adaptation is a critical issue to manage the rivers discharge particularly in low-water period. This way, the model can integrate information about actual irrigation practices available on our study area, which is impossible with climatological parameterization of LSMs classical irrigation schemes..

In South-Western France, agricultural and water management agencies, such as the Compagnie d'Aménagement des Côtes de Gascogne (CACG) or Arvalis, are in charge of advising the farmers about irrigation practices and crop management from department to national scale. These agencies have expertise about such practices that we can valorize to perform a better irrigation simulation in SURFEX-ISBA. As these advised practices are not only dependent on the crop types but also on the growth stages, it is important to also gather accurate information about actual crop phenology. But such information cannot be monitored in-situ for each plot at the catchment scale. This problem can be overcome with the use of high spatial and temporal resolution imagery which allows observations and determination of the land cover and vegetation parameters (e.g. fraction cover, leaf area index) with a great precision. Particularly, it can monitor the actual phenological cycle of the crops (Etchanchu et al., 2017). It could thus offer precious information to assess more accurately the crops water needs. It could also allow to spatially adapting the practices to the hydrometeorological and growing conditions of each irrigated plot and consequently simulate a realistic irrigation demand. Some of the studies mentioned above already make use of satellite earth observation for irrigation estimations. But it mainly consists in classifying irrigated pixels, or correcting the previously mentioned irrigated areas maps with MODIS data (Ozdogan and Gutman, 2008; Evans and Zaitchik, 2008; Leng et al., 2013). The resolution of MODIS (500m) is unsuitable for the determination of irrigation rules in Western Europe because a MODIS pixel usually contains mixed cover types. This limitation is largely overridden by using high-resolution satellite data like LANDSAT, SPOT or the recent SENTINEL-2. Saadi et al. (2015) or Battude et al. (2017) already showed the potential of high-resolution products on determining the beginning and ending of the irrigation period in distributed semi-empirical crop models. However, these two studies do not make use of remote sensing to dynamically modulate the irrigation triggering level with the actual phenology, as recommended by agricultural management agencies

Hence, the present study suggests a method to use high resolution satellite products combined to the available expertise data about irrigation of maize crops in South-Western France as input information in the proposed irrigation scheme to estimate irrigation demand. A plot-by-plot validation is carried out on 24 plot samples during 2013 and 2014. We compare the simulated and observed irrigation volumes on each plot as well as the timing of the irrigations. Then, an evaluation of the impact on evapotranspiration is performed by comparing with the eddy-covariance measurements of an instrumented site in the same region.

4.2 Model and data

4.2.1 SURFEX-ISBA model

4.2.1.1 Model overview

EXTERNALIZED SURFACE (SURFEX) is a modeling platform developed by the CNRM/Meteo-France. It aims at modeling the water and energy transfers between the surface and the atmosphere ([Masson et al., 2013](#)). The version used in this study is the version 8.1. Within SURFEX, the model in charge of the simulation of the natural land surface is Interactions between Surface Biosphere Atmosphere (ISBA, [Noilhan et Planton, 1989](#)). ISBA uses meteorological forcing and land cover parameters for 19 plant functional types (PFT) to simulate coupled energy and water budgets. The computation cells can be composed of several patches with different PFT which are simulated separately. However, in this study, we used a single PFT for each cell.

We use the model's version with non-dynamic vegetation as the vegetation dynamics is entirely forced by satellite data. The water transfer in the soil is modeled with a two layers force-restore approach ([Deardorff, 1977](#)). The first layer is the shallow topsoil layer. The second layer is the root-zone layer. This approach was integrated in ISBA by [Mahfouf et Noilhan \(1996\)](#). Water in the surface layer is drained and restored dynamically depending on the water content gradient between both layers. A gravitational drainage flux is simulated when the soil water content of a layer exceeds the field capacity. In the version used here, runoff only occurs when the surface layer is saturated. Concerning the energy fluxes, a unique energy budget is simulated for each vegetation type on the vegetation-soil layers composite by a single source scheme. A single surface temperature is used to solve the energy budget. This method is described by [Noilhan and Planton \(1989\)](#).

Concerning the irrigation, SURFEX-ISBA already incorporates a scheme that uses a 4 stages approach described by [Voirin-Morel \(2003\)](#). This version need three parameters from the user: the dates of the first and last irrigation possible, and the water amount applied for an irrigation event. Other parameters are fixed in the model. By default, the irrigation period spans from the 10th of May till the 1st of November and the amount of each irrigation event is 30mm. Between these two dates, a soil moisture threshold is defined as in most LSMs ([Sect. 4.1](#)). The principle consists of a threshold that changes between the stages. Each stage is characterized by a different threshold. When the water content in the root-zone layer drops below this threshold, an irrigation event is triggered. The water depth is thus added to the precipitations of the current computation time-step. Then the model reaches the second stage and uses another threshold for the next irrigation event. Irrigation cannot be triggered again within one day after the previous was applied. When the model reaches the fourth stage, the same threshold value is used for all the subsequent triggers.

The threshold (named F2T hereafter) for each stage is defined as a fraction of the maximum available water content for root extraction (AWC_{max}) expressed in mm:

$$AWC_{max} = (W_{fc} - W_{wilt}) * D_{root} \quad [Eq. II-1.1]$$

where W_{fc} is the volumetric soil water content at field capacity, W_{wilt} the volumetric soil water content at wilting point and D_{root} the rootdepth. To evaluate if an irrigation is needed, the model computes the current available water content (AWC) defined as follows:

$$AWC = (W - W_{wilt}) * D_{root} \quad [Eq. II-1.2]$$

where W is the current volumetric soil water content. An irrigation event is triggered if AWC falls below a threshold defined as a fraction of the maximum AWC:

$$AWC \leq (F2T * AWC_{max}) / 100. \quad [Eq. II-1.3]$$

The values are the following: F2T=70% for the first stage, F2T=55% for the second, F2T=40% for the third and F2T=25% for the last stage. The decreasing values for F2T were fixed by [Voirin-Morel \(2003\)](#) to account for the root growth of the crop. Indeed, SURFEX-ISBA does not simulate the rooting depth evolution of the plants. It only uses a fixed root depth parameter which corresponds to the estimated rooting depth when the plant is mature. But the actual roots are only shallow in the first growth stages. Hence the effective AWC_{max} is lower than the one estimated by the model. As the water fluxes that enter and leave the soil-vegetation system are expressed in mm, the actual AWC/AWC_{max} varies faster than the one simulated. For example, if the evapotranspiration flux is 5mm per day, then the filling rate of a soil where $AWC_{max}=50$ mm will decrease by 10% whereas a soil with $AWC_{max}=100$ mm will only lose 5%. Hence, farmers are particularly cautious at the beginning of the growth period to avoid water stress. To translate it in the model, the threshold for the first stage is high and decreases through the stages while the actual root depth reaches the value fixed in the model.

This irrigation scheme is initially designed exclusively for maize crops in Western Europe. Indeed, it is the main irrigated crop, representing, for example, 48% of the irrigated surface in France in 2010 ([SSP-AGRESTE, 2012](#)). Therefore, the only way to simulate irrigation in SURFEX-ISBA is to set the irrigated grid cells patches to the irrigated C4 crops PFT instead of their actual PFT ([Masson & al., 2013](#)). Consequently, all irrigated crops are simulated as irrigated maize. But many other crops than maize are actually irrigated, like soya or sunflower for example. They have very different land cover parameters and functional types. This scheme has several other limitations too. First, the fact that the irrigation is applied on a single computation time step is not hydrologically realistic while computing with hourly or infra-hourly time steps as it could generate too much drainage or runoff. Also, the root growth is not simulated in diagnostic mode in ISBA. Hence the thresholds may not be adapted to this context. The 4 stages approach also does not take any information on the actual phenological cycle into account. It could lead to unrealistic

irrigation timing. This approach also cannot take into account the crop sensitivity to water stress which depends on the growth stage. For example, the maize is particularly sensitive to water stress during the flowering period whereas the sunflower has a high risk of disease if irrigated during the flowering period. That is why irrigation practices advised to the farmers by agricultural management agencies rely most of the time on the crop growth stages. These reasons lead us to develop a more flexible irrigation scheme for SURFEX-ISBA.

4.2.1.2 Irrigation scheme development

To include a more realistic irrigation management, we have developed a new irrigation scheme for SURFEX-ISBA. The goal was to develop a scheme which can ingest supplementary information about the irrigation practices and be adapted spatially and temporally to each plot. In this scheme, seven parameters are required from the user: the dates of first and last possible irrigation, which depends on the growing period of the crop, the water amount of an irrigation event, the duration of each irrigation event, the minimal return interval between two successive irrigations, the irrigation type and the soil moisture threshold that triggers irrigation. The irrigation duration allows spreading the water depth within a certain time lapse, as it is done in some studies ([De Rosnay et al., 2003](#), [Leng et al., 2017](#)), instead of a single time step. For short computation time-steps, like half-hourly or hourly time steps, it is assumed to be more realistic on a hydrological point of view than applying the water on a single time-step. Indeed, it generates less drainage and runoff. When estimating the available water resources, it also spreads the water uptake on a longer time span. It may results in a very different pressure on the water resources. The minimal return interval between two irrigation events, unrealistically fixed at one day in the previous scheme ([Sect. 4.2.1.1](#)), is meant to represent the physical constraints on the water allocation, such as those defined by the network of canals or pipes. For example, pivot irrigation systems cannot irrigate the entire field at the same time. It needs a certain time to irrigate again a specific part of the field after doing an entire turn to irrigate the other parts. In case of flood irrigation, this parameter translates the fact that the farmers must wait for their turn before opening the channels to their plots.

The irrigation type can be chosen amongst four different types: no irrigation, spray, drip or flood irrigation. This way, all vegetation patches can potentially be irrigated depending on the user's choice. This feature is new in SURFEX-ISBA since, up to now, only C4 crops could be irrigated. Changing the irrigation type option determines if the minimal return time must be applied or not. This parameter is applied only in spray and flood irrigation. During spray irrigation, the water is added to the precipitations at the top of the canopy, as in the previous scheme. For drip and flood irrigation, the water is applied at the top of the soil surface layer, below the canopy interception reservoir. In this study, we will only use the spray irrigation option. As in most of the models presented in [section 4.1](#) ([Lobell et al., 2009](#); [Ozdogan et al., 2010](#), [Battude et al., 2017](#)), irrigation is triggered when the water content in the root-zone soil layer drops below a threshold. This threshold is the most critical

parameter in the scheme as it completely pilots the timing of the irrigation events. The novelty of our scheme is that the threshold can be forced spatially and temporally. Indeed, the threshold can differ from a computation cell to another and the user can force different values during time, on a daily, ten-days or monthly basis with maps as inputs. Contrarily to all of the schemes mentioned in [section 4.1](#), it allows the user to modulate the irrigation triggering rules based on its knowledge of the simulated area.

In summary, this irrigation scheme uses the same parameters as most of the schemes developed for LSMs ([Evans and Zaitchik, 2008](#); [Lobell et al., 2008](#); [Pokhrel et al., 2011](#); [Williams et al., 2016](#)) but gives the possibility to force a spatial and/or temporal distribution on most of them, as done in agro-hydrological models ([Saadi et al., 2015](#); [Battude et al., 2017](#)). It thus offers the possibility to adapt the scheme to a wide variety of crops and irrigation management types while maintaining the possibility to use climatological values as default set of parameters. Agricultural management agencies often give advice about irrigation triggering depending on the crop growth stages. High resolution remote sensing data give precious information about the phenology of each plot and allow detecting these stages. Such information could thus be used to drive the parameter of this irrigation scheme, especially the delimitation of the irrigation season and the temporal evolution of the triggering threshold for each plot.

4.2.2 Datasets

4.2.2.1 Meteorological and land surface forcing data

The meteorological data used to force the model in this study are drawn from the Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige (SAFRAN, [Durand et al. 1993](#)) reanalysis data ([Quintana et al., 2008](#)). It provides precipitations (in solid and liquid form), air temperature and specific humidity at 2 meters, air pressure, wind and solar radiation data at hourly time intervals on an 8 km resolution grid. These data were spatially linearly interpolated to match plot centroïds. For the soil parameters, we first used the Harmonized World Soil Database ([FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2012](#)), which gives the percentage of clay and sand at a 30 arc-second (~1 km) resolution. This database is used by default in SURFEX-ISBA. Soil parameters are then calculated by the model with empirical pedotransfer functions ([Noilhan and Lacarrère, 1995](#)).

By default, SURFEX-ISBA uses the 1-km resolution ECOCLIMAP-II database ([Faroux et al., 2013](#)). This dataset describes land cover parameters as root depth, minimal stomatal resistance, albedo and LAI. The parameters evolving in time, like the LAI, are described with an average annual cycle based on climatological records, such as 7-years long MODIS LAI time series (1999-2005). As using a climatology is not sufficient to monitor the vegetation cycle and diagnose water needs, the LAI is derived from satellite imagery ([Sect. 4.2.2.2](#)). But most of the other land surface parameters were taken into the ECOCLIMAP-II database. As

the simulated plots are exclusively maize plots in this study, only the root depth was forced, first with an empirical value of 0.9m, then with measured values.

4.2.2.2 Satellite Leaf Area Index

[Chen and Black \(1992\)](#) defined the Leaf Area Index (LAI) as “half of the total developed area of green (i.e. photosynthetic active) leaves per unit ground horizontal surface area”. It corresponds to the surface of the plant which can contribute to the energy and water exchange with the atmosphere. It is often used in LSMs ([Liang et al, 1994](#); [Oleson et al., 2008](#); [Best et al., 2011](#)) as a proxy to represent the plant growth and thus, to scale the evapotranspiration of the plants. As the phenological cycle is determinant in the irrigation management, a LAI climatology is not sufficiently accurate in our study. Hence determining the LAI from high resolution satellite imagery allows taking the actual crop cycle into account in the model ([Etchanchu et al., 2017](#)).

Given the fact that the study focuses on years prior to Sentinel-2 launch (10 m resolution, 5 days revisit), we decided to combine different satellite data to obtain a good revisit frequency. Thus we used data from Formosat-2, Landsat-8, SPOT-4 and SPOT-5. Formosat-2 is a Taiwanese satellite launched by the NSPO in 2004 and decommissioned in 2016. It could generate daily multispectral images of the Earth's surface at an 8 m resolution. It did not make systematic acquisitions but work on tasking mode instead. The acquisitions had to be scheduled for specific areas. Its sensor detected the radiations within four frequency bands in blue, green, red and near-infrared. Landsat-8 is an American satellite launched by the NASA in 2013. The optical sensor acquires in nine frequency bands : blue, green, red, near infra-red, two bands for mid infra-red, a panchromatic band and two bands respectively dedicated to aerosols and cirrus detection. Its spatial resolution is of 30m. Its revisit time is 16 days. SPOT-4 is a French satellite created in collaboration with Belgium and Sweden. It was launched by the CNES in 1998 and finished its mission in 2013. Acquisitions were done on five frequency bands: green, red, near and mid infra-red, and a panchromatic band. It had a 20 m spatial resolution. Its temporal cycle was of 26 days. However, its adjustable mirrors allowed lateral acquisition on defined sites, giving it a 3 to 5 days revisit frequency. SPOT-5 was the successor of SPOT-4. It was launched in 2002 and ended its mission in 2015. Acquisitions were done on the same bands as SPOT-4 but with a 10m spatial resolution. It also had adjustable mirrors to increase its revisit frequency to 3 to 5 days too.

All the measured reflectances have undergone geometric, atmospheric and radiometric corrections as well as a cloud detection filtering ([Hagolle et al., 2008 and 2010](#)).

To estimate the LAI, we used the neural network tool BV-NET, which inverts the PROSAIL radiative transfer model ([Weiss et al., 2002](#); [Claverie, 2012](#)). This neural network deduces a set of vegetation parameters (among them the LAI and the vegetation fraction cover, FCOVER) from the reflectance values for each pixel. It thus generates 8-m resolution

LAI maps for each date and pixels without cloud obstruction. As BV-NET has a different calibration for each satellite sensor, there is a good consistency between the LAI produced with the data of the different sensors (Rivalland et al., 2006).

The time series of LAI maps were spatially averaged on the plots sampled during this study (Sect. 4.2.2.3 and 4.2.2.4). Indeed, the plot is the irrigation management unit. The vegetation inside a plot is also considered homogeneous enough to not take into account intra-plot variability. This hypothesis allows saving consequent computational time compared to a pixel based approach when simulating at basin scale for example. Maps were then daily interpolated between available dates. As evolving land cover parameters are forced on a monthly basis in SURFEX-ISBA, the maps were finally temporally averaged to obtain monthly forcings of LAI for each plot of the study area.

All remote sensing and in situ measurements (Sect. 4.2.2.3) were collected as part of the Observatoire Spatial Régional (OSR) project for an agricultural area of southwestern France near Toulouse (Dejoux et al., 2012).

4.2.2.3 Lamasquère flux site

In order to evaluate the simulations, we used in-situ measurements of the Lamasquère site ($43^{\circ}50'05''$ N, $01^{\circ}24'19''$ E, Fig.II-1). This plot is part of an experimental milk production farm. It is positioned along the Touch River and is characterized by a silage maize-winter wheat-silage maize-winter wheat rotation. As maize is irrigated on this plot, we studied the maize years of the rotation. Hence, the years simulated are 2006, 2008, 2010 and 2012.

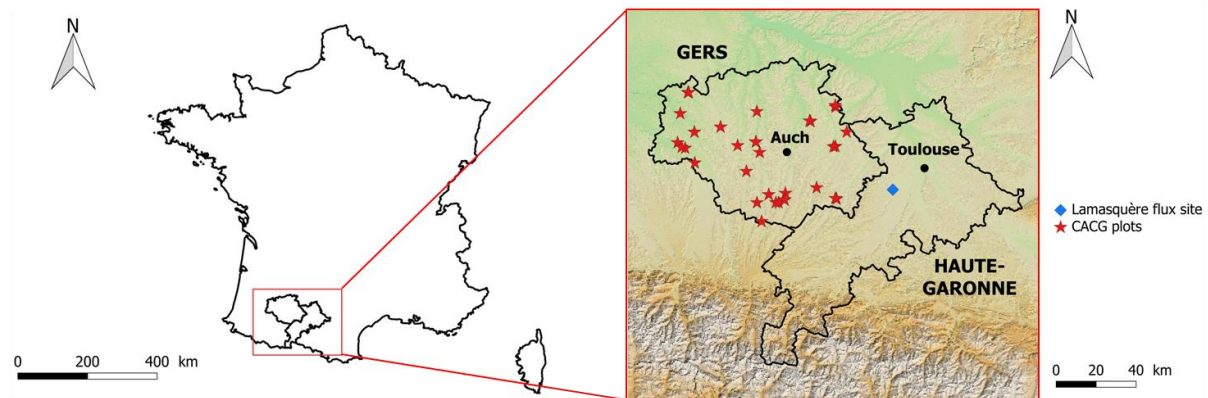


Figure II-1.1: Study area

The site (labeled “Fr-Lam”) is part of the ICOS network and is equipped with an eddy covariance systems to measure half-hourly sensible heat flux and evapotranspiration, installed at 3.65 meters above the soil, meteorological sensors to measure radiation (CNR1, Kipp & Zonen), wind speed (Windvane / prop Young), air temperature and humidity (HMP35, Vaisala) and soil profile probes for water content measurements (CS616, Campbell Scientific) collected at depths of 5 cm, 10 cm, 30 cm, 60 cm and also 100cm. The eddy covariance (EC) system allows to monitor turbulent fluxes at fields scale combining

synchronized measurements of 3-D wind components (Campbell, CSAT 3) and fluctuations of atmospheric CO₂ and H₂O concentrations using a fast open path Infrared Gas Analyzer (LiCor LI-7500, IRGA). Evapotranspiration (ETR) and turbulent energy fluxes (latent heat LE and sensible heat H) are computed and integrated over 30 minutes according to CarboEurope-IP recommendation (Aubinet et al., 1999, Béziat et al, 2009). Half-hourly fluxes were corrected for spectral frequency loss (Moore, 1986) and air density variations (Webb et al., 1980). Flux data were filtered and flagged according to statistics and objectives criteria: data out of range, rain event, friction velocity threshold, integral turbulence characteristic, stationarity test (Papale et al., 2006; Reichstein et al., 2005) and spatial representativeness (footprint) of the fluxes. For the latter, if the calculated fetch including 90 % of the flux (Kljun et al., 2004) model for each half-hourly EC flux value (F-90) was higher than the distance between the eddy-covariance tower and the edge of the plot in the main wind direction, fluxes were discarded. Gapfilling was finally performed depending on the duration of missing data, either following the linear regression method (duration < 1h30), or following the mean diurnal variation or look up table method (duration >1h30) according to Beziat & al. (2009).

Technical itinerary has also been given by the farmer. It contains information about the plot management and agricultural practices such as the sowing and harvest dates, the tillage characteristics, the fertilization, the herbicide spray and the dates and depths of irrigation events.

4.2.2.4 CACG irrigation data

The Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG) is in charge of the management of the Neste channel which supplies 17 rivers in southwestern France. The targeted sector is mainly agricultural. Hence, the CACG is also in charge of advising farmers on irrigation practice in order to optimize the water resources availability. To forecast the availability of water resources at seasonal scales, the CACG monitors several irrigated plots every year. For each of these plots, the log containing the field operations has been collected. Thus, the irrigation dates and amounts are gathered. In this study, we used the data from the years 2013 and 2014. These data were collected as part of the MAISEO project (<http://www.pole-eau.com/Les-Projets/Projets-innovation-finances/Maiseo>). Data were available on 23 plots in 2013 and 13 in 2014 spread across the Haute-Garonne and Gers French departments (Fig. II-1.1). For some of these plots (10 in 2013, 11 in 2014), soil measurements have been performed. Particularly, an estimation of the root influence depth is provided.

4.3 Methods

4.3.1 Determination of the irrigation parameter

As this study focuses on maize crops in southwestern France, we determined simple decision rules based on expertise over this area. As SURFEX-ISBA already needs LAI to describe the crop phenology, we also used LAI to inform the spatio-temporal distribution of some irrigation parameters. To determine the irrigation period, we used a LAI threshold. For the maize in South-Western France, the irrigation should not begin before the 8-10 leaves growing stage according to agencies (CACG or Arvalis) in charge of advising the farmers. Measurements showed that this stage corresponds to a LAI value of nearly $0.4 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$. The irrigation period thus begins when the LAI increases above 0.4. A minimal date, the 1st of May, has to be used to filter intermediate winter crops. Note that this date is only adapted to crop practices in France. As the LAI will not decrease under 0.4 before harvest, we also used this threshold to detect the harvest. The irrigation period is assumed to end 45 days before the harvest. This 45 days period corresponds to the time needed for the grain to dry between the last irrigation and harvest. This value is also used by [Battude et al. \(2017\)](#). For the irrigation amount and minimal return time, the values were based on technical notices from these agencies too. The irrigation amount was set to 30 mm per event and the minimal return time to 6 days based on the observed irrigations and the capacities of typical irrigation systems used on maize crops in South-Western France. The duration of an irrigation event depends on the irrigation system nominal discharge. At field scale, a unit surface of soil receives irrigation during around 30 to 45 minutes. The generated runoff is thus evacuated on the surrounding parts of the plot. However, in the model, the entire plot is irrigated at once. Setting irrigation duration to 30 minutes could generate unrealistic runoff outside of the plot. We thus decided to fix it to 8 hours, based on the position changes for irrigation reels, mainly used in our study area. This duration should also be appropriate for fixed spray and pivot irrigation.

Unlike the study of [Chen et al. \(2019\)](#), we did not use irrigation triggering soil moisture thresholds calibrated on in-situ measurements as it cannot be performed on each plot in the perspective of catchment scale applications. Therefore, we used the remotely sensed LAI to pilot the root-zone soil moisture thresholds. Indeed, in southwestern France, the growing stage of the maize crops modulates the irrigation practice. The agricultural management agency Arvalis provides technical documentation about maize crop management ([Arvalis, 2007](#)). This documentation includes a method to trigger irrigation based on matric potential measurements and the knowledge of the soil texture. By using retention curves, we translated the recommended matric potential thresholds in soil moisture threshold. In the early stages of the growth, the root depth is low and so is AWC_{max} . Hence, as explained in [section 4.2.1.1](#), the filling rate of the maximal available water content ($\text{AWC}/\text{AWC}_{\text{max}}$) varies faster. The farmers are thus advised to anticipate for dry periods between two irrigation

events in the early stages. As SURFEX-ISBA does not simulate the root growth, the maximal AWC remains fixed to the one when the roots are fully developed. Therefore, to simulate the farmer practices, the first threshold of the irrigation period must be higher than what is used for a fully developed root zone to allow the surface layer to remain wet. We thus determined from the matric potential recommended on early stages the maximal water depletion accepted before irrigation and calculated the equivalent in percentage of AWC_{max} with fully grown roots, which is about 20%. It led to a first threshold of $F2T_{\max}=80\%$ of AWC_{max}. As the actual root depth increases during the growth, the threshold decreases. To represent this effect, we applied the LAI dynamic to the decrease with the following relationship:

$$F2T_i = F2T_{\max} + \frac{(LAI_i - LAI_{\max})}{(LAI_{\max} - LAI_{\min})} * (F2T_{\max} - F2T_{flw}) \quad [\text{Eq. II-1.4}]$$

where $F2T_i$ is the AWC threshold for the month i , given in % of AWC_{max}, $F2T_{flw}$ the AWC threshold at the flowering stage, LAI_i the mean LAI of the plot for the month i and $LAI_{\min}$ and $LAI_{\max}$ respectively the minimal and maximal monthly averaged LAI of the current year. The maize reaches its maximal LAI when the flowering period begins. A filtering period, from May the 1st to the end of the year was used to determine $LAI_{\max}$ in order to avoid confusions with intermediate winter crops. In this period, this crop is very sensible to water stress as it may impact the yields. As a consequence, farmers are advised to maintain AWC above 60% of AWC_{max} as a safety margin. Hence, $F2T_{flw}=60\%$. Once the flowering period is over, as the plant goes through maturation, this sensitivity to water stress decreases. The objective for the farmers is to let the crop exploit the water in the soil without limiting the biomass production. They thus try to use what is defined by [Allen et al. \(1998\)](#) as the readily accessible water content. The value proposed by [Allen et al. \(1998\)](#) is 55% of AWC_{max} for the maize crops. It implies farmers must maintain AWC above 45% of AWC_{max} until the end of the crop cycle. This threshold value is the one used in the SAFYE model ([Battude et al., 2017](#)). In fact, the easily accessible water content depends on the plant but also on the soil texture. Following the expertise of the CACG, based on their measurements, we decided to set the minimal threshold to $F2T_{\min}=40\%$ which is adapted to the soil types encountered on the validation plots.. The thresholds between flowering and harvest are then defined by the following relationship:

$$F2T_i = F2T_{\min} + \frac{(LAI_i - LAI_{\min})}{(LAI_{\max} - LAI_{\min})} * (F2T_{flw} - F2T_{\min}) \quad [\text{Eq. II-1.5}]$$

This way, the threshold decrease is entirely timed by the remotely sensed evolution of LAI and thus the phenology, contrarily to the default irrigation scheme ([Fig. II-1.2](#)), while the limit values $F2T_{\max}$, $F2T_{flw}$ and $F2T_{\min}$ are based on expertise of the maize crops management in South-Western France and supposedly representative of the average practices in the region. It can be noted that this method to determine the temporal variations of the triggering thresholds does not depend exclusively on LAI as only the

temporal information is used. Simpler vegetation indices, like the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), could also be used to determine the temporal variability of F2T.

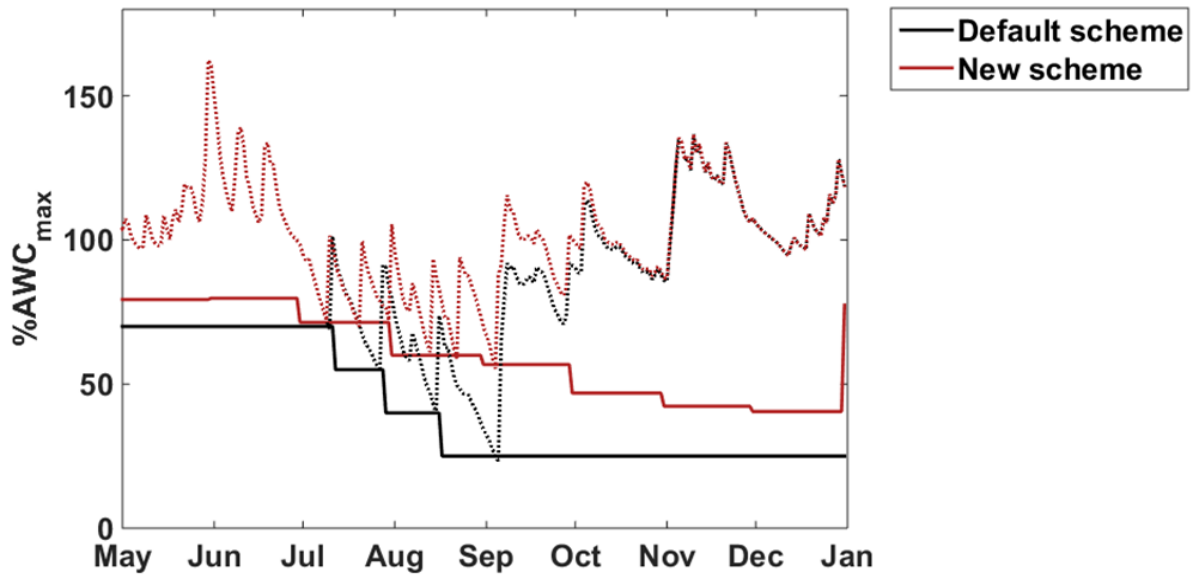


Figure II-1.2: Irrigation triggering thresholds for the default and new irrigation schemes ISBA for the CACG plot n°20 in 2013. The dashed lines are the simulated soil moisture in the root zone with both schemes.

4.3.2 Numerical experiments

In this study, four numerical experiments were carried out:

- STD which uses the standard irrigation scheme of SURFEX-ISBA with standard irrigation parameters. It is the reference simulation.
- STD-SAT which uses the standard irrigation scheme of SURFEX-ISBA with an irrigation period derived from the remote sensing LAI (Sect. 4.3.1). This experiment aims at showing an eventual contribution of using remote sensing to modulate only the irrigation period.
- FIXE which uses the new irrigation scheme developed in this study with the decision rules described in section 4.3.1 but with F2T being kept constant to 45%, as used by Saadi et al. (2015) and Battude et al. (2017).
- VARI which uses the new irrigation scheme with all the decision rules described in section 4.3.1.

A summary of the numerical experiments and their associated parameter values is available in table II-1.1.

Experiment	Irrigation scheme (standard or new)	Irrigation period	Irrigation amount (mm)	Irrigation event duration (h)	Irrigation maximal frequency (day)	Irrigation triggering soil moisture thresholds (% max AWC)
STD	Standard	ECOCLIMAP	30	0.5	1	Decreasing (stages): 70-55-40-25
STD-SAT	Standard	Satellite	30	0.5	1	Decreasing (stages): 70-55-40-25
FIXE	New	Satellite	30	8	6	45
VARI	New	Satellite	30	8	6	Decreasing (LAI): 80~60~40

Table II-1.1: Summary of the numerical experiments

We also performed these 4 experiments on the Lamasquère plot and on the CACG plots separately. Note that for the Lamasquère plot, the irrigation event duration and maximum irrigation frequency are different from the table, as described in [section 4.3.1](#). Hence, the minimal return time for irrigation could be set to 5 days and the irrigation duration to 5 hours, according to the characteristics of the irrigation system. On this plot, the crop cultivated is silage maize which is harvested while still green. So the grain does not have to dry before harvest and can be irrigated until the harvest. Consequently, we also changed the ending of irrigation period criterion. It was directly when the LAI drops under $0.4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ instead of using a 45 days drying period. However, as silage maize is hard to segregate from standard maize in classification algorithms, this criterion must only be used on well documented plots.

First, we fix the rooting depth to 90 cm based on the measurements done on the Lamasquère site. Then, [section 4.4.1.2](#) presents the impact of changing the rooting depth, and consequently the estimation of AWC_{max} on the CACG plots. In this section, we use the root depths measured by the CACG on some of the plots.

For the Lamasquère plot, soil moisture initialization is directly taken from in-situ measurements. As we do not have this kind of measurements on the CACG plots, the initialization for all the experiments was determined with a spin-up run based on the STD experiment as it is the reference simulation.

4.4 Results

4.4.1 Irrigation estimation on CACG plots

4.4.1.1 Annual volumes estimation

To evaluate the new irrigation scheme, we first compare the annual irrigation volume simulated on each CACG plots by the different numerical experiments to observations. The results are shown in [figure II-1.3](#). The corresponding scores are summarized in [table II-1.2](#).

For the year 2013 ([Fig. II-1.3.a](#)), the VARI experiment performs the best. The bias is close to zero and the RMSE value is around the volume of a single irrigation. The three other experiments underestimate the volume of irrigation compared to the observations, by omitting an average of two irrigation events during the season. Looking at the timing of the first event ([Fig. II-1.4.a, table II-1.3](#)), all the experiments performs pretty well with a few days bias and a RMSE around a week. FIXE overestimates the first irrigation date due to its tendency to underestimate the irrigation needs. In STD and STD-SAT experiments, this effect is overridden by the decreasing threshold, which means that the irrigation needs for the first event are well estimated. Concerning the last irrigation timing ([Fig. II-1.4.b, table II-1.4](#)), there is little difference between experiments. STD and STD-SAT slightly underestimate this date due to the very low threshold in later stages. However, all experiments also perform well with a low bias and a RMSE around a week and a half. There are few differences between STD and STD-SAT for the irrigation amount as well as for the dates of first and last irrigation. This is because in the standard irrigation scheme, the irrigation triggering thresholds are the same, independently from the beginning of the irrigation season. Hence, if the first irrigation happens after the beginning of the season in both STD and STD-SAT, then the irrigation amounts and timings will be the same. This is also true for the end of the irrigation period.

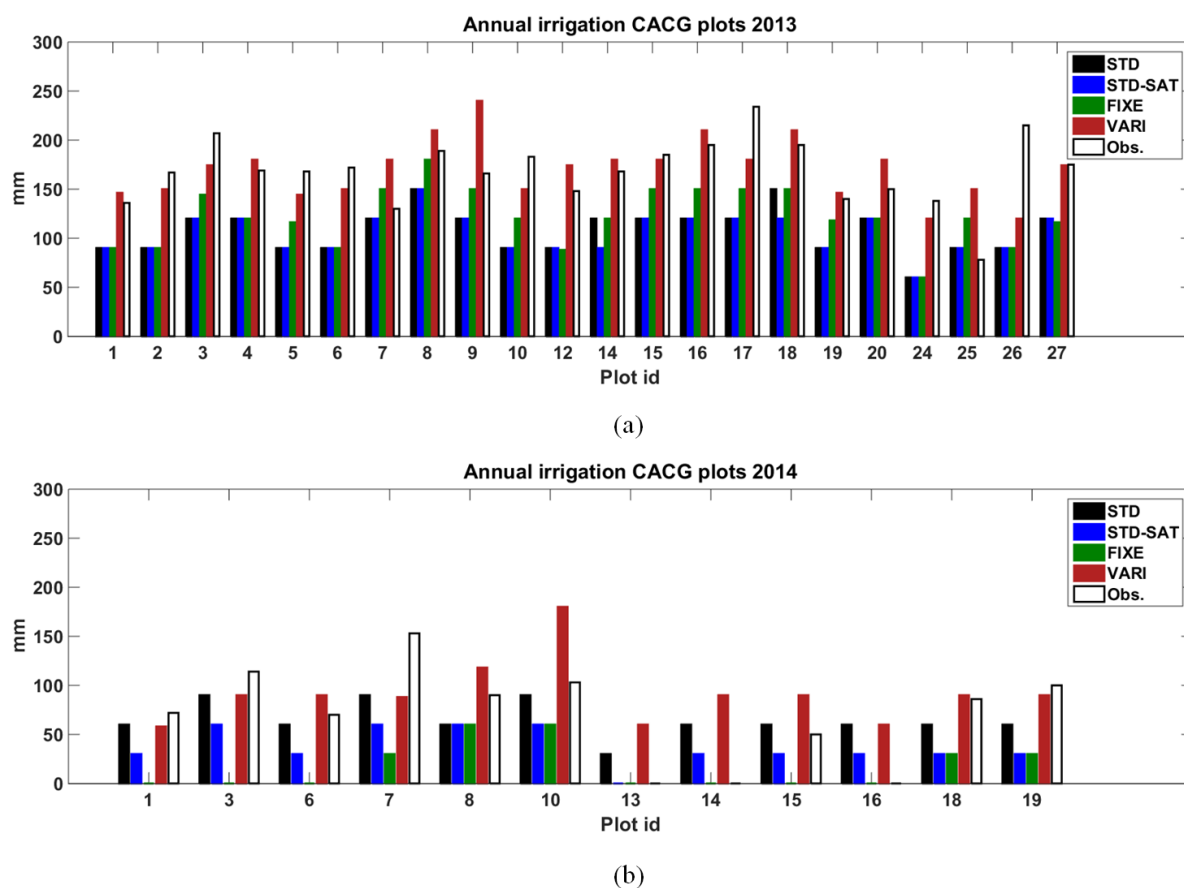


Figure II-1.3: Annual irrigation volumes on the CACG plots in 2013 (a) and 2014 (b)

	2013		2014	
Exp.	Bias (mm yr ⁻¹)	RMSE (mm yr ⁻¹)	Bias (mm yr ⁻¹)	RMSE (mm yr ⁻¹)
STD	-61	68	-5	37
STD-SAT	-64	71	-32	38
FIXE	-47	58	-52	66
VARI	2	38	22	49

Table II-1.2: Scores on cumulated irrigation volumes on the CACG plots in 2013 and 2014

	2013		2014	
Experiment	RMSE (days)	Bias (days)	RMSE (days)	Bias (days)
STD	7	-4	14	0
STD-SAT	7	-4	10	3
FIXE	12	8	20	16
VARI	7	-5	23	-3

Table II-1.3: Scores on the estimation of the first irrigation event dates on CACG plots in 2013 and 2014

	2013		2014	
Experiment	RMSE (days)	Bias (days)	RMSE (days)	Bias (days)
STD	11	-3	25	20
STD-SAT	11	-5	39	-34
FIXE	10	0	36	-23
VARI	10	5	39	34

Table II-1.4: Scores on the estimation of the last irrigation event dates on CACG plots in 2013 and 2014

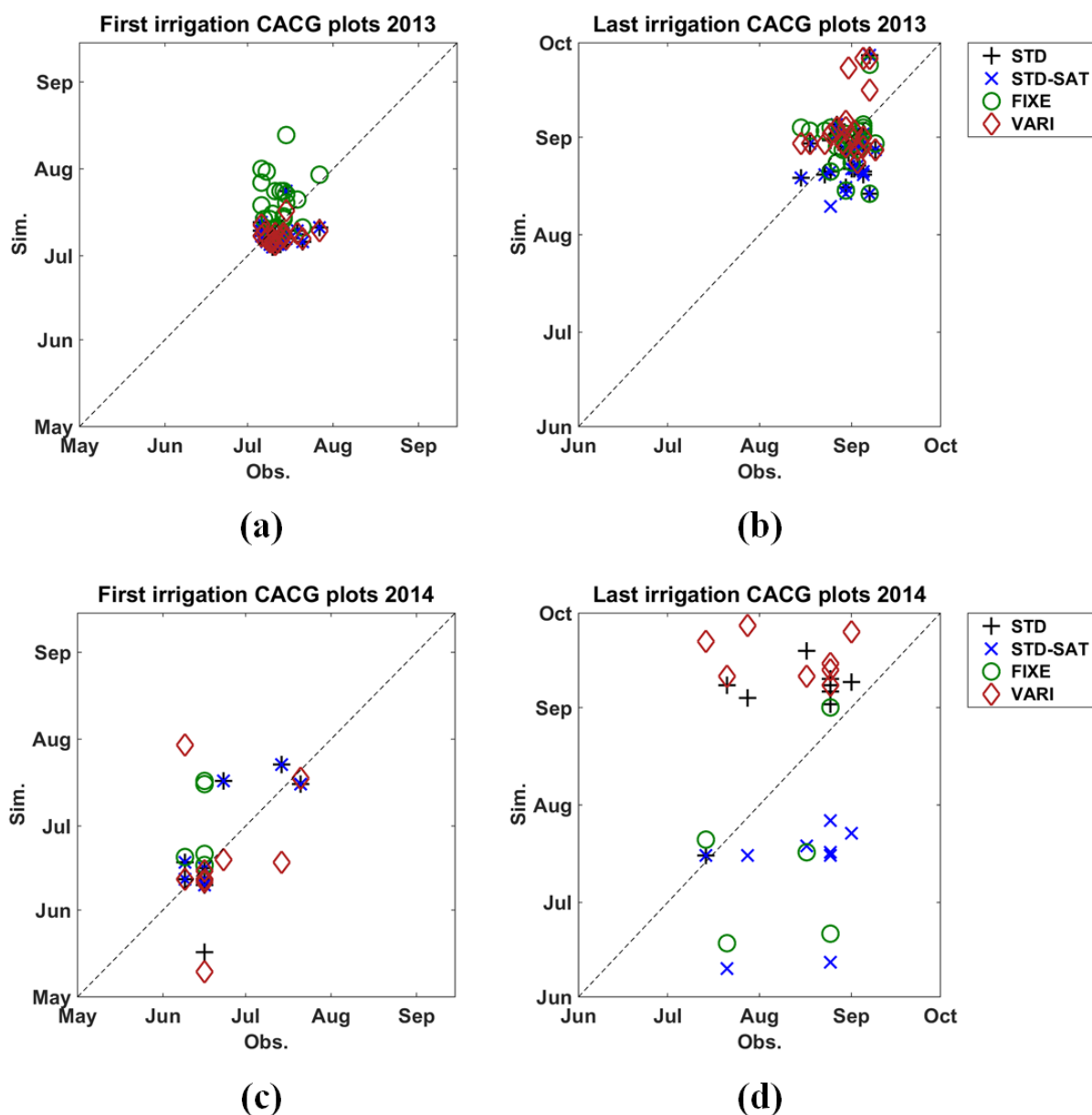


Figure II-1.4: Observed and simulated first (a, c) and last (b, d) irrigation event dates on the CACG plots in 2013 (a, b) and 2014 (c, d)

The summer of 2014 is more humid than the 2013 one with precipitation up to 214 mm during the June-July-August period in 2014 against 148 mm in 2013 (171 mm in average on the 1981-2010 period). This explains why the observed and simulated irrigation amounts are much lower (Fig. II-1.3.b). Table II-1.2 shows that STD experiment performs best in 2014, with performances similar to VARI in 2013. It is followed by VARI and STD-SAT. These two experiments still show good RMSE, around one and a half volume of an irrigation event. The difference between STD and STD-SAT is due to the fact that the end of the irrigation season estimated by satellite occurs sooner than the default date set in SURFEX-ISBA. FIXE shows the worst performances on this year. However, it is interesting to note that the scores for the new irrigation scheme (FIXE and VARI) are quite consistent through the years. Concerning the dates of first irrigation, STD and STD-SAT performs quite well, with scores close to those obtained in 2013. On the contrary, FIXE deeply overestimates the first irrigation date. VARI shows a good bias but is way more uncertain than STD and STD-SAT, with a RMSE of 26 days. As for the last irrigation dates, STD and VARI deeply overestimate the last irrigation date with better performances with STD. On the contrary, STD-SAT and FIXE largely underestimate this date. The more uncertain estimation of the first and last irrigation timing will be discussed in section 4.5.

4.4.1.2 Maximal available water content sensibility

The irrigation triggering in both irrigation scheme mostly relies on the threshold values. As these thresholds are expressed in percentage of AWC_{max} , which depends on the prescribed soil hydrodynamic parameters and rooting depth, its estimation appears to be crucial. This section aims at evaluating the sensibility from AWC_{max} on the simulated irrigation volumes. In order to do so, we use the measured root depths of the CACG dataset. For the plots where no measurement is available, the root depth is kept to 0.90 m. As the irrigation volumes are small in 2014 due to the wet year, we decided to focus on 2013 in this analysis.

Exp.	Annual irrigation volume		First irrigation date		Last irrigation date	
	Bias (mm yr ⁻¹)	RMSE (mm yr ⁻¹)	RMSE (days)	Bias (days)	RMSE (days)	Bias (days)
STD	-44 (+17)	66 (-2)	9 (+2)	-6 (-2)	11 (+0)	-2 (+1)
STD-SAT	-47 (+17)	65 (-6)	8 (+1)	-5 (-1)	11 (+0)	-3 (+2)
FIXE	-29 (+18)	60 (2)	11 (-1)	4 (-4)	11 (+1)	2 (+2)
VARI	26 (+24)	72 (+34)	8 (+1)	-6 (-1)	12 (+2)	6 (+1)

Table II-1.5: Scores on the annual irrigation volume and the first and last irrigation dates on CACG plots in 2013 with the measured root depths. Within the parenthesis is the difference with the score obtained while simulating with a root depth fixed to 90cm (Table2).

The scores on annual volumes and first and last irrigation timing are showed in table II-1.5. The difference with the scores calculated with the 0.90 m root depth is also shown (see parenthesis). For all the experiments the irrigation volume estimated is increased by around 20 mm compared to the simulations with the fixed root depth. It means that for a large fraction of the plots, a supplementary irrigation event was added. The RMSE is not impacted that much for STD, STD-SAT and FIXE experiments. On the contrary, the VARI experiment becomes more uncertain with a 72 mm RMSE, 34 mm larger than the one obtained with a fixed root depth. The timing of first and last irrigations remains well estimated for all experiments, with small differences between the fixed and measured root depths simulations. To further understand these results, we decided to analyze the differences on each plot. Figures II-1.5, II-1.6.a and II-1.6.b respectively show the error on the annual irrigation volume, the error on the first irrigation date and on the last irrigation date depending on the prescribed root depth. It may first be noticed that the measured root depths are mostly way lower than 0.90 m. Thus AWC_{max} is lower for these plots. Therefore, for the same atmospheric demand, the filling rate of AWC_{max} drops faster. It leads to supplementary triggers, explaining the 20 mm increase in the bias for the annual volumes estimated. A general trend appears with a clear overestimation of the simulated irrigation volumes when the root depth decreases below 0.90 m. The same trend is visible on the dates of first and last irrigation with an underestimation of the first irrigation date and an overestimation of the last irrigation date. The VARI experiment seems to be the most affected, explaining the big difference in RMSE between the fixed and measured root depths simulations. This point will be discussed in section 4.5.

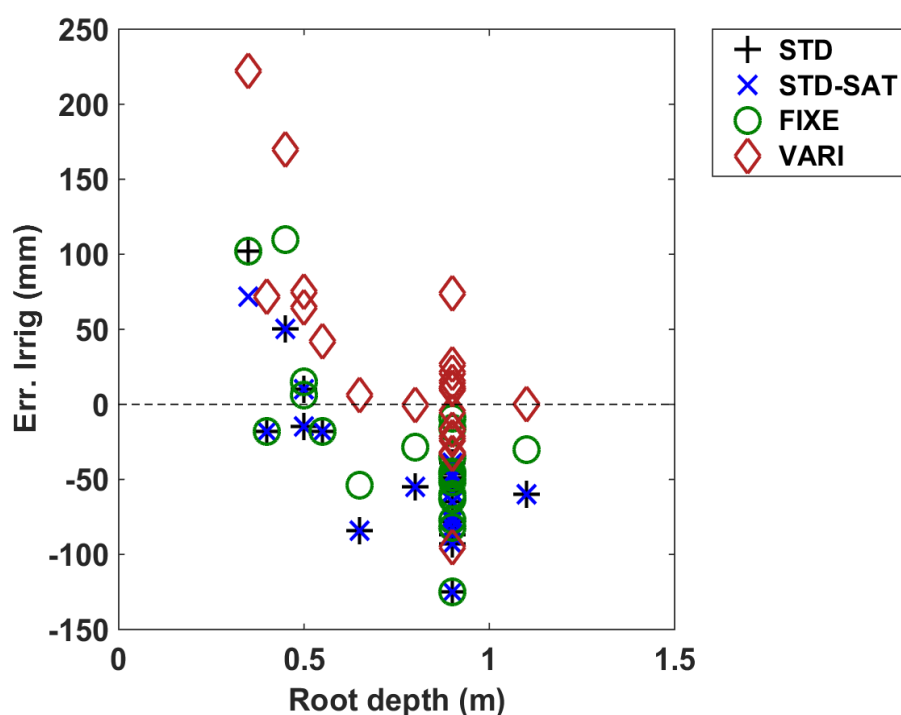


Figure II-1.5: Error on the estimation of annual irrigation volumes on the CACG plots in 2013 in function of the root depth

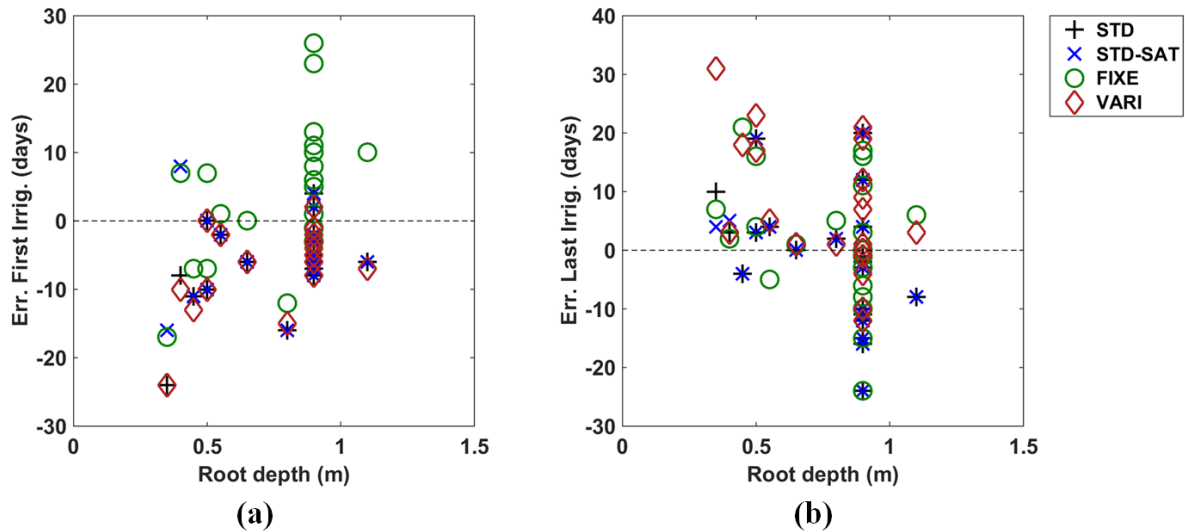


Figure II-1.6: Error on the first (a) and last (b) irrigation event dates on the CACG plots in 2013 in function of the root depth

4.4.2 Impact on evapotranspiration: case of the Lamasquère site

In order to estimate the impact on the hydrometeorological fluxes, the four experiments described in section 4.3.2 were also conducted on the Lamasquère flux site on years with irrigated maize (Sect. 4.2.2.3). An evaluation of the irrigation volumes is first performed for each year. Then we compare the simulated evapotranspiration and sensible heat fluxes Eddy-Covariance measurements onsite.

4.4.2.1 Irrigation volumes estimation

Figure II-1.7 shows the annual irrigation volumes for each year at Lamasquère. The scores on irrigation volumes and dates are summarized in table II-1.6. STD, STD-SAT and FIXE show similar scores with around -30 mm of bias and 40 mm of RMSE. It means that these three experiments underestimate the crops actual irrigation by more than an irrigation event. Like for the CACG plot in 2013, the VARI experiment irrigation volumes estimations are better. The bias is near zero and the 22mm RMSE is under the volume of an irrigation event. However, all experiments show pretty good results. The dates of first and last irrigation were also checked (Table II-1.6, Fig. II-1.8.a and II-1.8.b). FIXE substantially overestimates the first irrigation date compared to the observed ones (Fig. II-1.8.a). The three other experiments have similar performances with a bias around the week and a RMSE of a week and a half, similar to what was obtained on the CACG plots in 2013. The estimation of the last irrigation timing is accurate for all experiments (Fig. II-1.8.b), showing performances equivalent to the estimations on the CACG plots in 2013 too.

Exp.	Annual irrigation volume		First irrigation date		Last irrigation date	
	Bias (mm yr ⁻¹)	RMSE (mm yr ⁻¹)	RMSE (days)	Bias (days)	RMSE (days)	Bias (days)
STD	-35	45	9	5	11	4
STD-SAT	-35	45	9	5	11	4
FIXE	-29	36	29	29	11	8
VARI	1	22	11	7	8	5

Table II-1.6: Interannual scores on the annual irrigation volume and the first and last irrigation dates on Lamasquère

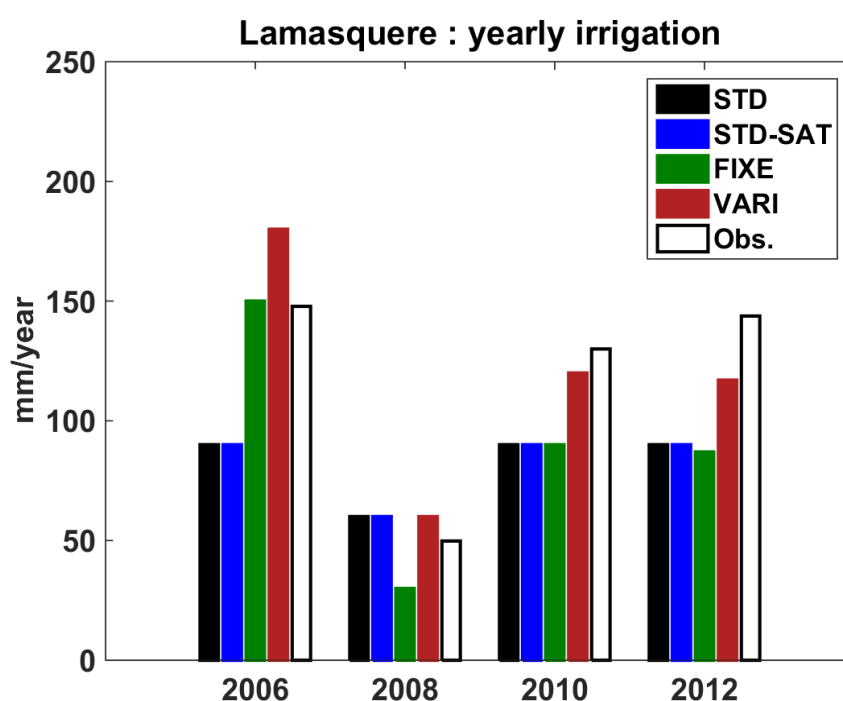


Figure II-1.7: Annual irrigation volumes on Lamasquère site

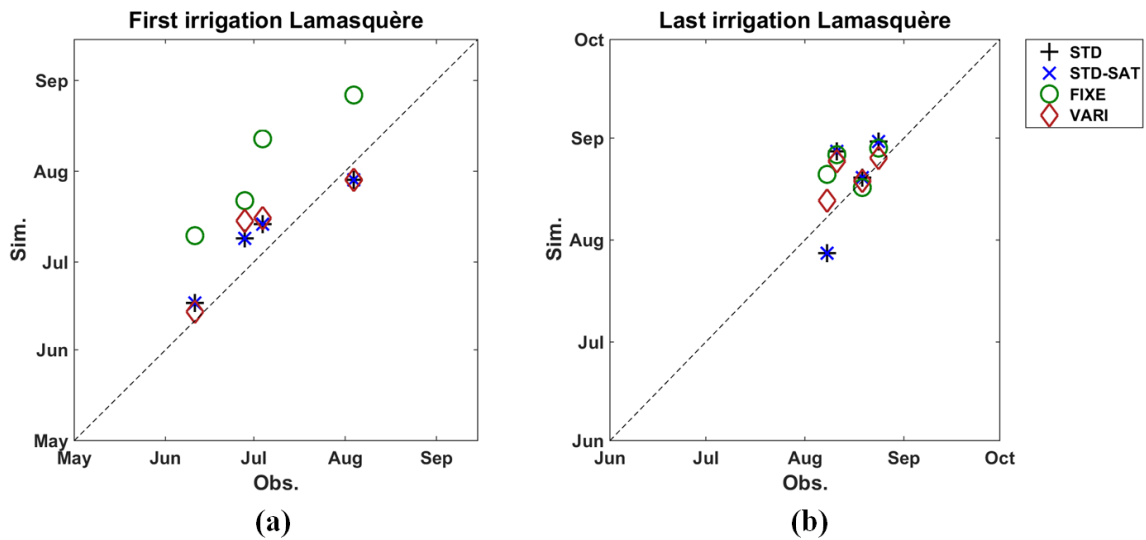


Figure II-1.8: Observed and simulated first (a) and last (b) irrigation event dates for each year on Lamasquère

4.4.2.2 Impact on evapotranspiration

Figure II-1.9 shows the simulated monthly evapotranspiration every year for each experiment compared to the measured one. Scores are summarized in table II-1.7. The monthly evapotranspiration is well represented by all experiments. All experiments show similar results and lead to similar RMSE values for the daily evapotranspiration. However, when looking at the cumulated evapotranspiration over the year, VARI performs the best with a -14 mm.yr^{-1} bias whereas the three other experiments show a bias of around -30 mm.yr^{-1} . This result is coherent with the fact that the 3 other experiments tends to underestimate the annual irrigation volume. It also means that a 30 mm difference in annual irrigation volume does not lead to the same difference in evapotranspiration. This point will be discussed in section 4.5.

Exp.	Bias (mm yr^{-1})	RMSE (mm d^{-1})
STD	-31	0.93
STD-SAT	-31	0.93
FIXE	-31	0.93
VARI	-14	0.94

Table II-1.7: Interannual scores on evapotranspiration on Lamasquère

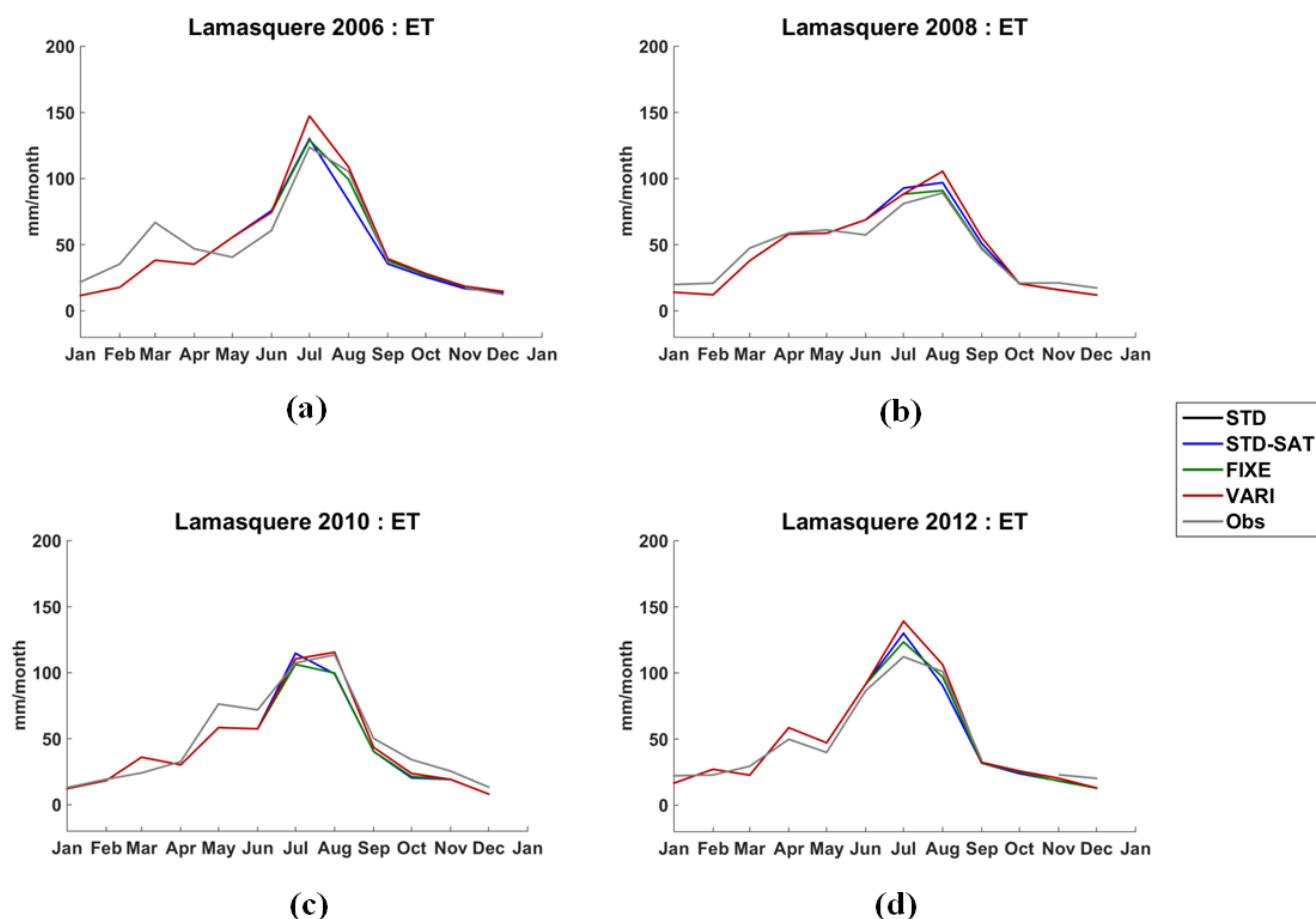


Figure II-1.9: Monthly evapotranspiration on the Lamasquère site in 2006 (a), 2008 (b), 2010 (c) and 2012 (d)

4.5 Discussion

4.5.1 Estimation of the irrigation volumes and timing

We will first discuss the results on the CACG plots. Concerning the annual irrigation volumes estimation, the performances for the new scheme, in the FIXE and VARI experiments, are quite consistent between years (Table II-1.2). Hence, the new scheme appears more stable than the standard irrigation scheme of SURFEX. Indeed STD and STD-SAT have very different performances in 2013 and 2014. However, this hypothesis should be confirmed with a study on a larger time span, taking into account the interannual variability of the climatic conditions. The difference between FIXE and VARI shows the limits of directly applying the formalism of agro-hydrological models like SAFYE (Battude et al., 2017) in a Land-Surface Model. Indeed, only the VARI experiment can catch up with such performances on the estimation of annual irrigation volumes. It shows that the method used in VARI to determine the irrigation triggering thresholds fits better the average irrigation management of maize crops in our study area. For both years, FIXE underestimates the irrigation volumes. Indeed the threshold at 45% of AWC_{max} represents

an “optimal” use of the water without taking any safety margin. Consequently, the soil moisture may drop below the threshold during the minimal time between two irrigation events. It may lead to plant water stress and affect the yield. VARI takes into account the fact that farmers will take safety margins and simulates it by using higher triggering threshold values. The STD and STD-SAT have poor performances in 2013 because of a large underestimation of the crop water requirements. It is due to the threshold used for the last stage which is too low. It makes it hard for the standard irrigation scheme to simulate more than three irrigation events. The problem does not occur in 2014 which had a wet summer. The observed irrigation volumes are lower and easier to catch with the standard module.

The irrigation period is well represented in 2013 as shown in [table II-1.3 and II-1.4](#), and [figure II-1.4](#). It means that the STD and STD-SAT experiments underestimate the irrigations in the middle of the season. The timing of the soil moisture threshold seems responsible for this poor performance because its decrease is not constrained by phenology. For 2014 ([Fig. II-1.4.c and 1.4.d](#)), the timing of irrigation is poorly represented by all experiments, especially when estimating the last irrigation event. As observed, the irrigation volumes are low in 2014, as well as the number of actual irrigation events. Hence, they are gathered in a small period which corresponds to the driest period of the season. If the model simulates either one more or one less irrigation event than the observed amount, the first or last irrigation simulated are likely to be outside of this period, explaining the large errors on the timing. However, given the low volumes observed in 2014, it should not significantly affect the hydrology.

The results on irrigation estimation on Lamasquère ([Sect 4.4.2.1](#)) confirm that the VARI experiment fits best the irrigation practices of the area. However, this result may be dampered by the fact that Lamasquère is an experimental plot of the agricultural engineering school of Purpan. Experiences may be done on this plot to optimize the crop yield, meaning that the irrigation management does not necessarily correspond to what usually happens in South-Western France but follows the technical recommendations.

4.5.2 Sensitivity to the maximal available water content estimation

[Section 4.4.1.2](#) shows that the uncertainties on the soil properties, especially the rooting depth, and consequently the estimation of AWC_{max} , can deeply affect the results. Especially, for all experiments, the error on the annual irrigation volume estimation increases with the decreasing root depth. This result may be explained by two points. The first is that when AWC_{max} is low, its filling rate varies faster. The model is thus very sensitive to the formalisms in charge of depleting the soil moisture like drainage and evapotranspiration. If one of these formalisms generates excessive drying of the soil layers, the scheme will simulate way too much irrigation events, as shown in [figure II-1.5](#). It is especially true when the thresholds are high, explaining why the VARI experiment is more

affected than the other ones. Uncertainty on the soil moisture at the beginning of the irrigation period may also affect the timing and annual volume of irrigation. Indeed, the initialization of the soil water content is performed using a spin-up approach based on the STD experiment. The impact on irrigation simulation is hard to estimate as it suffers a strong threshold effect. Small differences in soil moisture may just affect the irrigation timing by few days without impacting the annual irrigation volume as well as add or miss an irrigation event due to reaching the thresholds at slightly different timing. In dry conditions, the soil moisture may drop sufficiently fast to create few differences (few days) in irrigation timing. In wet conditions, the timing may be impacted way more, leading to adding or missing a single irrigation event. However, in South-Western France, the wet climatic conditions in late winter/spring tends to replenish the soil layers before the irrigation season, attenuating the impact of the spin-up uncertainty, leaving only the model uncertainty to estimate the soil drying speed linked to the evapotranspiration estimation.

The second plausible cause is to assume that the farmers do not adapt their practices to their soil. In fact, most of the CACG plots have low soil depths. It thus limits the root development of the maize crop, on the contrary of the Lamasquère plot. In such conditions, the farmers are usually advised by technical institutes to diminish the irrigation amount of each event and increase the frequency. For example, they should adapt their irrigation material to irrigate 20 mm with a 4-days return period, instead of 30 mm each 6 days. But in the observed irrigation series for the CACG plots, the mean irrigation volume for each irrigation event is very close to 30 mm with a small dispersion. It could mean that the farmers follow the advices of technical institutes, but as if they had no constraints on the root development for their crops. Hence, it may explain why VARI performs way better than the other experiments with a fixed 90 cm root depth (Sect. 4.4.1.1 and 4.4.2.1). In fact, few farmers in South-Western France are really aware of the soil depth on their different plots and follow the recommendations provided by agricultural management agencies on average soil depths. Therefore, using a fixed rooting depth in simulations should be less complex and more realistic as using spatially variable rooting depth, moreover when this parameter is difficult to obtain spatially, in the perspective of a catchment scale application

4.5.3 Impact on evapotranspiration

When looking at the impact on evapotranspiration (Sect. 4.4.2.2), the differences between experiments and observations are close to the measurements precision. Uncertainty mainly comes from the closure of the energy budget in the measurements, which was around 90% on Lamasquère in 2006 (Beziat, 2009). However, there is a slight impact on yearly cumulated evapotranspiration. VARI is the experiment that most reduces the bias, from around -30 mm.yr^{-1} to -14 mm.yr^{-1} . As all the experiments are designed to avoid water stress on the crops, evapotranspiration is pretty close to the potential one. Differences are essentially due to differences in soil evaporation. A 15 mm.yr^{-1} difference might seem a low value but this difference is concentrated in periods of high demand and

low availability of the water. It may thus influence decisions concerning the water uptake in the river. It is also interesting to note that the 30 mm.yr⁻¹ difference between VARI and the three other experiments on the Lamasquère plot ([table II-1.6](#)) leads to only 15 mm of difference on evapotranspiration. It means that only 50% of the supplementary water added by VARI contributes to evapotranspiration at the end of the year, giving an estimation of the efficiency level of the aspersion irrigation.

4.5.4 Limitations and perspectives

The results presented in [section 4.4](#) tend to prove that integrating expertise information about irrigation practices combined to remotely sensed phenology is of great interest to improve the estimation of the irrigation demand spatially. These results should however be taken carefully due to the uncertainties in the different process involved. First of all, various uncertainties of the satellite acquisition must be taken into account. The acquisition performances of all the satellites used in this study are similar to those of Sentinel-2 ([Koetz et al., 2017](#)). Before averaging the LAI at the field scale, we eroded the plots' geometries by the width of a pixel to avoid border effect and geo-location uncertainty, keeping the computation units as homogeneous as possible in terms of vegetation parameters. But few CACG plots were smaller than a pixel after this treatment. This problem could affect the representativeness of the LAI on these plots. The radiometric uncertainties on each band are acceptable, as well as the Signal-to-Noise ratio. The LAI estimation based on remote sensing data is also well known to reach a saturation level for high values due to leaves overlapping ([Veloso et al., 2012](#)). But above a certain threshold, the difference between satellite derived and actual LAI values does not affect significantly the evapotranspiration flux ([Etchanchu et al., 2017](#)). The saturation is also not a problem for the determination of the irrigation parameters as only the time evolution of the LAI is used to determine the triggering thresholds and the determination of the irrigation season delimitation is performed on low LAI values. The estimated LAI may also be different from a sensor to another. But the calibration of BVNET was adapted to each sensor, meaning that the differences between sensors may be smoothed by BVNET. The main uncertainty remains in the estimation of the beginning and ending of the irrigation season. Indeed, these are based on LAI threshold. So a missing date due to excessive cloud coverage around these periods results in an inaccurate tracking of the phenology. This effect is attenuated by the multi-sensor approach used in this study. Indeed, it allows increasing the number of clear-sky acquisitions. In the unlikely case when the phenological cycle is mainly missed by the satellites due to cloud coverage, the main problem would be the error on evapotranspiration estimation more than the error on irrigation thresholds. But in such case, a climatological LAI should be used. Uncertainties on vegetation parameters, like the minimal stomatal resistance for exemple, could also affect the estimated evapotranspiration. In both of those cases, the water uptake in the root zone would be modified, and consequently affect the timing of the irrigations simulated. The main

limitations for water management applications still lie in the application of the method presented at larger scale. First of all, the determination of the irrigated surfaces remains a challenge for large areas. The French National Centre for Space Studies (CNES) is actually coordinating the research effort in France on this point. The main point is to use high resolution remote sensing products in the optical, thermal infrared or microwave domains, for instance to map irrigated plots over an entire river basin ([Demarez et al., 2019](#)). The second limitation for catchment scale applications is the fact that the irrigation practices deeply vary from a region to another and a crop to another. Although remote sensing products can give information on the irrigation period and adapt theoretical irrigation rules to the actual phenology, expertise information about the average irrigation practices on each crop remains essential. In our study, this kind of expertise has been acquired from agricultural and water management agencies, like the CACG and Arvalis, over South-Western France. Such agencies exist in most agricultural region and monitor many types of crops. Data could be acquired from these agencies in the scope of developing advising tools for irrigation. The trend in data policy is also to open the data. Technical documentation may also be freely distributed by these agencies and can be used, as in this study ([Arvalis, 2007](#)). Using the presented approach at catchment scale on several regions of the world should thus be possible. However, the expertise data may not be as readily usable as in our study and some work might have to be done to adapt it to determine the model parameter. The fact that this study tries to simulate anthropogenic decisions and effects should also be kept in mind. Some farmers may not follow technical advice from the agencies, leading to some uncertainties at catchment scale which are hard to estimate. The social mimicry, i.e. when farmers irrigate because their neighbor do, tends to attenuate such uncertainties in many regions, as it may be the case in our study area. In some agricultural regions, technical advice is lacking and the farmers use all the water available based on individual decision rules. In such case, it is nearly impossible to estimate a realistic irrigation demand. However, in a climate change context, the water scarcity issue becomes a critical issue and more and more agricultural regions have or will have to optimize the agricultural water use, mostly by regulating the irrigation practices. In such context, acquiring expertise data would be easier. Without any upstream expertise, the best practice would be to collect irrigation measurements representative of each crop over the entire area, from agencies mentioned above, asking farmers or set up in-situ measurements, and then, to calibrate the parameters to fit the best to local irrigation practices.

We have performed preliminary work on using such an approach to determine irrigation parameters. We decided to calibrate the limit values of the irrigation triggering soil moisture thresholds $F2T_{max}$, $F2T_{flw}$ and $F2T_{min}$ ([Sect. 4.3.1](#)) on the four years available (2006, 2008, 2010 and 2012) over the Lamasquère site. The calibration method used is a simplex optimization algorithm. The objective function was designed as follows:

- If on a given year, the number of simulated irrigations is not the same as the number of observed irrigations:

$$f_{obj} = 10^6 + 10^4 * |N_{sim} - N_{obs}| \quad [\text{Eq. II-1.6}]$$

where fobs is the objective function value, Nsim the number of simulated irrigations and Nobs the number of observed irrigations.

- If on a given year, the number of simulated irrigations and the number of observed irrigations are the same:

$$f_{obj} = RMSE(t_{obs}, t_{sim}) \quad [\text{Eq. II-1.7}]$$

where RMSE is the root mean square error function, tobs the observed irrigations dates and tsim the simulated irrigations dates.

This objective function, cumulated over the four years, allows prioritizing the simulation of the right number of irrigations and then minimizing the time gap between observed and simulated irrigations. However, optimization problems on discrete events are subject to threshold effect, creating multiple local optima, which makes it very complex to solve. To partly overcome this problem, we have tested several sets of initial conditions. The results of the optimization are shown in [table II-1.8](#).

They appear quite disparate as each set of initial values gives different optima. However, the performances of all these optima are quite similar, with the simulation of the right number of irrigations 2 or 3 years over 4 and a difference of a single event on other years. The average RMSE on irrigation timing is also around 10 days. It can be noted that the dispersion of F2Tflw optima is relatively low compared to F2Tmin and F2Tmax, with values between 0.44 and 0.66 with an average of 0.57. It means that F2Tflw is the most critical parameter in this case to estimate the annual irrigation volume. The two other thresholds are essentially useful to determine the timing of the irrigations. This finding seems logical as most of the irrigation on maize is performed around the flowering period. It is also interesting to note that the expertise values used in this study (0.8, 0.6 and 0.4) are very close to the mean of the optimal solutions (0.82, 0.57 and 0.42) and leads to similar performances on the objective function (last column of [table II-1.8](#)). Although work remains on elaborating a more appropriate objective function and using optimization algorithm more adapted to discrete problems, these results are encouraging on the potential of such calibration to compensate for the lack of expertise values in some areas. A perspective would also be the detection of irrigation event from high-resolution micro-wave remote sensing, in the form of surface soil moisture products. With a sufficient revisit frequency, which is not impacted by cloud coverage, irrigation events should be captured and the calibration of the triggering thresholds could be performed spatially, based on the timing of actual irrigation events.

4. Résultats soumis: Estimating irrigation in a land surface model with high resolution satellite imagery: application over maize crops in South-Western

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Expertise
Initial Values										
F2T _{max}	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1	0.8
F2T _{flw}	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.6
F2T _{min}	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.4
Optimal Values										
F2T _{max}	0.61	0.71	0.69	0.82	0.87	0.92	0.98	0.99	1	-
F2T _{flw}	0.58	0.66	0.66	0.64	0.54	0.49	0.58	0.57	0.44	-
F2T _{min}	0.26	0.25	0.3	0.25	0.42	0.56	0.54	0.59	0.59	-
Optimization criteria										
Years with the right number of simulated irrigations (over 4)	3	2	2	2	2	3	2	2	2	2
Average RMSE on irrigation timing over these years (days)	13.5	8.6	8.3	8	9.9	14	8.2	10.9	13.8	11.6
Difference between simulated and observed number of irrigations on other years	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Table II-1.8: Results of the optimization of irrigation triggering thresholds on the Lamasquère site over 4 years (2006, 2008, 2010 and 2012).

The presented method, specific to the maize crops in South-Western France, also presents several limitations for prognostic modeling with dynamic vegetation simulation as the method relies on a prior knowledge of the LAI cycle to determine the temporal evolution of the triggering level. A potential solution could be the use of a growing degree-days approach to determine the growth stages according to the climatic conditions forecasted. The application of the method on a LAI climatology that would be modulated by ongoing assimilation of remotely sensed LAI would also be a perspective that does not require supplementary knowledge about the crop, contrarily to the growing degree-days approach. Part of the methodology presented in this study could also be used to evaluate the impact of irrigation scenarios on the water resources at catchment scale. Such study

requires coupling SURFEX-ISBA with a hydrological and a hydro-geological model. Only then we could estimate the impact on the river discharge and on the water table level evolution.

4.6 Conclusion

This study aimed at improving the simulation of the irrigation demand on maize crops in South-Western France with the SURFEX-ISBA model. Using such model is of great interest in the perspective of water management applications at catchment scale, given its faculty to be spatialized easily and coupled to atmospheric, hydrological and hydro-geological models. But the climatological parameterization of the irrigation scheme is not sufficient to describe accurately the spatio-temporal distribution of the irrigation demand. We thus proposed to use local expertise on maize crops, provided by agricultural management agencies, combined to the monitoring of the crop phenology with high resolution remote sensing LAI to improve the simulation of the irrigation practices in the model. To take advantage of such information in the model, we had to develop an irrigation scheme for SURFEX-ISBA which allows forcing the spatiotemporal distribution of the irrigation parameters, as it is done in most agronomical or agro-hydrological models. The STD experiment, using the actual irrigation scheme of SURFEX-ISBA, with its climatological parameterization was taken as a reference. The STD-SAT experiment was designed to evaluate the sole contribution of remotely sensed irrigation period. The FIXE experiment was designed to test a commonly used parameterization for the irrigation scheme based on the SAFYE model. At last, the VARI experiment was designed to fully exploit the potential of the new scheme for using additional information from remote sensing products as well as expert knowledge from technical documentation. The experiments were carried out for several maize plots monitored by the CACG for two years (2013 and 2014) as well as the ICOS flux site of Lamasquère. The results show that the VARI experiment succeeds in valorizing this additional information about irrigation practices. Indeed, it generally provides a much better estimation of the irrigation volumes as well as a more accurate timing of the irrigation events. This is less true on a wet year (2014) with small irrigation volumes concentrated on a short period. The sensitivity analysis on soil parameters also showed that the VARI experiment seems a little more sensitive to the estimation of the maximal available water content due to its higher triggering thresholds. This analysis also points out the subjectivity of the farmer's decisions and the difficulty to model anthropogenic effects.

Using such an approach may thus be useful to estimate irrigation demand at catchment scale in agricultural areas where expertise data are available, the number of such area being constantly increasing due to the climate change context and the consequent need to optimize the water use. For areas where expertise is not available, calibration of the irrigation parameters should be considered. The use of high resolution remote sensing data also appears of great interest as the study proves its potential to spatialize theoretical irrigation practices and adapt it to the phenology of each crop. Combined to recent

advances in the detection of irrigated areas with remote sensing data and the possibility to couple LSMs with atmospheric and hydrological models, this study offers promising tools to study the impact of irrigation on water resources and the interactions with climate evolution.

5. Conclusion

Ce chapitre montre tout le potentiel de la télédétection pour l'estimation de l'irrigation de manière spatialisée. L'usage d'informations satellite sur la phénologie combinée à une connaissance experte des pratiques d'irrigation théoriques dans la zone permet d'améliorer notablement cette estimation sur un ensemble de parcelles pilotes. L'intégration de cette approche plus précise dans un modèle de surface trouve son intérêt dans les possibilités de couplage météorologique et hydrologique que ce genre de modèle offre. Ceci ouvre la voie à des études plus réalistes sur l'impact de l'irrigation sur les ressources en eau et l'hydrologie, tout comme sa rétroaction sur les variables météorologiques locales, notamment l'étude des « îlots de fraîcheur » potentiellement formés par les zones agricoles abondamment irriguées. Néanmoins, les conclusions de cette étude ne s'en tiennent pour l'instant qu'à quelques parcelles. L'exploitation de la méthode pour l'estimation des flux hydrométéorologiques de manière spatialisée reste encore à explorer et évaluer. De plus, certains agrosystèmes sont beaucoup plus dépendants de l'irrigation que le Sud-Ouest de la France, en particulier dans les milieux semi-aride, comme les pays du Maghreb. Dans ce type d'écosystème, l'impact relatif de l'irrigation sur les flux et les ressources en eau se trouve exacerbé, dans un contexte où les enjeux sont particulièrement critiques. C'est pourquoi le dernier axe de cette thèse va viser à exploiter les méthodes présentées dans les deux premiers chapitres afin d'améliorer la compréhension spatialisée des flux en milieu semi-aride.

Chapitre 3

Chapitre 3. : Estimation spatialisée des flux hydrométéorologiques en contexte agricole semi-aride irrigué

1. Introduction

Les agrosystèmes semi-arides, de par leur exposition à des conditions climatiques difficiles, présentent des enjeux extrêmement forts en termes de gestion de l'eau et de sécurité alimentaire. La plaine agricole de Kairouan, en Tunisie centrale, symbolise parfaitement ces enjeux. En-effet, cet agrosystème, un des plus importants de Tunisie, profite de la présence d'un des aquifères les plus grands du pays pour permettre l'irrigation des cultures. Néanmoins, cet aquifère est aujourd'hui surexploité, posant de graves problèmes pour l'alimentation en eau de la région dans les décennies à venir (Leduc et al., 2017). C'est pourquoi l'Institut pour la Recherche et le Développement (IRD) consacre de nombreux travaux à l'étude de ce système, en collaboration avec différents acteurs de la recherche et du monde agricole tunisien, en particulier l'Institut National Agronomique de Tunisie (INAT), et au travers de différents projets, notamment le projet ANR AMETHYST (<https://anr.fr/Projet-ANR-12-TMED-0006>), qui vise à l'évaluation des ressources et usages de l'eau dans le sud de la Méditerranée, ou encore le projet TOSCA PITEAS (Boulet et Oliosio, 2017-2019), visant à estimer l'évapotranspiration journalière de manière spatialisée.

Comprendre le fonctionnement des cultures et les impacts anthropiques, notamment de l'irrigation, dans un tel écosystème pourrait permettre de mieux estimer les impacts sur l'aquifère et une meilleure gestion des ressources en eau. L'estimation des flux hydrométéorologique de manière spatialisée, et plus particulièrement de l'évapotranspiration, variable clé de la compréhension du fonctionnement hydrique des cultures, devrait ainsi pouvoir apporter des éléments de réflexion.

L'usage combiné de la modélisation hydrométéorologique et de données de télédétection, comme le montre les premiers chapitres de cette thèse, est une des pistes les plus prometteuses pour répondre à cette problématique d'estimation spatialisée des flux. Plusieurs études de modélisation sur la plaine de Kairouan (Saadi et al., 2015, 2017) ont déjà démontré l'intérêt de l'utilisation des données satellites dans différents outils de modélisation, que ce soit des modèles de bilan d'énergie, comme SPARSE (Boulet et al., 2015), utilisant notamment la capacité des acquisitions dans l'infrarouge thermique à renseigner sur la température de surface, variable clé du bilan d'énergie, ou des modèles

agronomiques, à l'image de SAMIR (Simonneaux et al., 2009), qui eux vont notamment exploiter les données satellites dans le domaine optique et leur capacité à intégrer des informations sur le bilan hydrique. Néanmoins, la comparaison des résultats de ces différentes études est difficile à réaliser dans la mesure où elles sont effectuées à des résolutions spatiales très différentes, l'approche SVAT étant évaluées sur un domaine restreint de quelques dizaines de kilomètres carrés et utilisant des données satellite à haute résolution (Saadi et al., 2015), tandis que les approches par bilan d'énergie ont été utilisées avec des données MODIS à résolution kilométrique (Saadi et al., 2018) sur des échelles avoisinant le millier de kilomètres carrés. Néanmoins, l'exploitation des données de la campagne de scintillométrie réalisée sur la zone (Saadi et al., 2018) fournit une occasion exceptionnelle d'évaluer et comparer ces différentes approches de manière spatialisée et par une méthode innovante. L'objectif de ce chapitre est donc, dans un premier temps, d'établir une simulation de référence avec le modèle SURFEX-ISBA sur un sous-domaine de la plaine de Kairouan et de l'évaluer de manière spatialisée sur la base des données de scintillométrie, puis, dans un second temps, inter-comparer cette simulation avec des modèles de bilan d'énergie, utilisés cette fois ci à haute résolution dans le cadre du projet TOSCA PITEAS, visant à l'estimation journalière de l'évapotranspiration à partir de données infrarouge thermique. Cette inter-comparaison devrait ainsi permettre, via l'analyse des différences entre chacune des approches, de mieux estimer la répartition spatiale des flux et comprendre les processus en jeu, en particulier la place de l'irrigation dans le bilan hydrique régional à l'échelle annuelle.

2. Zone d'étude

La zone d'étude de ce troisième axe est un carré de 25 km² situé dans le bassin de l'oued Merguellil, à l'ouest de la ville de Kairouan, en Tunisie (Fig. III-1.1). Ce carré se situe plus particulièrement dans les alentours du village de Sidi Ali Ben Salem. Il fait partie d'une vaste plaine agricole alimentée de manière intermittente par différents oueds, dont le Merguellil. L'eau issues de la partie amont du bassin, relativement montagneuse, est collectée par le barrage d'El Haouareb, construit en 1989. L'eau sur l'ensemble de la plaine s'écoule vers deux dépressions, nommées sebkhas : les sebkhas d'El-Kabia et de Sidi-El-Heni.



Figure III-1.1: Zone d'étude. En dégradé rouge-orange, l'emprise du scintillomètre (section 3.3.2)

Le climat de la zone peut être qualifié de semi-aride chaud, avec une pluviométrie annuelle moyenne de 320 mm relevée à la station météorologique de Kairouan (1986-2016, Fig. III-1.2) mais avec une forte variabilité interannuelle, allant de 160 mm pour l'année hydrologique (de Septembre à Août) la plus sèche (2000-2001) à 575 mm l'année la plus humide (1989-1990). Les mois de Septembre, Octobre et Mars sont les plus arrosés (Fig. III-1.3), avec des épisodes pluvieux très intenses, alors que les mois d'été sont très secs. Des épisodes pluvieux interviennent également de manière fréquente en hiver, mais avec des intensités relativement faibles. Les températures y sont également élevées (Fig. III-1.4) avec cependant un fort contraste thermique entre été et hiver, avec une température moyenne de 10 °C en Janvier et de plus de 28 °C en Juillet, la température maximale moyenne dépassant quant à elle les 37 °C sur ce même mois.

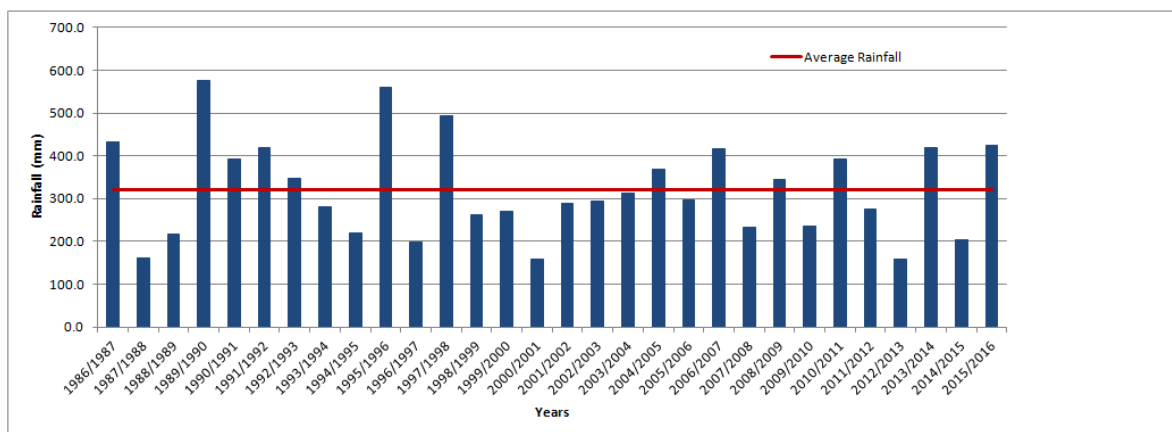


Figure III-1.2: Pluviométrie annuelle à la station météorologique de Kairouan sur la période 1986-2016. Source graphique : Saadi (2018)

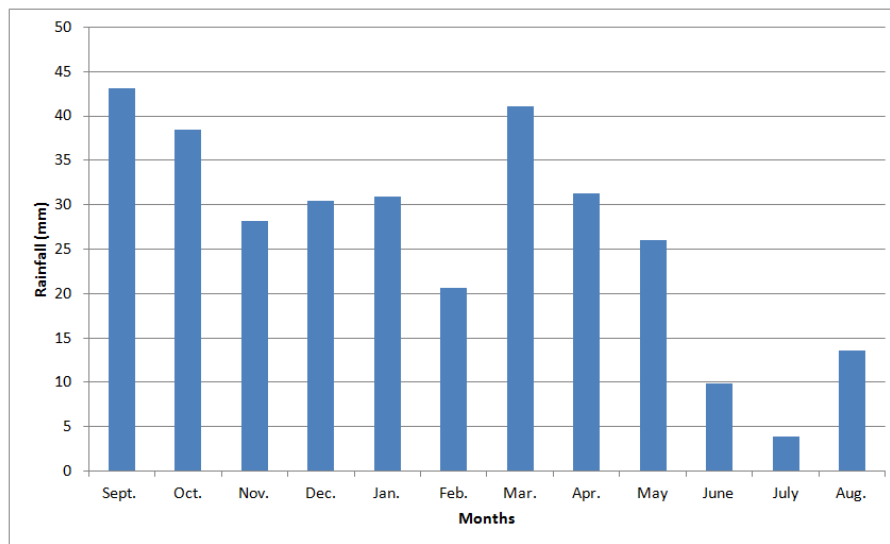


Figure III-1.3: Précipitations mensuelles moyennes à la station météorologique de Kairouan (1986-2016). Source graphique : Saadi (2018)

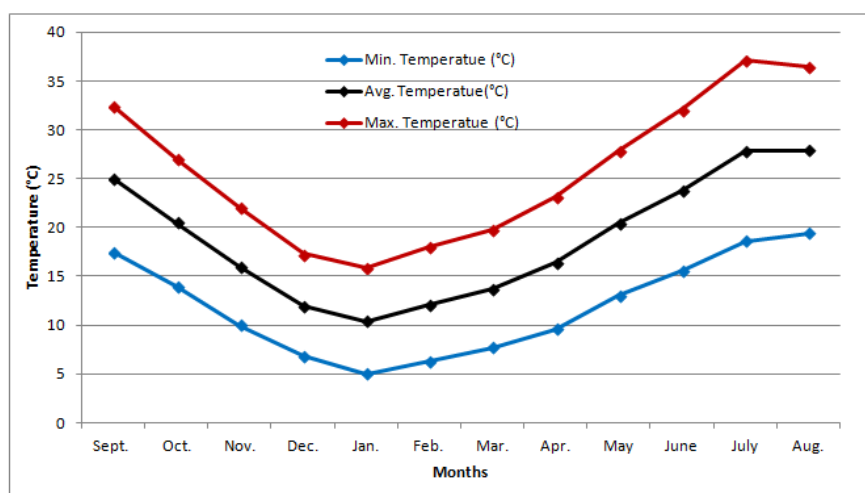


Figure III-1.4: Températures moyennes mensuelles à la station de Kairouan (1986-2016). Source graphique : Saadi (2018)

La zone d'étude est essentiellement agricole mais inclut également la zone urbaine du village de Sidi Ali Ben Salem. Les cultures principales y sont l'olivier, les céréales d'hiver (blé, orge) ainsi que le maraîchage. Le barrage collecte la majeure partie des écoulements provenant de la partie amont du bassin, empêchant ainsi l'oued d'alimenter le lit aval en eau excepté lors des crues. De petits aménagements de surface, peu efficaces, permettent un usage des eaux de pluies pour l'agriculture. Une partie non négligeable de ces écoulements s'infiltre pour alimenter des nappes phréatiques de tailles variables et à différentes profondeurs, souvent interconnectés, dû à l'hétérogénéité du sous-sol. L'eau utilisée pour l'irrigation des cultures, largement pratiquée dans la zone, provient principalement du barrage et de pompages, licites ou non, dans ce système de nappes. Ces

réserves souterraines sont actuellement surexploitées, comme en atteste les relevés piézométriques dans la zone (Fig. III-1.5).

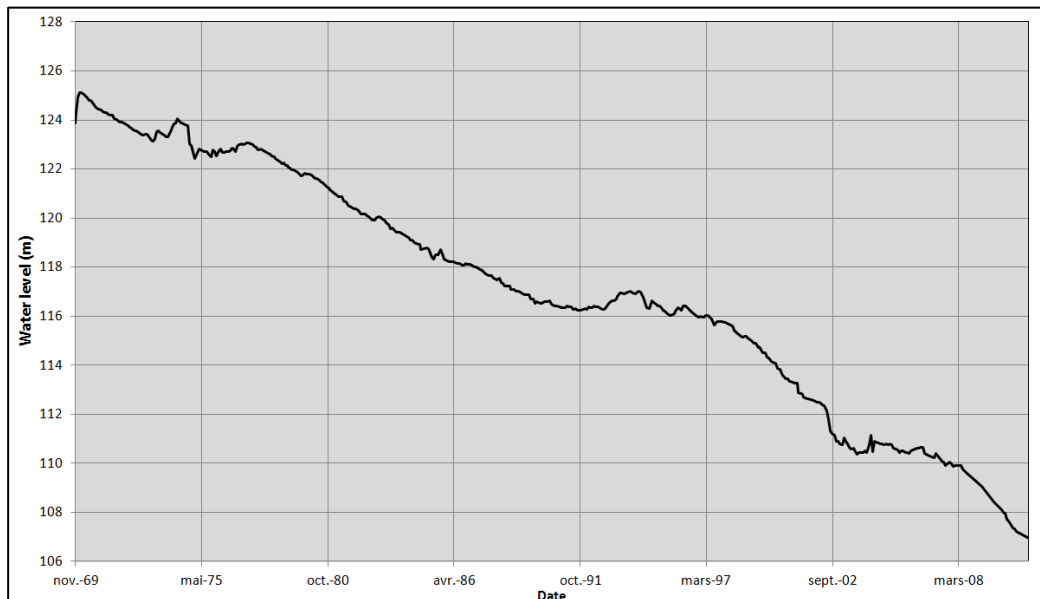


Figure III-1.5: Variation du niveau piézométrique de l'aquifère de Kairouan au piézomètre d'El Grin (9°50' 52" E; 35° 36' 13" N). Source : DGRE

3. Données

3.1 Données satellite

3.1.1 SPOT-5

SPOT est une mission spatiale d'observation de la terre française, en collaboration avec la Belgique et la Suède, décidée en 1977. Le cinquième satellite du programme, SPOT-5 a été lancé en 2002 et a terminé sa mission en 2015. Ce satellite a réalisé des acquisitions à 10 m de résolution dans 5 bandes de fréquence : vert, rouge, proche et moyen infra-rouge, ainsi qu'une bande panchromatique. Ses miroirs ajustables lui permettaient d'amener sa fréquence de revisite à 3 à 5 jours. Les réflectances ont subi une correction géométrique, du fait de l'angle d'acquisition du satellite, puis atmosphérique (Rahman et Dedieu, 1994) avant de subir une normalisation radiométrique visant à atténuer les incertitudes sur les paramètres utilisés lors de la correction atmosphérique et éliminer les artefacts liés au traitement de la série temporelle. Cette correction a été faite sur la base des données issues de l'expérience SPOT-4 Take 5, expérience servant de démonstrateur des caractéristiques de SPOT-5 par la désorbitation du satellite SPOT-4 en fin de vie, en utilisant la méthode des entités pseudo-invariantes (Eckhardt et al., 1990). Le but est de repérer dans la scène un certains nombres d'entités dont les réflectances sont supposées ne pas varier dans le temps afin de normaliser chaque image. Ces corrections ont été réalisées et décrites dans la thèse

de Sameh Saadi (2018). On dispose ainsi de 27 images claires sur la période temporelle. Plusieurs produits ont été créés à partir de ces acquisitions, notamment des séries temporelles de NDVI, allant de Novembre 2012 à Mars 2015 (Saadi, 2018), ainsi que des cartes d'occupation des sols (Fig. III-2.1), produites via des seuillages de NDVI sur les différentes dates disponibles, pour les années hydrologiques 2012-2013 et 2013-2014 (Chahbi, 2015).

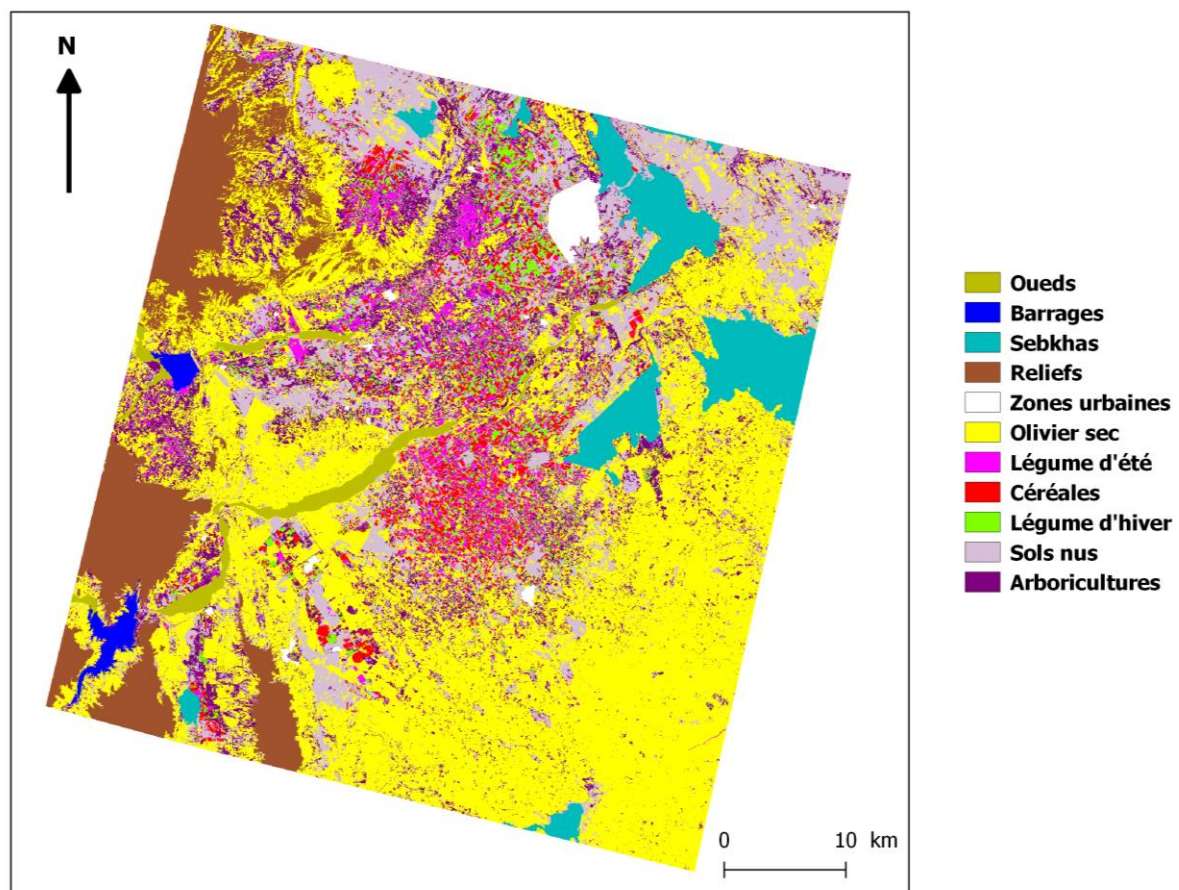


Figure III-2.1: Carte d'occupation des sols SPOT-5 sur la plaine de Kairouan pour la saison 2012-2013

3.1.2 LANDSAT-8

Landsat-8 est un satellite lancé par la NASA en 2013. Il possède 2 instruments :

- l'Operational Land Imager (OLI) qui acquiert des données dans 9 bandes de fréquences à 30 m de résolution : bleu, vert, rouge, proche infra-rouge, deux bandes en moyen infra-rouge, une bande panchromatique (à 15 m de résolution), ainsi que deux dédiées respectivement à la détection des aérosols (0.433 à 0.453 μm) et des cirrus (1.360 à 1.390 μm).
- Le Thermal InfraRed Sensor (TIRS) qui acquiert des données dans deux bandes d'infra-rouge thermique à 100 m de résolution.

Sa fréquence de revisite est de 16 jours.

Plusieurs produits ont été calculés par des relations empiriques sur la base des réflectances mesurées par Landsat-8 et fournies par l'USGS dans le cadre du post-doctorat d'Emilie Delogu, sur la période allant de décembre 2013 à décembre 2014 :

- Le NDVI
- L'albédo calculé selon la formule empirique suivante :

$$\text{Albedo} = 0.012055 * R_{\text{vert}} + 0.36875 * R_{\text{NIR}} + 0.47867 * R_{\text{MIR2}} \quad [\text{Eq. III-1.1}]$$

où R_{vert} est la réflectance dans la bande verte, R_{NIR} la réflectance dans la bande de proche infra-rouge et R_{MIR2} la réflectance dans la seconde bande d'infra-rouge moyen. Cette formulation est incluse par défaut dans le modèle EVASPA ([Sect. 5.1.1](#)).

- Le LAI, issu du NDVI, selon la formulation de [Hadria et al. \(2006\)](#) établie sur des cultures de blé au Maroc:

$$\text{LAI} = -\frac{1}{k} * \ln\left(\frac{\text{NDVI}_{\text{max}} - \text{NDVI}}{\text{NDVI}_{\text{max}} - \text{NDVI}_{\text{sol}}}\right) \quad [\text{Eq. III-1.2}]$$

avec $k = 0.54$, $\text{NDVI}_{\text{max}} = 0.93$ et $\text{NDVI}_{\text{sol}} = 0.14$

- Le FCOVER, calculé à partir du NDVI :

$$\text{FCOVER} = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{max}}}{\text{NDVI}_{\text{sol}} - \text{NDVI}_{\text{max}}} \quad [\text{Eq. III-1.3}]$$

- L'émissivité de la surface :

$$\varepsilon = \varepsilon_i + (\varepsilon_s - \varepsilon_i) * \left(\frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{max}}}{\text{NDVI}_{\text{sol}} - \text{NDVI}_{\text{max}}}\right)^k \quad [\text{Eq. III-1.4}]$$

où $\varepsilon_i = (0.979 + 0.994)/2$, $\varepsilon_s = 0.966$ et $k = 2.5$

- La température de surface ([Fig. III-2.2](#)), estimée à partir des mesures du TIRS via la chaîne LANDARTs ([Tardy et al., 2016](#))

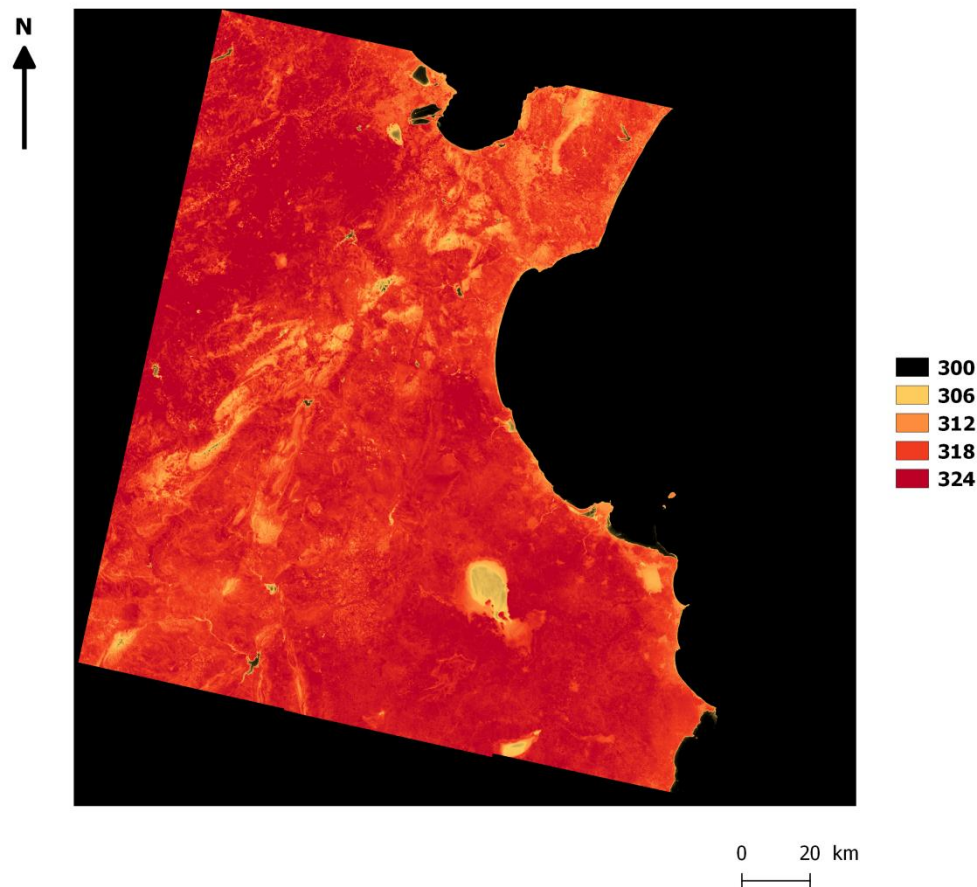


Figure III-2.2: Température de surface, en K, le 28/06/2014 sur la Tunisie centrale, estimée à partir des données infrarouge thermique de Landsat-8 via la chaîne LANDARTs

3.1.3 Pléiades

Pléiades est un couple de satellite lancés par le CNES en 2011 et 2012. Ils mesurent les réflectances à une résolution de 2 m dans 5 bandes de fréquence : bleu, vert, rouge, proche infra-rouge et une bande panchromatique qui a elle une résolution de 50 cm. Ceci permet d'obtenir des images stéréoscopiques de la surface avec une grande précision. La grande maniabilité des satellites permet une revisite quotidienne sur une zone précise, le satellite réalisant les acquisitions sur demande.

Des images stéréoscopiques acquises en 2012 ont permis à Bernard Mougenot (IRD/CESBIO) de réaliser une carte allométrique, permettant d'estimer, sur un ensemble de parcelles d'olivier, la hauteur et la surface couverte par les arbres, ainsi que la distance inter-arbre (Fig. III-2.3).

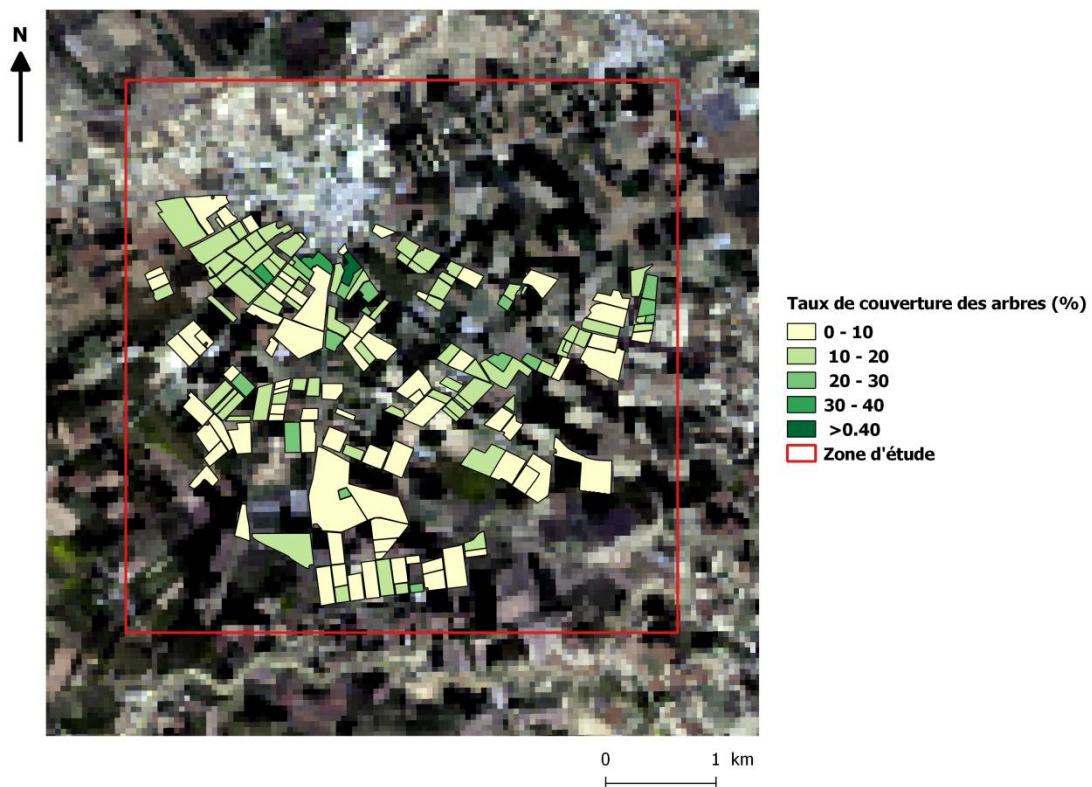


Figure III-2.3: Taux de couverture des arbres en arboriculture en 2012 estimé à partir des images Pléiades (Fond de carte Landsat-8 en fausses couleurs)

3.2 Données météorologiques et propriétés des sols

Les variables atmosphériques sont issues de la station météorologique de Ben Salem ($35^{\circ} 33' 1''$ N, $9^{\circ} 55' 18''$ E). Cette station a été installée en 2011 dans le cadre du programme SudMed porté par le CESBIO. Il s'agit d'une station automatique Campbell Scientific (Logan, USA) qui mesure, à pas de temps semi-horaire le rayonnement global incident (R_G), les précipitations, la vitesse et la direction du vent, ainsi que la température et l'humidité de l'air à une hauteur de 2.32 m. R_G est mesuré par un pyranomètre Sr11 (Wittich, Netherland), la température et l'humidité de l'air par un thermo-hygromètre HMP45C (Vaisala, Finland), les composantes du vent avec un anémomètre-girouette R.M.010305 (Young, USA) et la pluie avec un pluviomètre à auget basculant SBS500 (Campbell Scientific, USA). Les données ont été filtrées pour exclure les valeurs aberrantes ainsi que les artefacts de mesure. Les séries temporelles ont ensuite été comblées, soit par interpolation linéaire, lorsque la période vide n'était que d'un pas de temps, soit en utilisant les données acquises sur un des sites de mesure de flux (Sect. 3.3.1) ou à la station météorologique la plus proche, la station de l'Institut National des Grandes Cultures (INGC, $35^{\circ} 37' 14''$ N, $9^{\circ} 56' 16''$ E) lorsque la période d'absence de données était plus longue. Ce traitement a été réalisé dans le cadre de la thèse de Sameh Saadi (2018). Etant donné la petite taille de la zone d'étude et le relief relativement faible à l'intérieur de celle-ci, ces données météorologiques ont été utilisées comme données d'entrée pour l'ensemble de la

zone, faisant ainsi l'hypothèse d'une faible hétérogénéité spatiale des variables météorologiques au pas de temps semi-horaire.

La texture des sols est déduite d'une carte d'argile produite par [Shabou et al. \(2015\)](#). ISBA utilise également la fraction de sable, qui n'est pas disponible sur la zone, au même titre que les fractions de limon et d'éléments grossiers. Elle a donc été déterminée comme étant égale à 90% moins le taux d'argile. Des fonctions de pédo-transfert associées, basée uniquement sur la fraction d'argile, ont été établies sur la base de tests d'infiltration suivant la méthode BEST ([Lassabatère et al., 2006](#)).



Figure III-2.4: Station de mesure de flux sur la parcelle de blé sec de Ben Salem

3.3 Mesures in-situ

3.3.1 Tours d'eddy-corrélation

Trois stations automatiques de mesures de flux de type Campbell Scientific (Logan, USA) ont été installées dans ou à proximité de la zone d'étude. Ces stations mesurent ainsi le rayonnement net R_n , grâce à un radiomètre et le flux de conduction thermique dans le sol G , grâce à cinq plaques de mesure de flux réparties uniformément dans une zone de sol proche de la tour de flux. Les composantes tridimensionnelles du vent ainsi que les fluctuations de température de l'air sont également mesurées grâce à un anémomètre CSAT3. L'humidité de l'air est elle mesurée grâce à un hygromètre KH20 qui mesure les fluctuations de vapeur d'eau. Ces mesures sont couplées aux mesures d'un thermo-hygromètre afin d'obtenir les valeurs absolues de température et d'humidité de l'air. La première a été installée à quelques dizaines de mètres de la station météorologique de Ben Salem ([Sect. 3.2](#)), dans un champ irrigué, mesurant les flux de Décembre 2011 à Novembre 2014 sur de l'orge (2011-2012), du blé (2012-2013) et du piment (2013-2014). La seconde a été installée de Janvier à

Juin 2012 dans un champ de blé pluvial (35° 33' 32" N ; 9° 56' 25" E). Enfin la troisième a été installée de Mars 2012 à Septembre 2016 dans un champ d'olivier pluvial à quelques kilomètres au sud de la zone d'étude, sur la délégation de Nasrallah. Cette dernière est en réalité composée de 2 stations, la première mesurant les flux au-dessus d'un arbre quand la seconde mesure les flux sur du sol nu entre deux arbres. Les données des deux stations de Ben Salem ont été traitées dans le cadre de la thèse de [Sameh Saadi \(2018\)](#). En particulier, devant le manque de fermeture du bilan d'énergie mesuré, le flux de chaleur latente a été recalculé comme étant le résidu du bilan d'énergie calculé à partir des trois autres variables mesurées (R_n , G et H). Les données de la station de Nasrallah ont quant à elles été traitées dans le cadre de la thèse de Wafa Chebbi ([Chebbi et al., 2018](#)). Sur l'ensemble de ces sites, des mesures d'humidité des sols ont été réalisées grâce à des sondes thetaprobe. La parcelle de Nasrallah est également équipée de mesures de flux de sève dans les troncs d'arbres, permettant de calculer la transpiration de ces derniers et de la ramener à l'échelle de parcelle ([Chebbi et al., 2018](#)).

3.3.2 Scintillomètre à large ouverture XLAS

Un scintillomètre à large ouverture (XLAS) Kipp and Zonen a été installé de Mars 2013 à Juin 2015 dans la zone d'étude ([Fig. III-1.1](#)). Un émetteur, installé sur un château d'eau (35° 34' 0.7" N ; 9° 53' 25.19" E ; 127m d'altitude) émet un faisceau monochromatique de longueur d'onde 940 nm en direction d'un récepteur possédant une ouverture de 30cm, également placé sur un château d'eau à environ 4 km de distance (35° 34' 17.22" N ; 9° 56' 7.30" E ; 145 m d'altitude). Le principe est de mesurer les déviations du faisceau, qui dépendent des changements d'indice de réfraction de l'air traversé ([Fig. III-2.5](#)). Ce dernier dépendant des conditions atmosphériques turbulentes, il permet de déterminer, via une méthode proposée par [Green et Hayashi \(1998\)](#) la partie turbulente de l'équation [1.3], permettant ainsi l'estimation du flux de chaleur sensible H , mesuré ici à pas de temps semi-horaire.

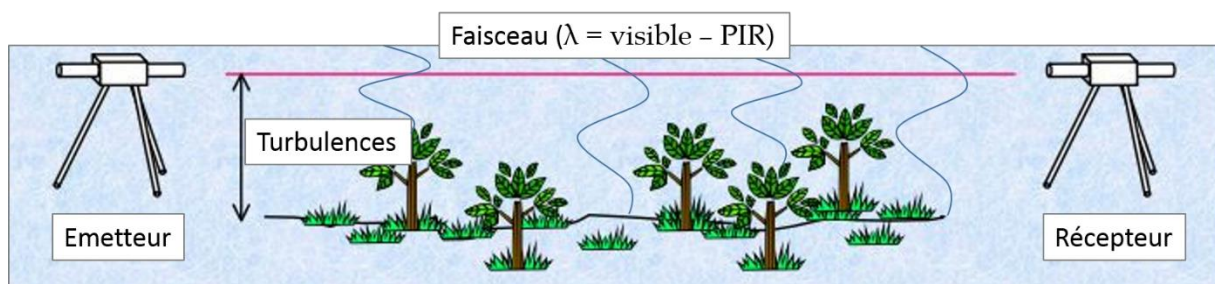


Figure III-2.5: Principe de fonctionnement du scintillomètre (Source : J.M. Cohard, IGE)

Le système de mesure étant situé à 20 m au-dessus du sol, il est représentatif d'une zone d'émission de flux turbulents assez étendue, appelée emprise du scintillomètre, qui dépend des conditions atmosphériques et notamment du vent. L'emprise a été calculée toutes les demi-heures dans le cadre du CDD de Malik Bahir et de la thèse de [Sameh Saadi](#)

(2018, Fig. III-1.1) en utilisant le modèle d'emprise décrit par Horst et Weil (1992). A l'intérieur de cette emprise, calculée à la résolution des images SPOT-5, chaque pixel possède une valeur indiquant sa part de contribution au flux mesuré, la somme de ces valeurs sur l'ensemble de l'emprise valant 95%. Les 5% restants proviennent de l'extérieur de l'emprise mais il n'est pas possible d'en indiquer la provenance exacte. Ce système de mesure donne ainsi une occasion unique d'évaluer des modèles hydrométéorologiques de manière intégrée spatialement à l'échelle du paysage.

3.3.3 Observations d'irrigation à l'échelle du périmètre irrigué

Des données de volumes pompés pour l'irrigation sont également disponibles à l'échelle de périmètres irrigués, les Groupements de Développement Agricoles, ou GDA. Ces volumes sont renseignés de manière mensuelle, en m³ prélevés pour l'ensemble du périmètre, de 2008 à 2015. Le GDA de Ben Salem II est inclus dans la zone d'étude (Fig. III-2.6). Bien que la mesure soit fiable, car le périmètre est géré par un collectif avec des équipements d'irrigation récents, il subsiste une incertitude sur la délimitation du périmètre irrigué réel. En-effet, nous avons observé que certaines parcelles à l'extérieur du périmètre officiel profitent de l'eau pompée, la quantification de la part du volume total que cela représente n'étant pas connue. Cette incertitude est cependant relativement faible du fait de l'adaptation du périmètre et de l'intégration de la plupart de ces parcelles après enquête auprès des agriculteurs. Notons qu'il n'y a à priori pas de pompage privé déclaré dans le périmètre du GDA. Néanmoins, l'existence de pompages illicites, pratique fréquente dans la région, peut également ajouter de l'incertitude sur les volumes d'eau réellement utilisés sur le périmètre.

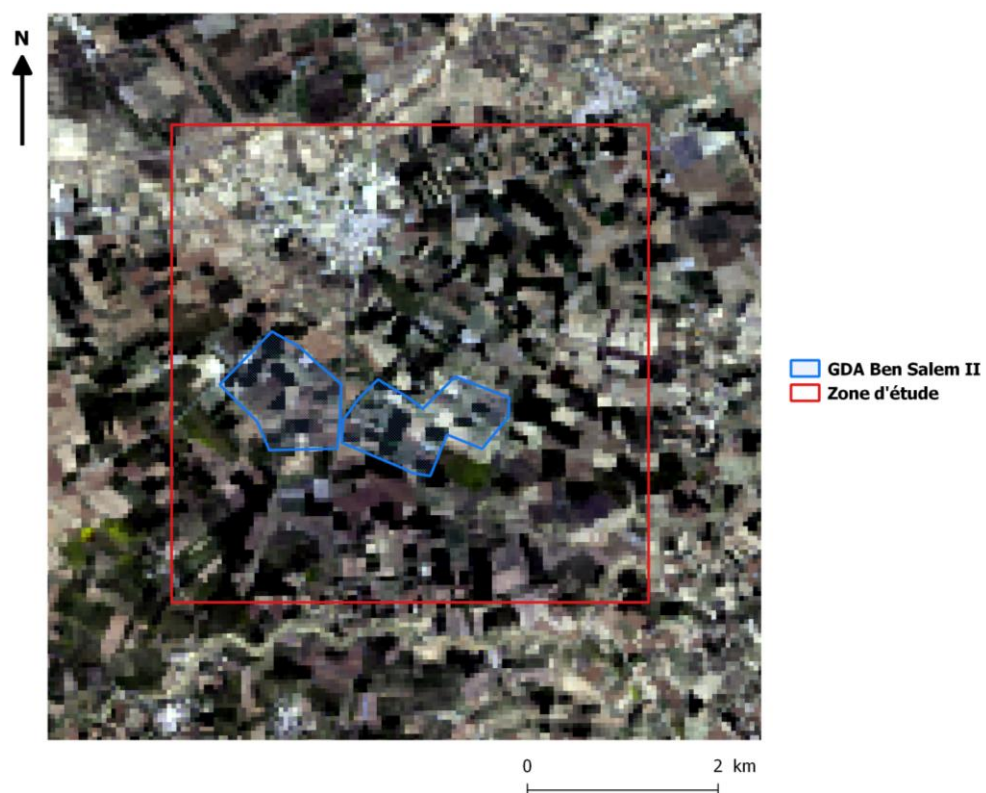


Figure III-2.6: Périmètre irrigué du GDA de Ben Salem II (fond de carte Landsat-8 en fausses couleurs)

4. Comparaison aux mesures scintillométriques

4.1 Méthodes

4.1.1 Mise en place des simulations SURFEX-ISBA spatialisées

Afin de simuler spatialement la zone d'étude, j'ai employé la méthode de simulation « par parcelle » décrite au [chapitre I, section 5.3](#). La simulation s'étend de Septembre 2012 à Août 2014. Les parcelles utilisées comme mailles de calcul sont issues de l'intersection entre la segmentation de la carte d'occupation des sols SPOT-5 de 2012-2013 et de celle de 2013-2014, après érosion de 10m, correspondant à la largeur d'un pixel SPOT, afin d'éviter les effets de bord. Cela représente un total de 1307 parcelles à simuler. L'agrégation des classes d'occupation des sols sur les PFT équivalents de SURFEX-ISBA pour chaque année est décrite dans la [table III-1.1](#).

Les parcelles ont donc chacune un type de végétation unique, à l'exception des parcelles classées en forêt tempérée de feuillus à feuilles persistantes qui possèdent une partie de sol nu et une partie de végétation dû à la forte hétérogénéité du couvert ([Sect. 4.1.2](#)). Le transfert d'eau et d'énergie dans le sol dans cet axe se fait sur 3 couches de sol, mais cette fois avec le schéma diffusif ([Chap. I, Sect. 2](#)), contrairement aux deux axes précédents utilisant une approche de type force-restore, afin de pouvoir simuler une extraction racinaire dans la couche de surface, point extrêmement important en milieu semi-aride. En-effet, l'eau s'évapore très vite en surface et ne pénètre que peu dans le sol. La végétation a donc tendance à développer un système racinaire avec une forte extraction proche de la surface. L'irrigation a également été simulée, avec des paramètres décrits dans la [section 4.1.2](#).

Classes SPOT-5 2012-2013	Classes SPOT-5 2013-2014	PFT SURFEX-ISBA
1. Oueds 3. Sebkhas 10. Sol nu	1. Oueds 3. Sebkhas 10. Sol nu	1. Sol nu
4. Reliefs 5. Urbain	4. Reliefs 5. Urbain	2. Roche
-	-	3. Neige et glace permanentes
-	-	4. Forêt tempérée de feuillus caducs
-	-	5. Forêt boréale de conifères à feuilles persistantes
-	-	6. Forêt tropicale de feuillus à feuilles persistantes
7. Légumes d'été 8. Céréales 9. Légumes d'hiver	7. Légumes d'été 8. Céréales 9. Légumes d'hiver 12. Fourrages 13. Fourrages et légumes d'été 14. Céréales et légumes d'hiver	7. Cultures en C3
-	-	8. Cultures en C4
-	-	9. Cultures irriguées en C4
-	-	10. Prairie
-	-	11. Prairie tropicale
-	-	12. Espaces verts urbains
-	-	13. Forêt tropicale de feuillus caducs
6. Olivier sec 11. Arboriculture	6. Olivier sec 11. Arboriculture	14. Forêt tempérée de feuillus à feuilles persistantes
-	-	15. Forêt tempérée de conifères à feuilles persistantes
-	-	16. Forêt boréale de feuillus caducs
-	-	17. Forêt boréale de conifères caducs
-	-	18. Toundra
-	-	19. Végétation ligneuse

Table III-1.1: Règles d'agrégation des classes entre les cartes d'occupation des sols SPOT-5 et les PFT de SURFEX-ISBA.

4.1.2 Détermination des paramètres des différents couverts

Les écosystèmes d'ECOCLIMAP-II ([Masson et al., 2003](#); [Faroux et al., 2013](#)) décrivent assez mal les types de végétation présents dans les agrosystèmes tunisiens, de part l'absence des PFT de culture en C3 et ceux d'arboriculture dans les écosystème présents en Tunisie. Pour ces types de végétation, les paramètres sont donc déterminés à partir de ceux utilisés dans l'écosystème le plus proche où les types de végétation sont présents. Pour les cultures, il s'agit donc le plus souvent des écosystèmes européens, où les couverts ont une phénologie différente du fait d'une période de culture décalée par rapport à la Tunisie. Une détermination complémentaire de certains paramètres a donc été nécessaire.

Concernant les cultures en C3, le LAI a été calculé depuis les données de NDVI SPOT-5 pour l'année hydrologique 2012-2013 et les données LANDSAT-8 pour 2013-2014, sur la base de l'équation [Eq. III-1.2] puis moyenné sur chaque parcelle et mensuellement, de manière similaire aux deux premiers axes de la thèse. La fraction de couvert végétal (FCOVER) a également été calculée sur la base du NDVI grâce à l'équation [Eq. III-1.3]. La hauteur de rugosité en mètres, nommée Z0, a quant à elle été calculée à partir du LAI sur chaque parcelle de la manière suivante :

$$Z0 = (0.13 - 0.005) * LAI / \max(LAI) \quad [\text{Eq. III-2.3}]$$

La résistance stomatique minimale, $RS_{\min}$, et la profondeur d'enracinement, D_{root} , ont quant à elle été étalonnées à partir des mesures de flux faites sur les parcelles d'orge irriguée et de blé sec de Ben Salem. L'année de blé irrigué n'a pas été prise en compte du fait de la trop grande incertitude sur la mesure de LE, le bilan d'énergie avant calcul du LE résiduel ne fermant qu'à 49% ([Saadi, 2018](#)). La simulation sur ces parcelles a été réalisée en utilisant les paramètres hydrodynamiques déterminés par [Saadi et al. \(2015\)](#). L'initialisation du contenu en eau du sol a été déterminée à partir des mesures d'humidité réalisées in-situ. Les irrigations observées sur le site d'orge irriguée ont quant à elle été rajoutées au forçage de précipitations. L'étalonnage a été réalisé indépendamment sur chaque parcelle et chaque année en utilisant un algorithme de type simplex ([Dantzig et al., 1955](#)) afin de minimiser le RMSE entre le flux de chaleur latente (LE) simulé et le LE observé à pas de temps semi-horaire sur la période de culture uniquement. Les résultats, synthétisés en [table III-1.2](#), m'ont amené à choisir une valeur de $RS_{\min} = 90 \text{ S.m}^{-1}$ et $D_{\text{root}} = 1.4 \text{ m}$, paramètres qui sont ainsi appliqués à l'ensemble des cultures en C3 de la zone d'étude.

	Orge irriguée (2011-2012)	Blé sec (2011-2012)
RS_{min} ($s.m^{-1}$)	90	94
D_{root} (m)	1.38	1.50
RMSE LE ($W.m^{-2}$)	64.3	48.4

Table III-1.2: Résultats de l'optimisation de la profondeur racinaire (D_{root}) et de la résistance stomatique minimale (RS_{min}) sur la simulation de l'évapotranspiration sur les sites flux.

Les autres paramètres pour les couverts de type C3 sont quant à eux issus d'ECOCLIMAP-II.

Concernant les parcelles d'arboriculture (très majoritairement de l'olivier), l'hétérogénéité du couvert rend complexe l'utilisation directe des données satellite, dont le signal sur les arbres devrait être démixé du signal du sol nu. Etant donné la faible variation de LAI sur les arbres à feuilles persistantes, j'ai donc décidé d'utiliser une valeur fixe de LAI de $3.5 m^2.m^{-2}$, conformément aux mesures réalisées sur le flux de Nasrallah. La carte d'allométrie issue des données Pléiades a ensuite permis de calculer le taux de couverture moyen des arbres dans les parcelles d'olivier de la zone, qui est de 12% environ. Les travaux de thèse de Wafa Chebbi, qui se concentrent sur l'estimation de la partition entre évaporation et transpiration sur le site flux de Nasrallah, ont montré que pour obtenir une transpiration cohérente, vis-à-vis de mesures de flux de sève, ce taux de couverture devait être multiplié par 4 dans un modèle comme SURFEX-ISBA. En-effet, le taux de couverture ne prend en compte que l'emprise au sol verticale de l'arbre. Mais la surface d'échange entre l'arbre et l'atmosphère est bien plus grande que cela, l'arbre pouvant libérer sa transpiration de manière latérale. En faisant l'hypothèse que l'arbre a une forme de sphère, sa surface d'échange peut donc être approximée par la superficie de cette sphère, qui est égale à 4 fois la surface du disque de même rayon habituellement considéré. Enfin, l'irrigation, de type goutte-à-goutte, n'a lieu que directement sous l'arbre et non pas sur la surface entière du champ. Les parcelles d'olivier ont donc été simulées avec 2 PFT distincts selon les proportions suivantes : 48% d'arboriculture et 52% de sol nu. A l'intérieur du PFT arboriculture, le LAI est ainsi de $3.5 m^2.m^{-2}$ et le FCOVER de 1. La hauteur de rugosité Z_0 a été estimée de la manière suivante :

$$Z_0 = 0.13 * h \quad [Eq. III-2.4]$$

Où h est la hauteur moyenne des arbres sur la carte d'allométrie, ce qui donne une valeur unique de $Z_0 = 0.4550 m$. La profondeur racinaire quant à elle a été prescrite à une valeur de 1.5 m, sur la base des mesures et de l'expertise de l'INAT concernant les oliveraies irriguées, les oliveraies pluviales ayant pour leur part un profil racinaire très différent, avec

un développement latérale important en surface et une racine pivot qui peut aller à plusieurs mètres de profondeur (Chebbi et al., 2018). Ce choix a été fait après avoir constaté sur le terrain que la majeure partie des oliveraies de la zone d'étude sont irriguées en goutte-à-goutte. L'extraction racinaire de ces oliviers étant relativement forte en surface, la fraction racinaire a été fixée de sorte que 40% des racines se situent dans les 10 premiers centimètres de sol, les 60% restant couvrant de 10 à 150 cm de profondeur. La résistance stomatique a quant à elle été fixée à 400 s.m^{-1} sur la base des travaux de thèse de Wafa Chebbi. De la même manière que les cultures en C3, les autres paramètres de couvert ont été pris dans la base ECOCLIMAP-II.

4.1.3 Paramètres d'irrigation

J'ai réalisé deux simulations dans cet axe. La première, qui sert de référence, utilise les paramètres décrits dans la section 4.1.2 mais sans simuler l'irrigation. La seconde quant à elle vise à ajouter la simulation de l'irrigation, en utilisant le module décrit au chapitre II, section 4.2.1.2, permettant d'adapter des pratiques d'irrigation couramment rencontrées sur la zone. Ne disposant pas pour l'heure de cartes de cultures irriguées, j'ai fait le choix d'irriguer l'ensemble des parcelles cultivées (C3 et arboriculture). Ce choix semble être le plus cohérent vis-à-vis des observations faites lors de ma visite du site réalisée dans le cadre de la collaboration avec l'INAT, où nous avons pu constater la présence de quelques parcelles de céréales et d'olivier non irriguées, mais très peu nombreuses.

Les paramètres d'irrigation utilisés pour chaque type de culture sont résumés en table III-1.3.

Paramètres	Cultures en C3	Arboriculture
Type d'irrigation	Aspersion	Goutte-à-goutte
Dose (mm)	30	0.3-0.7
Durée d'application (h)	5	24
Temps de retour minimal (jours)	5	-
Seuil(s) de déclenchement (%AWC _{max})	0.45	0.35
Période d'irrigation	Par satellite	Toute l'année

Table III-1.3: Paramètres d'irrigation pour les différents types

En ce qui concerne les cultures en C3, les paramètres ont été fixés grâce à l'expertise de l'INAT. Seuls le seuil de déclenchement et la période d'irrigation ont été déterminés de manière différente. Ne disposant pas d'expertise sur l'humidité de déclenchement de

l'irrigation en fonction des stades phénologiques et n'ayant pas assez de mesures in-situ pour étalonner ces seuils, nous avons utilisé la valeur préconisée par la FAO (Allen et al., 1998), à l'instar de Saadi et al. (2015). Pour ce qui concerne la période d'irrigation, elle a été déterminée à partir du LAI satellite avec les mêmes critères que ceux utilisés au chapitre II, section 4.3.1, à savoir un seuil de LAI fixé à 0.4 et un délai de 45 jours de séchage de grain.

Concernant l'arboriculture, irriguée en goutte-à-goutte, les doses, variables en fonction des mois, ont été fixées à partir du référentiel technique pour la conduite de l'olivier proposé par l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, à Rabat au Maroc (Alaoui, 2005). Les oliviers sont donc arrosés avec les doses suivantes : 0.3 mm.jour⁻¹ en Janvier et Février, 0.5 mm.jour⁻¹ en Novembre et Décembre, 0.6 mm.jour⁻¹ en Mars et Octobre et enfin 0.7 mm.jour⁻¹ d'Avril à Septembre. Pour ce qui concerne le seuil de déclenchement de l'irrigation, nous avons là aussi opté pour un seuil fixe à 0.35% d'AWC_{max}, défini sur la base des valeurs de réserve facilement utilisables proposées par la FAO.

4.1.4 Méthode de comparaison aux mesures scintillométriques

Afin de pouvoir comparer les simulations de SURFEX-ISBA « par parcelles » aux mesures scintillométriques, plusieurs étapes ont été nécessaires. Premièrement, le fichier de forme issu de la segmentation des cartes d'occupation des sols, dont les polygones ont servi de maille de calcul aux simulations, a été dilaté à nouveau de 10 m, soit la valeur de laquelle il avait été érodé. Ce nouveau fichier a ensuite été rastérisé sur la grille des images SPOT-5, chaque pixel du raster contenant l'identifiant de la parcelle dont il est issu. L'appartenance des pixels à chaque parcelle a été déterminée par l'inclusion de leur centroïde dans cette dernière. A chaque pixel ont ainsi été associés les différents flux d'énergie, dont le flux de chaleur sensible H, issus des simulations de la parcelle correspondante à pas de temps semi-horaire. Les pixels n'ayant pas d'appartenance à une parcelle simulée, du fait de la suppression des polygones inférieurs à une certaine taille lors de l'extraction des NDVI, qui se trouvent être essentiellement des zones inter-parcelles, comme des routes ou des talus, se voient ainsi attribuer la moyenne des flux calculés sur les parcelles de sol nu. Ces matrices de H ont ensuite été multipliées à chaque pas de temps par les emprises du scintillomètre, calculées de manière semi-horaire également (Sect. 3.3.2) et déjà alignées sur la grille de SPOT-5. Cela a ainsi permis le calcul d'un flux intégré sur l'ensemble de la zone représentative du scintillomètre. Ce flux simulé est ainsi directement comparable aux valeurs mesurées moyennant l'utilisation d'un facteur multiplicatif de 0.95 sur ces dernières, symbolisant le fait que l'emprise ne représente que 95% de la valeur mesurée.

4.2 Résultats

La [figure III-3.1](#) présente la comparaison des flux de chaleur sensible H instantanés à pas de temps semi-horaire.

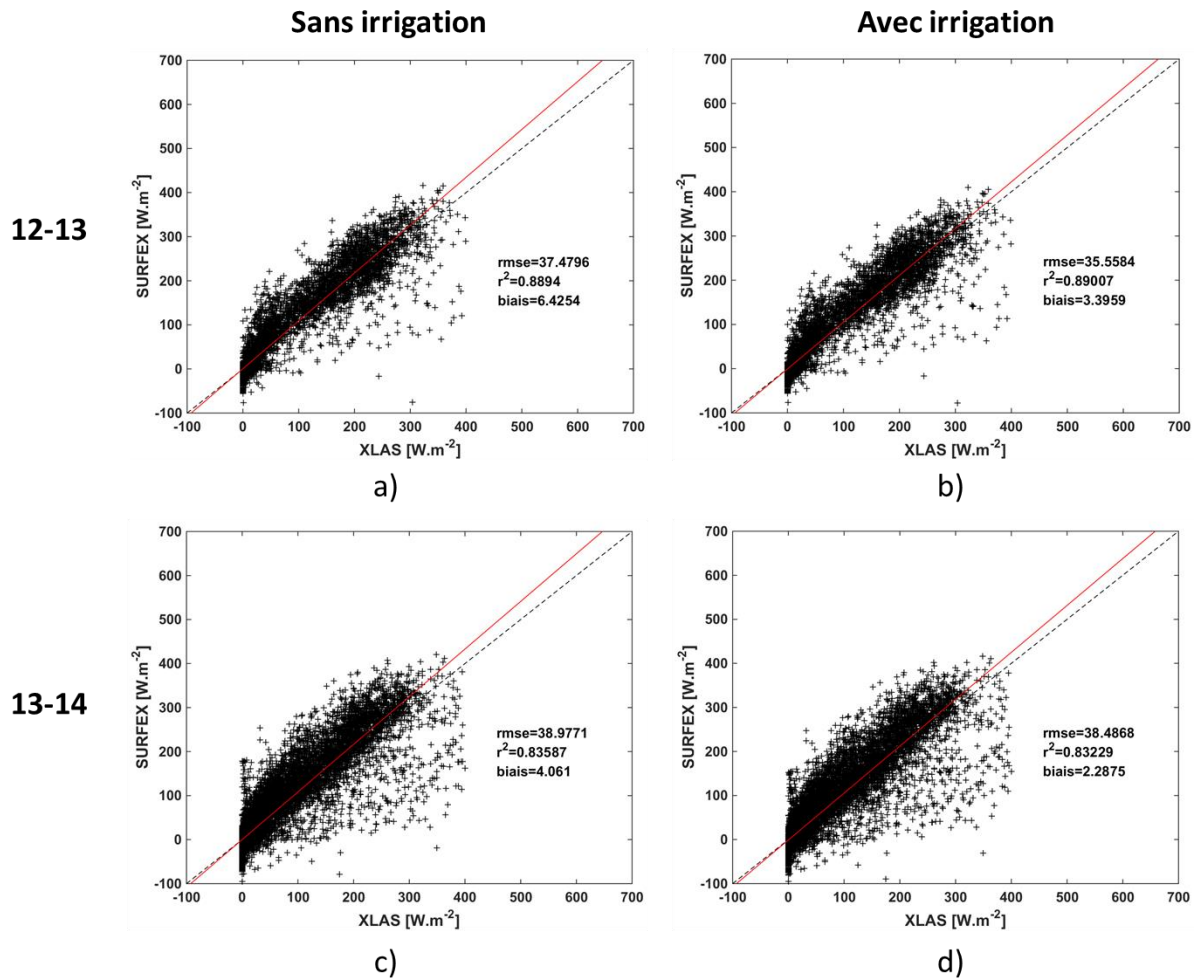


Figure III-3.1: Comparaison des flux de chaleur sensible H instantanés à pas de temps semi-horaire sans (a, c) et avec irrigation (b, d) pour les années hydrologiques 2012-2013 (a, b) et 2013-2014 (c, d).

On remarque premièrement une très bonne cohérence entre le flux de chaleur sensible observé et simulé, avec un RMSE inférieur à $40 W.m^{-2}$ et un R^2 entre 0.8 et 0.9. Le biais est également très faible, entre 5 et $9 W.m^{-2}$. On peut également remarquer une légère amélioration des scores lors de l'ajout de l'irrigation, plus marquée en 2012-2013 qu'en 2013-2014. Pour cette première année, le biais diminue ainsi d'environ $3 W.m^{-2}$ et le RMSE d'un peu plus de $2 W.m^{-2}$, le R^2 restant quant à lui inchangé. En 2013-2014, l'amélioration est à peine visible sur le biais, avec une réduction d'un $W.m^{-2}$, quand le RMSE et le R^2 ne varient pas.

4.3 Discussion

4.3.1 Impact de l'irrigation sur la simulation spatialisée du flux de chaleur sensible

En ce qui concerne l'ajout de l'irrigation dans le modèle, on note que le choix d'irriguer l'ensemble des parcelles cultivées, bien que faux, semble plus réaliste que de ne considérer que des cultures pluviales, en attestent les résultats systématiquement meilleurs avec l'ajout de l'irrigation. Le fait que l'irrigation ait moins d'impact en 2013-2014 qu'en 2012-2013 s'explique par les conditions climatiques. En-effet, l'année 2013-2014 est marquée par de forts événements pluvieux durant l'hiver (Fig. III-3.2), à même de réalimenter les couches de sol, limitant ainsi les besoins en irrigation des cultures (Fig. III-3.3). On peut ainsi remarquer que les volumes irrigués sont très faibles en 2013-2014, bien que très disparates sur les cultures en C3. La grande variabilité de ces dernières peut s'expliquer par le fait que l'on considère en réalité plusieurs types de culture avec des phénologies très différentes dans cette catégorie, comme notamment le maraichage. La comparaison des volumes irrigués sur le site flux en blé irrigué de Ben Salem pour l'année 2012-2013 (Fig. III-3.4) montre en-effet des volumes (390 mm.an^{-1} simulés contre 300 mm.an^{-1} observés) et une répartition temporelle de l'eau réalistes, bien que perfectibles, les paramètres d'irrigation choisis dans le modèle pour l'irrigation des céréales en C3 ne permettant pas encore de capter les irrigations de levée, comme observé ici. Le maraichage ayant une phénologie complètement différente, potentiellement plus courte et avec des LAI moins élevés, il est fort possible que les volumes irrigués estimés par le modèle y soient moins importants.

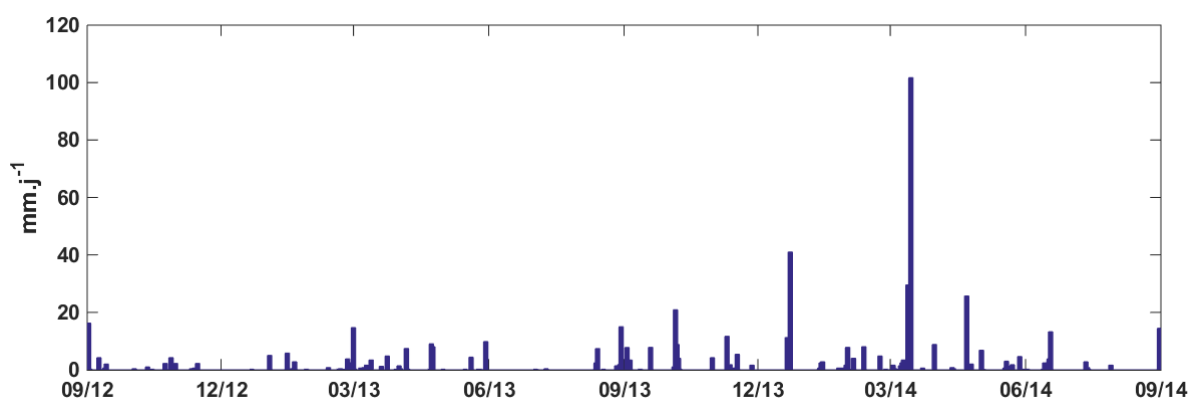


Figure III-3.2: Pluviométrie journalière mesurée à la station météorologique de Ben Salem sur la période Septembre 2012-Septembre 2014

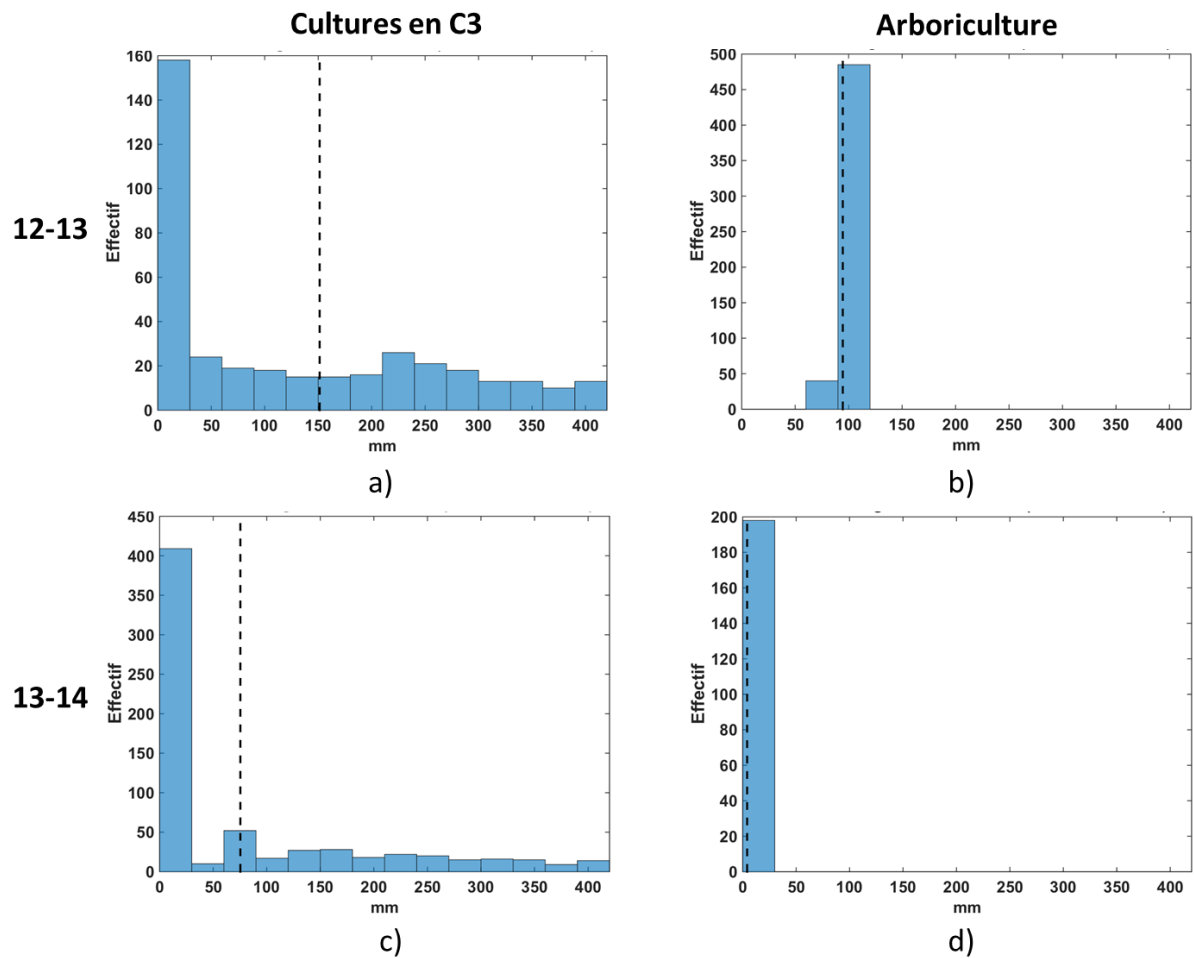


Figure III-3.3: Distribution des volumes annuels d'irrigation simulés sur l'ensemble des cultures en C3 (a, c) et des parcelles d'arboriculture (b, d) pour les années 2012-2013 (a, b) et 2013-2014 (c, d). En pointillés noirs est représenté, dans chaque cas, le volume annuel moyen d'irrigation pour les types de végétation correspondants.

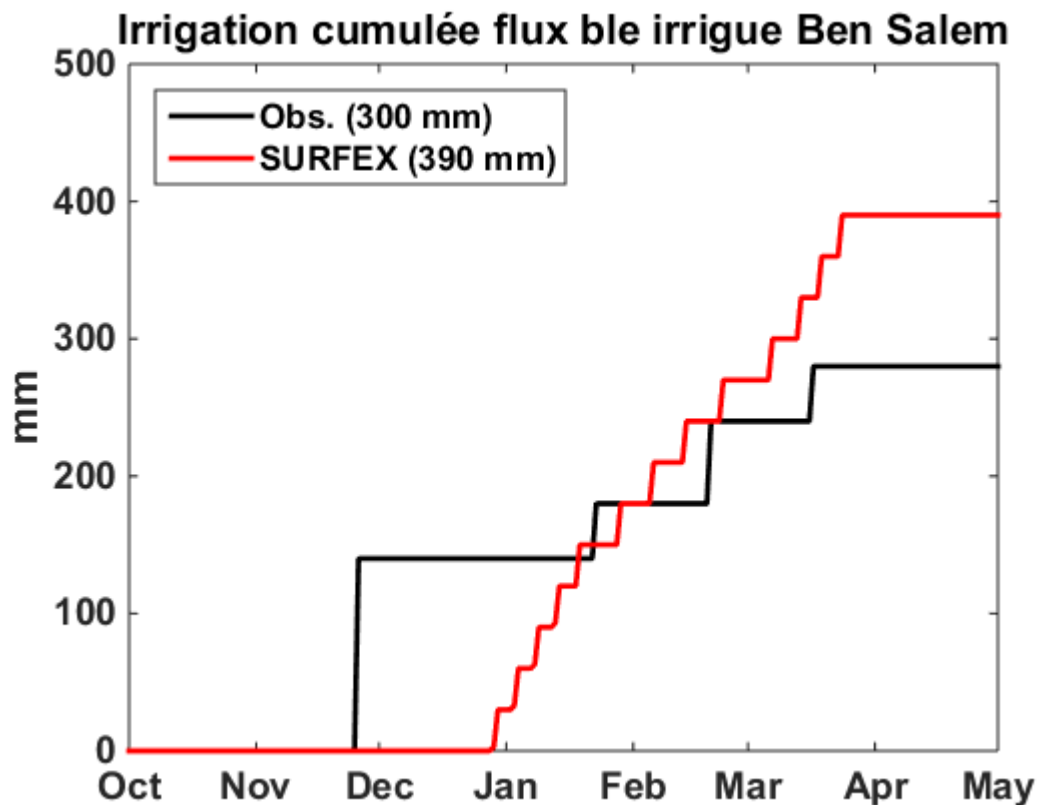


Figure III-3.4 : Irrigation cumulée observée et simulée sur la station de flux en blé irrigué de Ben Salem pour l'année 2012-2013

En convertissant les biais de chaleur sensible (H) entre observations et simulations (Fig. III-3.1) en $\text{mm} \cdot \text{an}^{-1}$, on peut se faire une idée de ce que représente l'impact de l'ajout de l'irrigation sur le flux H en termes de volume d'eau. On observe ainsi une amélioration du biais de l'ordre de $38 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$, en équivalent en eau, en ajoutant l'irrigation dans la simulation de l'année 2012-2013. En considérant le fait que les parcelles d'olivier ne sont irriguées que sur 48% de leur surface, ce qui, ramené à la surface de la parcelle, donne un volume annuel d'irrigation d'environ 45 mm (Fig. III-3.3.b), et que le volume d'irrigation annuel le plus probable pour une parcelle de culture en C3 est d'environ 30 mm (Fig. III-3.3.a), l'amélioration du biais semble effectivement représentative du volume d'irrigation. Ceci impliquerait que ce dernier est entièrement repris par l'évapotranspiration, sans ruissellement ou drainage, ce qui est assez réaliste sur la zone d'étude, et que cette différence d'évapotranspiration se répercute presque entièrement sur le flux de chaleur sensible au travers de la fermeture du bilan d'énergie.

4.3.2 Limitations et perspectives

Plusieurs limitations doivent venir tempérer ces résultats. Premièrement, les simulations présentées souffrent des divers incertitudes discutées aux [chapitre I, section 5.5](#), et [chapitre2, section 4.5](#), notamment en ce qui concerne les incertitudes liées aux acquisitions satellite pour la représentation de la phénologie, ainsi que les incertitudes liées à l'estimation de la réserve utile AWC_{max} , qui peuvent grandement influencer les volumes d'irrigation estimés. En-effet, outre les incertitudes sur l'estimation de la texture du sol et des paramètres hydrodynamiques associés, le sol est ici considéré comme homogène verticalement, ce qui est très loin d'être le cas dans notre zone d'étude ([Chebbi et al., 2018](#)). De plus, les arbres fruitiers, à l'instar de l'olivier, possèdent des systèmes racinaires très complexes qui sont beaucoup plus difficiles à modéliser ([Chebbi et al., 2018](#)), influençant grandement, d'une part l'estimation d' AWC_{max} , mais surtout la répartition verticale de l'extraction racinaire, et par extension le profil vertical d'humidité dans le sol et conséquemment le flux de transpiration. Par ailleurs, l'usage du LAI satellite trouve ses limites lors de la simulation de ce type de couvert, où la résolution de SPOT-5 (10 m) ne suffit pas nécessairement à évaluer le taux de couverture des arbres, variable également indispensable pour l'estimation de la transpiration, ainsi que pour la détermination de la fraction de la parcelle concernée par l'irrigation en goutte-à-goutte. L'arboriculture nécessite donc une connaissance particulière pour être simulée de manière cohérente, comme en attestent les travaux de thèse de Wafa Chebbi. D'autre part, il est à noter que les mesures scintillométriques souffrent d'incertitudes notables commune à tout système devant faire des hypothèses sur la turbulence atmosphérique, à l'image des tours d'eddy-covariance ([Kroon et al., 2010](#)). L'emprise étant de taille beaucoup plus importante que celle d'une tour d'eddy-covariance, on peut supposer que l'incertitude sur les flux résultants est d'autant plus grande. L'incertitude sur la détermination de l'emprise elle-même peut également avoir un impact direct lors de l'agrégation spatiale des valeurs issues des simulations. Cette agrégation des résultats de simulation « par parcelles » induit également une incertitude liée à la non-simulation des zones inter-parcelles, qui sont ici attribuées à du sol nu.

Cette étude démontre tout de même l'intérêt du scintillomètre pour valider spatialement des simulations hydrométéorologiques. Le passage d'une simulation « par parcelles » à des résultats entièrement spatialisés, malgré les incertitudes citées précédemment, donne des résultats convaincants, permettant de conforter l'usage de l'approche parcellaire et de la télédétection haute-résolution pour effectuer des simulations réalistes à l'échelle du paysage. La comparaison spatiale de plusieurs modèles en accord avec les mesures scintillométriques pourrait ainsi nous aider à mieux comprendre et représenter la variabilité spatiale des flux hydrométéorologique, et particulièrement l'influence anthropique, dans les agrosystèmes. Cette perspective fait donc l'objet de la [section 5](#) de ce chapitre.

5. Inter-comparaison de modèles

Du fait de son caractère intégrateur, la mesure scintillométrique ne permet pas d'étudier aisément la répartition spatiale des flux hydrométéorologiques. Afin d'aller plus avant dans la compréhension de la variabilité spatiale de ces flux, une inter-comparaison entre différents modèles, utilisant des approches différentes, est pertinente. L'usage de modèles de bilan d'énergie, par exemple, intègrent une information sur la température de surface via les acquisitions satellite dans l'infrarouge thermique. Cette variable étant essentielle dans le calcul des flux, étudier les différences entre ce type de modèle et un modèle de surface, comme SURFEX-ISBA, peut permettre de comprendre quels sont les processus les moins bien simulés dans ce dernier et comment y remédier.

5.1 Présentation des modèles

5.1.1 EVASPA

EVASPA (EVapotranspiration Assessment from SPACe; [Gallego-Elvira et al., 2013](#)) est un outil développé par le laboratoire EMMAH (Avignon, France) afin d'estimer spatialement l'évapotranspiration à partir de données satellite et par le calcul d'un bilan d'énergie instantané. Pour ce faire, EVASPA nécessite en entrée une estimation locale du rayonnement incident à courte et longue longueurs d'onde, afin d'estimer l'énergie disponible pour le système, les réflectances satellite dans le domaine optique et proche infrarouge, afin d'estimer les paramètres inhérents à la surface et à la végétation (albédo, émissivité, NDVI, LAI, FCOVER), et enfin la température de surface estimée à partir des acquisitions satellite dans l'infrarouge thermique (MODIS ou Landsat).

EVASPA propose une approche ensembliste, utilisant plusieurs algorithmes différents, proposant ainsi une gamme d'estimation de l'évapotranspiration. Ces algorithmes visent à calculer le bilan d'énergie instantané sur la base de la détermination d'une fraction évaporative Λ définie comme le rapport suivant :

$$\Lambda = \frac{LE}{H+LE} = \frac{LE}{R_n - G} \quad [\text{Eq. III-3.1}]$$

les termes étant définis dans [l'introduction, section 2.1](#).

Tout d'abord, R_n et G sont calculés en utilisant les équations 1.2 et 1.5. Ensuite, afin de déterminer cette fraction évaporative, et conséquemment les flux H et LE , les algorithmes d'EVASPA utilisent deux méthodes distinctes :

- **la méthode S-SEBI**

La méthode S-SEBI ([Roerink et al., 2000](#)) place l'ensemble des pixels de l'image dans l'espace de variables (T_s -albédo) puis calcule une limite de température haute et une limite

de température basse albédo-dépendantes (Fig. III-4.1). La limite haute, ou bord sec, notée $T_{\max}(\alpha)$, correspond, par hypothèse, à des conditions sèches où l'énergie disponible est entièrement utilisée pour la hausse de la température, avec une évapotranspiration nulle. La limite basse, ou bord humide, notée $T_{\min}(\alpha)$, est supposée correspondre à des conditions humides où l'énergie disponible est entièrement utilisée pour l'évaporation, typiquement les surfaces d'eau libre. La fraction évaporative de chaque pixel est donc déterminée de la manière suivante :

$$\Lambda = \frac{T_{\max}(\alpha) - T_s}{T_{\max}(\alpha) - T_{\min}(\alpha)} \quad [\text{Eq. III-3.2}]$$

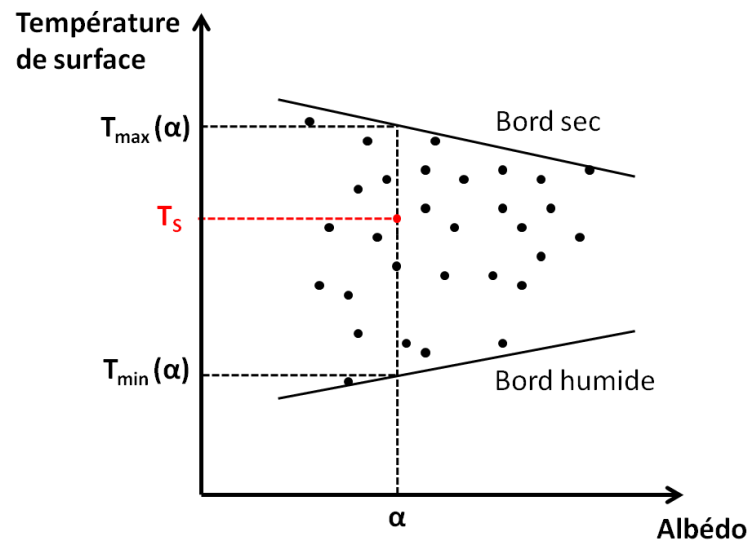


Figure III-4.1: Détermination de la fraction évaporative pour un pixel donné dans l'espace (T_s -albédo)

- la méthode du triangle

La méthode du triangle (Carlson, 2007) exploite quant à elle le lien physique entre Λ , T_s et le développement de la végétation. Pour ce faire, l'ensemble des pixels de la zone d'étude sont placés dans l'espace (T_s -NDVI) ou (T_s -FCOVER). Si les conditions sont suffisamment variées dans l'espace, ce graphique prend une forme de triangle, de la même manière que la figure III-4.1, dont la limite haute correspond à des conditions sèches où l'évapotranspiration est nulle, et la limite basse à des conditions humides où l'évapotranspiration est potentielle. La fraction évaporative est ainsi déterminée avec l'équation III-3.2 mais où les limites $T_{\max}$ et $T_{\min}$ dépendent cette fois du NDVI ou du FCOVER et non plus de l'albédo.

L'hypothèse majeure utilisée dans EVASPA, quelque soit la méthode de calcul utilisée, et qui doit guider le choix de l'emprise de simulation, est que la zone contienne des pixels aux conditions sèches et humides, afin de pouvoir déterminer les limites haute et basse

dans les différents espaces de variables, et que ces différentes conditions ne soient pas dues à des différences atmosphériques mais bien à une différence de disponibilité de l'eau.

5.1.2 SPARSE

Soil Plant Atmosphere and Remote Sensing Evapotranspiration (SPARSE ; [Boulet et al., 2015](#)) est un modèle visant à estimer l'évapotranspiration à partir de données satellite. Ce modèle, basé sur le modèle Two-Source Energy Balance (TSEB; [Norman et al., 1995](#)), calcule un bilan d'énergie à deux sources, et donc deux température d'équilibre, une pour la végétation et une pour le sol. Le modèle fonctionne selon deux versions : série et parallèle ([Fig. III-4.2](#)). La version série consiste à faire l'hypothèse que la végétation recouvre de manière homogène le pixel simulé et donc que les bilans d'énergie de la végétation et du sol ont une continuité verticale. La version parallèle quant à elle fait l'hypothèse que la végétation ne recouvre qu'une partie du pixel, l'autre étant en sol nu. Leurs bilans d'énergies sont donc calculés de manière parallèle, le bilan d'énergie de la végétation n'influençant ainsi pas la température de surface du sol. Le bilan d'énergie de chacun des deux compartiments est calculé grâce à une approche utilisant les notions de résistance aérodynamiques ([Shuttleworth et Gurney, 1990](#)) et stomatique ([Braud et al., 1995](#)), permettant de déterminer les parties turbulentes des équations 1.3 et 1.4 ([Introduction, sect. 2.1](#)). La réduction des flux de transpiration (stress hydrique) ou de l'évaporation du sol lorsque l'humidité de la zone racinaire (ou respectivement de surface) devient un facteur limitant est quant à elle modélisée par deux coefficients d'efficacité de l'évaporation et de la transpiration ([Mahfouf et Noilhan, 1990](#)).

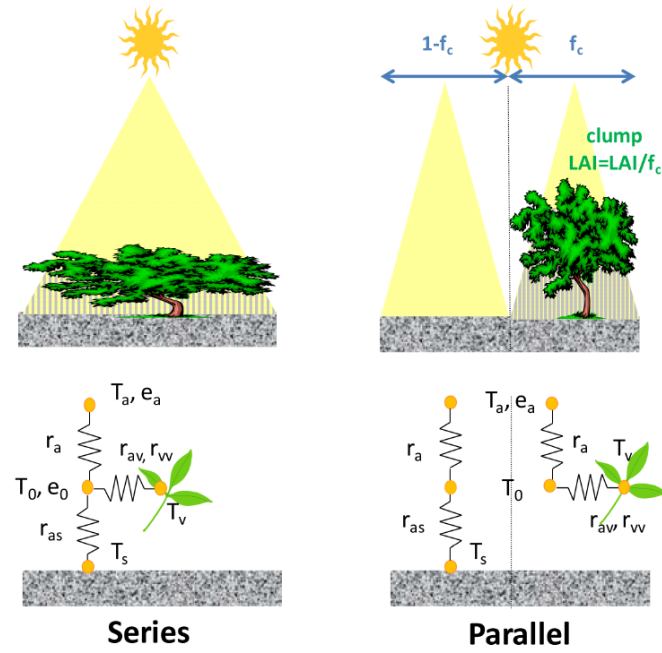


Figure III-4.2: Schéma des versions série et parallèle de SPARSE, représentant les diverses résistances thermiques et les diverses températures utilisées pour calculer les bilans d'énergie de chaque compartiment.

Dans le cas de la version série, le modèle calcule l'énergie incidente reçue par chaque compartiment à partir d'un modèle de transfert radiatif (Merlin et Chebbouni, 2004) prenant en compte les diverses réflexions sur la canopée et le sol, l'énergie totale reçue par la surface étant la somme des deux. De la même manière, les flux H et LE sont égaux à la somme des flux calculés sur chaque compartiment (Eq. III-3.3 et III-3.4, indice v pour végétation et s pour sol). Enfin, le flux G est calculé comme étant le résidu du bilan d'énergie du sol. On a donc les relations suivantes :

$$R_{nv} = LE_v + H_v \quad [\text{Eq. III-3.3}]$$

$$R_{ns} - G = LE_s + H_s \quad [\text{Eq. III-3.4}]$$

$$R_n = R_{nv} + R_{ns} \quad [\text{Eq. III-3.5}]$$

$$LE = LE_s + LE_v \quad [\text{Eq. III-3.6}]$$

$$H = H_s + H_v \quad [\text{Eq. III-3.7}]$$

Dans le cas de la version parallèle, l'énergie disponible pour chaque compartiment est calculée directement avec l'équation 1.1 (Introduction, sect. 2.1). Les flux H et LE pour le sol et la végétation sont ensuite calculés de manière similaire à la version série. De la même manière, le flux G n'est calculé que sur la partie sol nu. On a donc toujours les relations des équations III-3.3 et III-3.4 auxquels s'ajoutent les suivantes :

$$R_n = f_c R_{nv} + (1 - f_c) R_{ns} \quad [\text{Eq. III-3.8}]$$

$$LE = (1 - f_c)LE_s + f_cLE_v \quad [\text{Eq. III-3.9}]$$

$$H = (1 - f_c)H_s + f_cH_v \quad [\text{Eq. III-3.10}]$$

Où f_c représente la fraction de végétation dans le pixel, autrement dit le FCOVER.

De même qu'EVASPA, le modèle nécessite en entrée des données déduites de la télédétection optique : LAI, FCOVER, albédo et émissivité. De plus, il nécessite également les variables atmosphériques suivantes : R_g , vitesse du vent, température et humidité relative de l'air. Enfin, plusieurs paramètres liés au couvert végétal sont nécessaires : résistance stomatique minimale, largeur des feuilles, émissivité et albédo de la végétation, hauteur du couvert. Le modèle peut ensuite fonctionner sur deux modes qui nécessitent des entrées supplémentaires différentes. Le premier est un mode prescrit, où les efficacités de l'évaporation et de la transpiration sont connues et fixées par l'utilisateur, ce qui permet une estimation de la température de surface en tant que sortie de modèle, utile dans une perspective d'assimilation de température de surface satellite ou pour calculer des composantes en conditions potentielles. Le second est un mode inverse qui, à partir d'une température de surface mesurée par satellite, estime les flux en faisant deux hypothèses successives sur les efficacités. En-effet, dans ce mode, le nombre d'inconnues à résoudre (deux températures et deux états hydriques) est supérieur au nombre d'équations (trois bilans). Une première résolution des bilans d'énergie est donc faite en supposant des conditions de transpiration potentielles (efficacités égales à 1 pour la transpiration) et si LE_v est négatif, alors on estime que les conditions sont stressées et on fait l'hypothèse que la surface du sol est donc sèche, fixant ainsi l'efficacité de l'évaporation à 0.

5.2 Méthodes

5.2.1 Mise en place des simulations EVASPA et SPARSE

Les simulations EVASPA et SPARSE ont été mises en place par Emilie Delogu dans le cadre de ses travaux de post-doctorat. J'ai pu réaliser, en collaboration avec elle, un travail d'adaptation d'EVASPA afin de pouvoir utiliser des données issues de LANDSAT en entrée, ce modèle ayant été conçu initialement pour utiliser les réflectances acquises par le satellite MODIS. Les différentes entrées satellite utilisées dans ces deux modèles sont décrites en [section 3.1.2](#). Les données météorologiques utilisées sont celles de la station de Ben Salem décrites en [section 3.2](#).

Concernant EVASPA, les modèles algorithmes considérés dans cette étude utilisent la méthode de [Choudhury et al. \(1987\)](#) pour calculer le flux G. Ensuite, dans chacun des trois espaces (T_s -albédo), (T_s -NDVI) et (T_s -FCOVER), les bords sec et humide sont déterminées de six manières différentes :

- Version simplifiée de la méthode décrite par [Tang et al. \(2010\)](#) sans filtrage des valeurs aberrantes.
- Méthode de détermination automatique de bords [Tang et al. \(2010\)](#) avec filtrage des valeurs aberrantes par la fonction `smoothhist2D` de Matlab.
- Bords sec et humide à T_s constante, égale au maximum, et respectivement minimum, des T_s présentes dans l'image (lignes horizontales).
- Algorithme proposé par [Sobrino et al. \(2005\)](#).
- Le bord humide est fixé au minimum de T_s de l'image (ligne horizontale) et le bord sec est modélisé par un polynôme du 3eme degré.
- Méthode de [Tang et al. \(2010\)](#) avec filtrage des valeurs aberrantes mais avec un bord humide fixé à la valeur moyenne de T_s observée sur les points sélectionnés pour construire le bord humide.

En définitive, ce sont 18 estimations différentes d'évapotranspiration instantanée (à l'heure d'acquisition des images satellite) qui sont issues de cette simulation. Etant donné la disponibilité des données de Landsat-8, la simulation a été réalisée sur l'année calendaire 2014. Afin d'augmenter les chances de bien décrire les conditions sèches et, tout particulièrement, les conditions humides dans ce milieu semi-aride, la simulation d'EVASPA a été réalisée sur un domaine de 45 par 35 km centré sur le scintillomètre. Ce domaine permet d'inclure les zones de sebkha ainsi que la retenue d'El-Haouareb, qui font partie des rares endroits où l'on peut obtenir des conditions humides quelle que soit la date d'acquisition.

Concernant SPARSE, la simulation a été réalisée en utilisant uniquement le mode inverse et sur la même période temporelle qu'EVASPA, mais dans une zone plus petite, de 10 par 8 km également centrée sur le scintillomètre, SPARSE ne nécessitant pas la prise en compte de conditions sèches et humide dans la zone d'étude. La hauteur de végétation, nécessaire au modèle, a été calculée, pour les cultures herbacées, en l'interpolant, via le NDVI, entre deux valeurs limites de 0.05 et 0.8 m. Pour l'arboriculture, cette hauteur est définie en utilisant l'approche proposée par [Raupach \(1994\)](#) sur la base des données allométriques présentées en [section 3.1.3](#). La résistance stomatique minimale a été fixée à 100 s.m^{-1} sur la base de [Boulet et al. \(2015\)](#), valeur toutefois adaptées particulièrement pour les herbacées. Enfin, la largeur de feuille et l'émissivité du compartiment végétation ont été fixées à respectivement 0.05 m et 0.98 sur la base de [Braud et al. \(1995\)](#), tandis que l'albédo de la végétation a été fixé à 0.25 via des estimations in-situ.

Les deux modèles ont ainsi permis d'estimer les flux d'énergie instantanés aux dates d'acquisition de Landsat-8 en utilisant les variables météorologiques au pas de temps le plus proche de l'heure d'acquisition (entre 9:54 et 9:56 UTM).

5.2.2 Méthode de comparaison aux données scintillométriques et aux simulations SURFEX

Lors de l'inter-comparaison de modèles, seule la simulation SURFEX-ISBA avec irrigation a été prise en compte. Le pas de temps du modèle le plus proche de l'heure d'acquisition de Landsat-8 a été considéré pour la comparaison des flux instantanés. Dans le cadre du post-doctorat d'Emilie Delogu, les emprises du scintillomètre au pas de temps semi-horaire ont été recalculées à la résolution de Landsat-8. De ce fait, les sorties des simulations EVASPA et SPARSE ont pu être directement pondérées par ces emprises pour obtenir des valeurs agrégées comparables aux mesures scintillométriques. Le calcul de R_n et de G se faisant indépendamment de la méthode S-SEBI ou de la méthode du triangle dans EVASPA, un flux de chaleur latente correspondant aux mesures du XLAS a été calculé sur la base de la formulation suivant (l'indice indiquant la source du flux, modèle ou XLAS):

$$LE_{XLAS} = R_{n,EVASPA} - G_{EVASPA} - H_{XLAS} \quad [\text{Eq. III-4}]$$

La comparaison spatialisée a quant à elle nécessité un certain nombre de traitements des sorties EVASPA et SPARSE. La première étape a été de convertir les sorties au format de raster afin d'obtenir des résultats géoréférencés. Ces sorties, à la résolution de Landsat, ont ensuite été moyennées sur les entités du shapefile issu des cartes d'occupation des sols SPOT-5 ayant servi à la détermination des parcelles simulées par SURFEX-ISBA. Ce shapefile a ainsi été dupliqué pour chaque date d'acquisition Landsat, avec plusieurs nouveaux champs contenant les sorties instantanées de chacun des 3 modèles (SURFEX-ISBA, EVASPA, SPARSE), permettant ainsi une comparaison spatialisée sur chaque date.

La comparaison a eu lieu sur l'année hydrologique 2013-2014, les données Landsat-8 n'étant cependant disponibles qu'à partir de décembre 2013. Les dates présentant des nuages dans l'emprise du XLAS ont été retirées de la comparaison car ces derniers empêchent la pondération. Au final, 10 dates, allant de Février à Septembre 2014 ont été exploitables.

5.3 Résultats

5.3.1 Comparaison sur l'emprise du scintillomètre

Les flux instantanés agrégés sur l'emprise du XLAS calculés par les différentes approches sont présentés dans la [figure III-5.1](#).

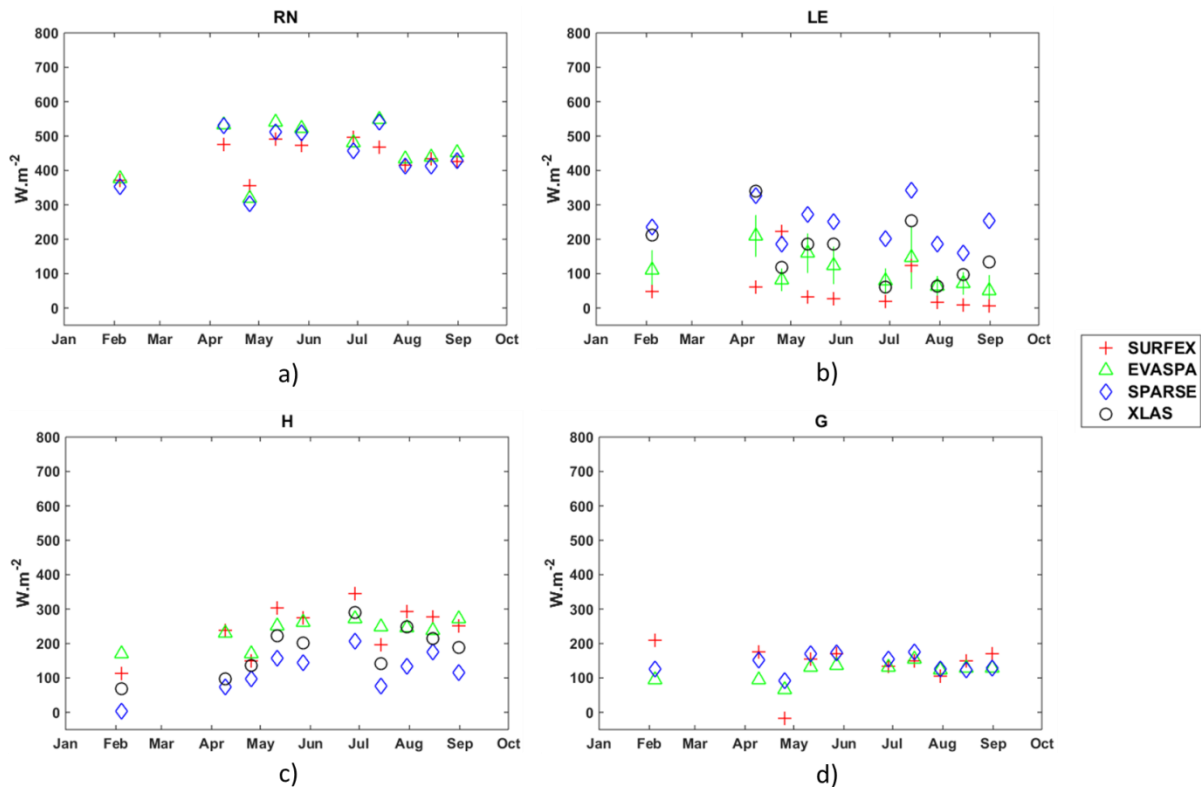


Figure III-5.1: Comparaison des flux d'énergie simulés par les différents modèles sur l'année 2013-2014. Les barres vertes dans la figure b) correspondent à l'écart type des 18 estimations de LE faites par EVASPA.

Concernant le rayonnement net R_n ([Fig. III-5.1a](#)) et le flux de conduction dans le sol G ([Fig. III-5.1d](#)), on trouve des résultats assez similaires, avec néanmoins deux dates où SURFEX s'avère assez différent sur l'estimation du G (04/02 et 25/04). Les différences se font plus marquées sur les flux de chaleur latente LE ([Fig. III-5.1b](#)) et sensible H ([Fig. III-5.1c](#)). On remarque ainsi que SURFEX a tendance à surestimer H à cette heure de la journée, restant tout de même assez proches des estimations d'EVASPA et des mesures du XLAS. En conséquence, vu que l'énergie disponible R_n est assez similaire pour tous les modèles, SURFEX a une tendance à sous-estimer assez nettement le LE . Cette estimation s'avère relativement proche de celle d'EVASPA durant l'été alors qu'elle est assez différente au printemps. Seule la date du 25/04 échappe à cette tendance, avec une nette surestimation de SURFEX par rapport aux autres modèles et au flux résiduel calculé sur la base des

mesures XLAS. SPARSE présente quant à lui la tendance inverse, à savoir une estimation élevée du LE et plus faible du H.

5.3.2 Comparaison spatialisée sur l'ensemble de la zone d'étude

La [figure III-5.2](#) montre la distribution des valeurs de LE et de RN sur l'ensemble de l'image pour SURFEX, EVASPA et SPARSE pour différentes dates. On peut premièrement remarquer que l'on confirme les tendances observées sur l'emprise du scintillomètre ([Sect. 5.3.1](#)). Concernant le rayonnement net RN, tous les modèles en font des estimations proches avec peu de dispersion spatiale. Pour ce qui est du LE, on observe, comme dans la [section 5.3.1](#) une sous-estimation du LE par SURFEX par rapport à EVASPA et une surestimation par SPARSE, cette tendance se répercutant de manière inverse sur l'estimation du H. Il est cependant à noter que, malgré ces biais inter-modèles, on obtient des dispersions de valeurs relativement similaires pour EVASPA et SURFEX, donnant à penser que la répartition spatiale des flux semble relativement cohérente entre ces modèles, la dispersion des valeurs étant un peu plus grande avec SPARSE. On remarque cependant qu'au maximum de croissance des cultures céréalières ([Fig. III-5.2c et III-5.2d](#)) comme par la suite ([Fig. III-5.2e et III-5.2f](#)), SURFEX présente une séparation des flux simulés en 2 groupes, dont l'un se rapproche assez des valeurs issues d'EVASPA.

Afin de confirmer une répartition des flux similaires, la [figure III-5.3a](#) présente la différence entre les LE estimés par SURFEX et EVASPA. Cette différence a été débiaisée sur chaque date, la moyenne des valeurs de LE de SURFEX spatialisées étant ramenée à celle d'EVASPA, et cumulée sur l'ensemble des dates. La comparaison à la carte d'occupation des sols ([Fig. III-5.3b](#)) ne montre pas de relation spatiale entre les différences d'évapotranspiration simulées par ces deux approches. Les parcelles où SURFEX a simulé de l'irrigation ([Fig. III-5.3c](#)) ont quant à elles tendance à avoir une évapotranspiration simulée plus élevée avec ce dernier qu'avec EVASPA, après débiaisage, pointant le potentiel de la comparaison pour déterminer les surfaces irriguées. La différence de répartition spatiale ne semble donc pas due uniquement à la différence de formalisme des modèles mais plutôt essentiellement à celles créées par les données satellite en entrée.

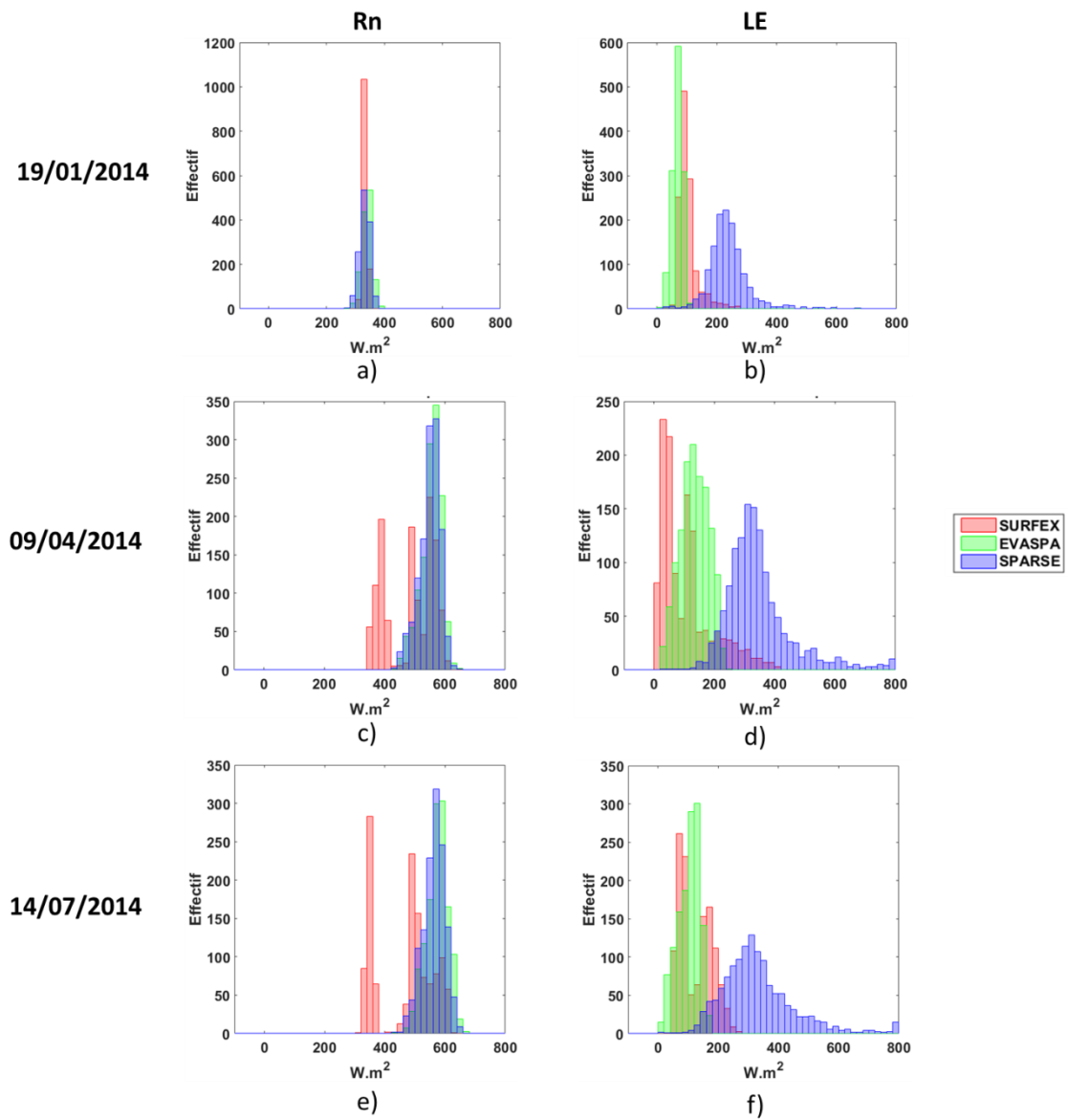


Figure III-5.2: Distributions spatiales de RN (a, c, e) et LE (b, d, f) sur la zone d'étude pour les différents modèles en Janvier (a, b), Avril (c, d) et Juillet (e, f).

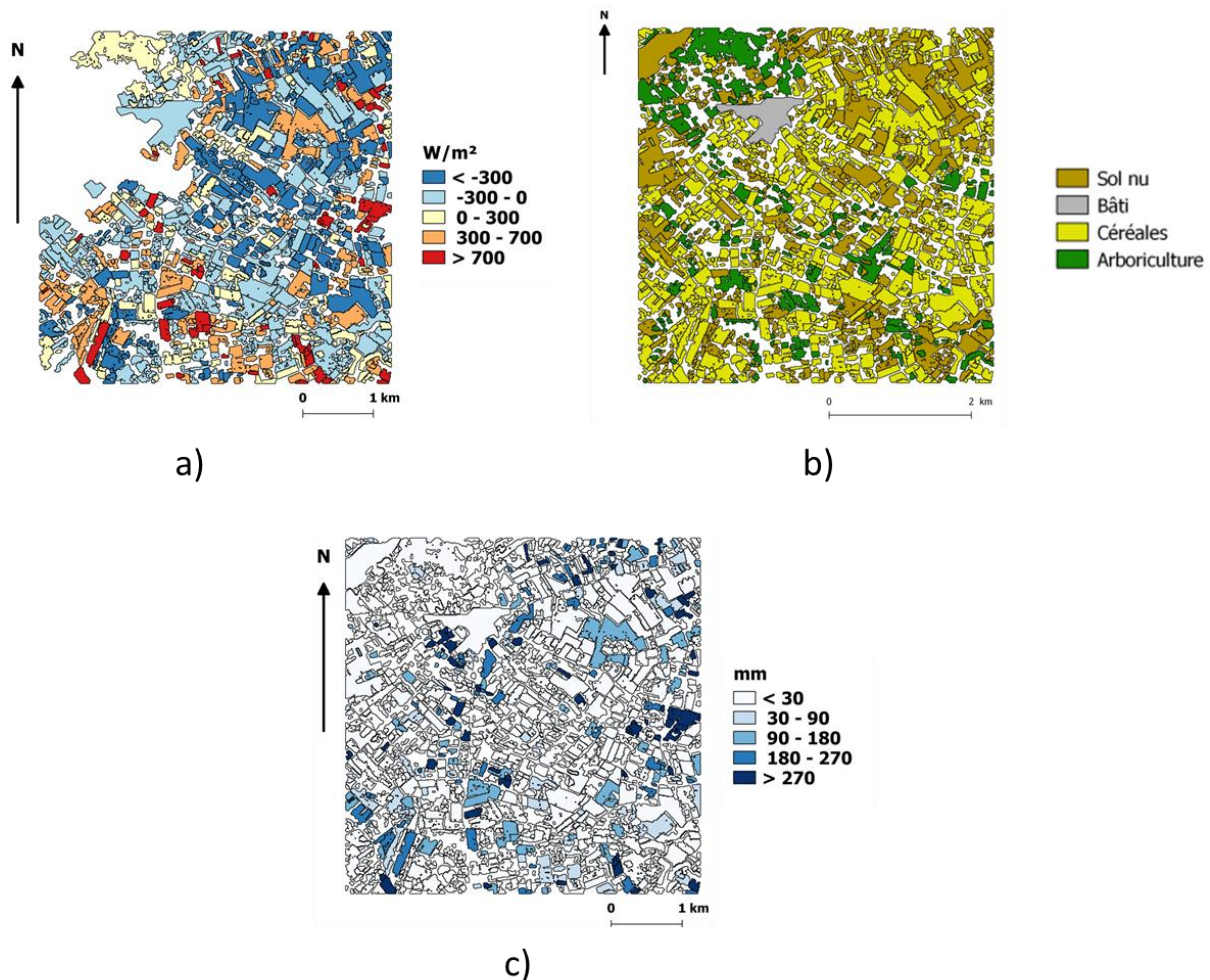


Figure III-5.3: Différence cumulée sur l'ensemble des images Landsat-8 entre LE SURFEX et LE EVASPA instantanés en $W.m^{-2}$, débiaisée à chaque date (a), type d'occupation des sols (b) et volumes irrigués annuels (c) pour chaque parcelle de la zone d'étude sur l'année 2013-2014.

5.4 Discussion

5.4.1 Répartition spatiale des flux

La [section 5.3.1](#) montre que SURFEX surestime systématiquement le flux H instantané, comparé aux mesures du scintillomètre, aux dates d'acquisition des images Landsat-8. La [section 4.2](#) montre cependant que sur l'ensemble de la période temporelle, le biais est très faible (environ $6 W.m^{-2}$). Cela signifie que SURFEX doit avoir une tendance notable à surestimer le flux de chaleur sensible au milieu de la journée, l'heure d'acquisition de Landsat-8 étant comprise entre 9:54 et 9:57 UTM (soit environ 11:00 en heure locale) et à le sous-estimer plus tôt ou plus tard dans la journée, ce qui, agrégé sur la période entière, permet de compenser et d'avoir un biais faible. Ceci se répercute par une sous-estimation du LE, visible également sur l'ensemble de la zone ([Sect. 5.3.2](#)).

Afin de comprendre cette tendance, j'ai tout d'abord regardé les volumes irrigués à l'échelle du GDA, pour voir si l'irrigation simulée, qui semblait réaliste à l'échelle de la parcelle (Sect. 4.3.1), l'était également à plus grande échelle. Les volumes observés sur la période de culture des céréales, soit de Novembre à Mai, et les volumes simulés sur cette même période, sont décrits en table III-2.1, rapportés en mm. Y sont également décrits les volumes moyens par type de culture pour les volumes simulés ainsi que leur taux d'occupation dans la surface du GDA (en % entre parenthèses). Les volumes d'irrigation de l'arboriculture ont été ramenés à la surface de la parcelle (puisque le goutte-à-goutte n'irrigue que sur les arbres) pour permettre la comparaison.

	2012-2013	2013-2014
Observé (mm)	204	112
Simulé (mm)	60	9
dont		
Arboriculture	25 (34%)	1 (23%)
Céréales	104 (43%)	67 (58%)

Table III-2: Volumes d'irrigation observés et simulés en mm sur le périmètre du GDA chaque année sur la période Novembre-Mai, avec le détail par type de culture pour les irrigations simulées. Le pourcentage entre parenthèses représente le taux d'occupation de chaque type de culture dans les parcelles du GDA.

On peut remarquer une grosse sous-estimation des volumes irrigués simulés à l'échelle du périmètre. Cette sous-estimation explique la tendance à la sous-estimation visible sur le LE simulé par SURFEX par rapport à EVASPA. Deux causes sous-jacentes sont possibles :

- les paramètres d'irrigation ne sont pas adaptés et ne permettent pas de déclencher assez d'irrigation par rapport aux pratiques réelles, ce qui n'a pas l'air d'être le cas étant donné les estimations à l'échelle de la parcelle (Sect. 4.3.1)
- la demande en eau des plantes simulée par le modèle est trop faible par rapport à la réalité, diminuant ainsi l'évapotranspiration et donc la consommation en eau dans le sol, le modèle ne simulant pas une humidité descendant sous les seuils d'irrigation. Ceci peut être notamment expliqué par une sous-estimation du LAI.

Afin de vérifier cette seconde hypothèse, la figure III-5.4 présente la distribution des LAI mensuels des parcelles de céréales sur l'emprise du GDA sur les années 2012-2013 (III-5.4a) et 2013-2014 (III-5.4b), le LAI de l'arboriculture étant quant à lui fixe. Ces figures montrent qu'il reste plus faible qu'attendu, du fait de la formulation de LAI et/ou des couverts simulés comme étant des céréales qui sont en réalité des couverts avec des LAI plus faible, comme

du maraichage par exemple, qui demande des volumes d'irrigation importants du fait de la faible profondeur d'enracinement. Une étude de ces couverts et de leur fonctionnement permettrait d'améliorer le réalisme de la simulation. Il serait également intéressant d'étalonner les paramètres de la formulation de [Hadria et al. \(2006\)](#) sur des mesures in-situ de LAI afin d'obtenir une relation NDVI/LAI plus adaptée à la zone et aux données satellitaires d'entrée, voire d'envisager l'usage d'un réseau de neurones tel que BVNET. La pertinence de la carte d'occupation des sols peut également avoir un impact significatif. En effet, certaines parcelles issues de la segmentation de ces cartes dans cette zone d'étude sont situées à cheval sur plusieurs parcelles cadastrales réelles, qui ont des phénologies différentes, invalidant l'hypothèse d'homogénéité des entités de calcul. Dans ce cas, le LAI moyen sur ces parcelles peut être plus faible, avec une consommation en eau faible et ne nécessitant pas irrigation, alors qu'une partie de la parcelle nécessite en réalité cette irrigation du fait de son LAI élevé, conduisant à une sous-estimation des volumes irrigués sur le GDA. L'utilisation de cartes d'occupations des sols plus robustes, comme les produits issus de la chaîne IOTA2 ([Inglada et al., 2015](#)) et/ou d'une segmentation sur la base de parcelles cadastrales réelles pourrait amener à réduire ces incertitudes.

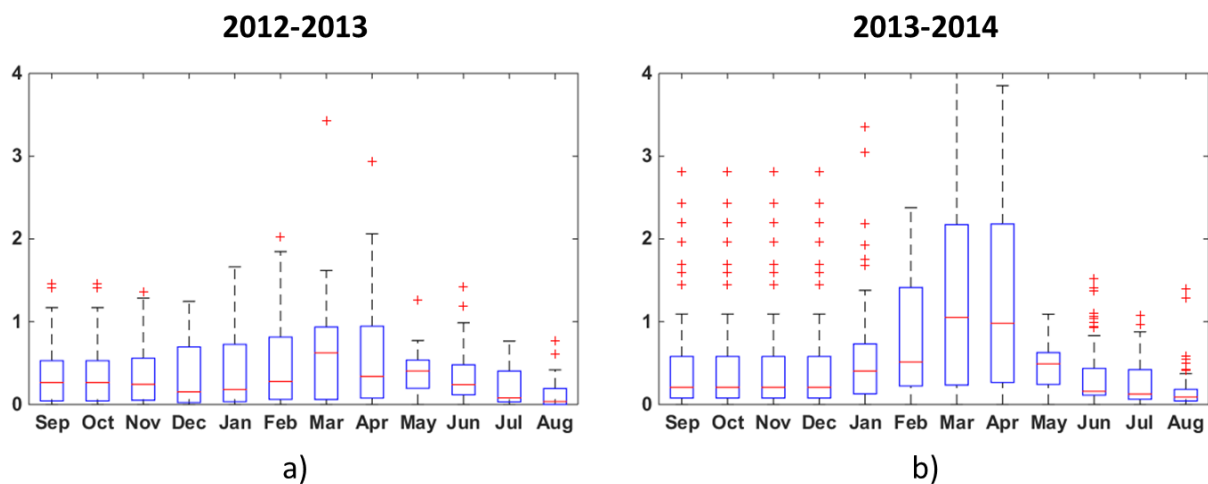


Fig. III-5.4: Distribution du LAI mensuels dans les parcelles de céréales incluses dans le GDA de Ben Salem II sur les années 2012-2013 (a) et 2013-2014 (b)

La présence des deux groupes de valeurs de LE en période de culture céréalière ([Fig. III-5.2d](#) et [III-5.2f](#)) s'explique facilement par la séparation, en termes de comportement hydrométéorologique, des céréales, dont l'évapotranspiration simulée par SURFEX semble sous-estimée, et de l'arboriculture, avec très peu de variations spatiales (uniquement liées aux paramètres de sol) et dont les valeurs semblent plus en accord avec EVASPA, s'agissant du pic de droite sur la figure, résultat corroboré par la comparaison cartographique des LE instantanés à cette date ([Fig. III-5.5](#)) et de la carte d'occupation des sols ([Fig. III-5.3b](#)).

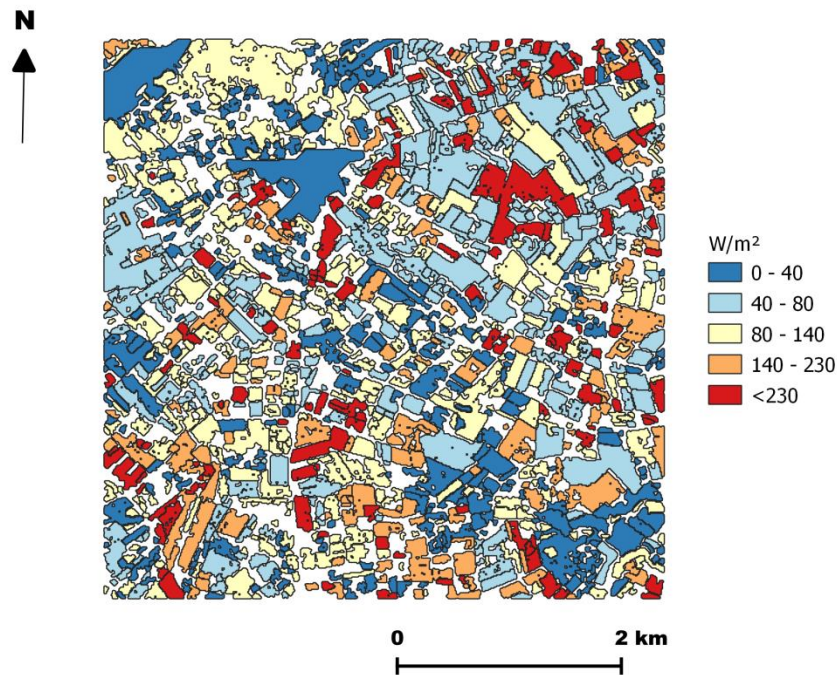


Fig. III-5.5: LE SURFEX instantané à l'acquisition Landsat-8 du 09/04/2014 en $W.m^{-2}$.

Enfin, les différences entre SURFEX et EVASPA ne montrant pas de cohérence spatiale évidente (Fig. III-5.3), hormis l'effet de l'irrigation qui pointe le potentiel de cette comparaison pour détecter des zones irriguées, il serait judicieux d'étudier les variables biophysiques d'entrée des différents modèles (Albédo, NDVI/LAI, FCOVER) ainsi que l'écart entre la T_s estimée par LANDARTs et celle calculée par SURFEX afin d'aller plus loin dans la compréhension de la répartition spatiale des différences.

5.4.2 Limitations et perspectives

Ces résultats doivent également être pondérés par plusieurs facteurs. Premièrement, les produits satellites utilisés dans ce chapitre sont soumis à de nombreuses incertitudes. Outre les incertitudes liées aux acquisitions dans le domaine optique, déjà mentionnées dans les chapitre I, section 5.5, et chapitre2, section 4.5, ainsi que dans la section 4.3.2, nous avons pu noter que l'usage de formules empiriques pour estimer les variables biophysiques, qui n'ont pas nécessairement été calibrées sur la plaine du Merguellil et pour les capteurs utilisés, peuvent ajouter de l'incertitude comme c'est le cas ici, par rapport à des méthodes utilisant des réseaux de neurones comme BVNET, utilisé dans les deux premiers chapitres de cette thèse. La création d'une base d'apprentissage de LAI mesuré in-situ permettant l'usage de ce dernier est une piste intéressante pour améliorer la précision des produits satellite optique dans la région tunisienne et permettrait d'éviter les problèmes d'échelonnage des valeurs de LAI rencontrés dans ce chapitre. Les produits de température de surface produits par la chaîne LANDARTs souffrent également de différentes incertitudes (Tardy et al., 2016) dont l'impact dans les modèles de bilan d'énergie pourrait être étudié. L'albédo et l'émissivité semblent quant à eux assez en accord entre les diverses simulations,

étant donné la proximité entre les RN simulés par les différents modèles ([Sect. 5.3.1 et 5.3.2](#)). Concernant EVASPA, la détermination de la fraction évaporative dépend fortement de la détermination des bords secs et humides, lesquels sont très sensibles à la présence de nuages. Même si la zone de comparaison (5x5 km) est complètement claire, si des nuages sont présents dans la zone de simulation d'EVASPA (45x35 km), cela fausse l'estimation de l'évapotranspiration. L'estimation de l'évapotranspiration dans SPARSE ne dépendant pas des autres pixels, la comparaison ne souffre pas de ces problèmes. Néanmoins, les simulations SPARSE ont été réalisées avec une paramétrisation unique alors que cette dernière devrait être dépendante du type de couvert, générant ainsi une source d'incertitude supplémentaire.

La section 5.4.1 montre que SURFEX ne simule pas nécessairement mieux le bilan d'énergie instantané, et notamment l'évapotranspiration, malgré sa complexité accrue par rapport aux modèles de bilan d'énergie EVASPA et SPARSE. Cependant, contrairement aux modèles de bilan d'énergie, qui estiment des flux instantanés aux dates d'acquisition du satellite, et dont l'interprétation est donc fortement soumise à des effets très locaux temporellement comme spatialement, SURFEX estime une série temporelle complète et continue, permettant une intégration des flux sur différentes périodes, que ce soit la journée, la saison ou l'année. Cette intégration permet d'avoir une idée plus générale du fonctionnement des écosystèmes simulés dans la durée. La structure de SURFEX, qui simule les deux bilans d'énergie couplés, lui confère également un fort pouvoir prédictif que n'ont pas EVASPA et SPARSE. La construction de séries journalières continues d'évapotranspiration est l'objectif principal des travaux du projet TOSCA PITEAS (Boulet et Olios, 2017-2019). Ainsi, les travaux de post-doctorat d'Emilie Delogu visent à proposer des méthodes d'extrapolation à la journée et d'interpolation journalière entre les dates d'acquisitions satellite pour les produits d'évapotranspiration d'EVASPA et SPARSE. La comparaison de ces différents produits journaliers d'évapotranspiration aux simulations de SURFEX permettrait ainsi de mieux mettre en avant les comportements de chacun des modèles. La future mission spatiale en infrarouge thermique TRISHNA pourrait également apporter une meilleure estimation de la variabilité temporelle de l'évapotranspiration, de par sa fréquence de revisite de 3 jours, soit 5 fois plus élevée que celle de Landsat. Ces travaux et l'arrivée de ces nouveaux produits devrait ouvrir la voie à l'usage combiné de ces différents modèles, notamment par l'assimilation des produits EVASPA et/ou SPARSE dans SURFEX. Ceci permettrait notamment de vérifier l'intérêt d'une telle assimilation plutôt que l'assimilation directe d'un produit de température de surface. Leur utilisation pour l'étalonnage de SURFEX pourrait également, comme l'ont montré [Demarty et al. \(2005\)](#) et [Coudert et al. \(2006\)](#), permettre la réestimation des paramètres hydrodynamiques de sol, et ainsi produire des cartes de réserve utile.

Enfin, en simulant sur des années plus sèches, la comparaison entre une simulation SURFEX où toutes les cultures sont irriguées et une simulation EVASPA/SPARSE, qui elle ne fait pas de postulat sur la répartition spatiale de l'irrigation mais doit y être sensible via

l'utilisation de la température de surface, pourrait permettre de déterminer des cartes de zones irriguées. Dans cette optique, une des perspectives de travail principales serait d'améliorer la paramétrisation des pratiques d'irrigation dans la plaine du Merguellil dans SURFEX, que ce soit par utilisation directe de valeurs expertes recueillies auprès d'organismes locaux, comme les Commissariats Régionaux de Développement Agricole (CRDA), ou en calibrant sur des données observées d'irrigation, voire des produits satellites d'humidité de surface comme ceux produits sur la base des acquisitions Sentinel-1 ([Gao et al., 2017](#)), afin d'affiner dans SURFEX. En-effet, les paramètres utilisés dans ce chapitre postulent une irrigation relativement optimale, avec une exploitation complète de la réserve facilement utilisable avant irrigation, alors que l'usage réel de l'eau dans le secteur est probablement moins optimal. La prise en compte du maraichage, et notamment du maraichage d'été, qui peut avoir lieu après les cultures céréalières d'hiver et ainsi créer un second cycle irrigué dans l'année, qui ne peut actuellement pas être pris en compte dans le modèle, est également une piste importante pour l'amélioration de la compréhension du fonctionnement hydrologique de la zone. Cela pourrait ainsi permettre d'expliquer l'évolution du niveau de la nappe phréatique et dégager des pistes d'optimisation de l'usage de la ressource en eau, ce qui est notamment l'objectif du projet FLUXMED.

6. Conclusion

Ce chapitre montre tout d'abord l'intérêt d'un système de mesure de type scintillomètre afin de valider les modèles de surface à l'échelle du paysage (périmètre irrigué, bassin versant, etc.) autrement que par la comparaison à des débits observés via un routage hydrologique des sorties de simulation, comme on pourrait le faire sur un bassin versant instrumenté. En-effet, un scintillomètre permet le calcul, de manière intégrée sur une emprise relativement large, d'une variable directement simulée par le modèle, à savoir le flux de chaleur sensible. La comparaison des mesures scintillométriques acquises sur la plaine agricole semi-aride du Merguellil en Tunisie aux simulations SURFEX a permis, d'une part, de valider l'usage d'une configuration du modèle et la paramétrisation des différents couverts, et d'autre part de confirmer la cohérence de la méthode de spatialisation des résultats utilisée pour passer de simulations par unité cartographique homogène. L'intégration de l'irrigation a notamment contribué à une amélioration des simulations, certes relativement faible, mais en accord avec les volumes irrigués ajoutés.

Une étude plus poussée du bilan d'énergie instantané, et notamment via la comparaison aux modèles de bilan d'énergie EVASPA et SPARSE, ainsi qu'à des mesures d'irrigation intégrées à l'échelle du périmètre irrigué, a néanmoins mis en lumière l'incertitude générée sur le calcul des variables biophysiques à partir des données satellite, et notamment le LAI, conduisant à une sous-estimation de l'évapotranspiration et ainsi des volumes irrigués. En-effet, l'estimation par télédétection du LAI sur cette zone agricole de couverts arborés éparse et de cultures d'hiver a montré ses limites en déterminant des niveaux de LAI trop faibles. Afin de pallier à ce problème de manière correcte, il

conviendrait d'utiliser un étalonnage de la formule empirique utilisée spécifique à la région, ou un réseaux de neurones, les deux méthodes nécessitant l'utilisation de données de LAI mesurées in-situ. Les règles d'irrigation quant à elles sont également des règles optimisant l'usage de l'eau en ne considérant aucune marge de sécurité, les pratiques réelles devant induire des volumes irrigués notablement plus forts. Un travail semble ainsi nécessaire afin d'améliorer la paramétrisation, et ainsi le réalisme, des pratiques d'irrigation dans les simulations sur cette zone d'étude. Certains types de couverts, comme le maraichage ou l'agroforesterie, ont également un comportement hydrométéorologique et des pratiques agricoles très différentes qu'il est nécessaire de prendre en compte pour mieux comprendre le fonctionnement d'ensemble de cet agrosystème tunisien. Malgré cela, et malgré la prise en compte de paramètres fixes pour l'arboriculture, couvert hétérogène qui reste très complexe à simuler, SURFEX réussit à recréer une variabilité spatiale relativement cohérente en termes de variance, qui est assez similaire à celle d'EVASPA et SPARSE, qui utilisent pourtant de plus nombreux produits satellite en entrée et devraient induire plus de variabilité. Les différences dans la répartition spatiale des flux entre les modèles semblent également subir une influence de l'irrigation, pointant du doigt le potentiel de cette comparaison pour détecter les zones irriguées, à condition de simuler sur des années plus sèches et d'améliorer la représentation de l'irrigation dans SURFEX. Par ailleurs, il ne semble pas y avoir d'autre cohérence spatiale évidente, laissant à penser que l'écart entre les modèles est dû essentiellement à la variabilité des données satellite d'entrée, hypothèse restant à vérifier, notamment par la mise en place de cette comparaison inter-modèles sur un jeu de données satellite harmonisées, n'utilisant que les données Landsat-8 pour simuler l'année 2013-2014 ainsi que formulations empiriques communes pour le calcul des variables biophysiques entre SURFEX, EVASPA et SPARSE. L'usage combiné de télédétection optique haute résolution et d'un modèle de surface a donc le potentiel de simuler la répartition spatiale du bilan d'énergie de manière instantanée de façon similaire à un modèle de bilan d'énergie, s'affranchissant ainsi de l'information dans l'infrarouge thermique requise par ces derniers tout en fournissant des séries temporelles complètes, des capacités prédictives notables et des possibilités de couplages hydrologiques et météorologiques/climatologiques, mais au prix d'une représentation plus complexe de la surface nécessitant une plus grande connaissance des caractéristiques des couverts et du sol. Ce travail permet également la base d'un usage conjoints de ces deux types de modèles, de surface et de bilan d'énergie, pour représenter spatialement l'évapotranspiration de manière plus fidèle et de manière continue temporellement, avec notamment la perspective d'une assimilation de produits d'évapotranspiration EVASPA ou SPARSE dans SURFEX.

Conclusion et Perspectives

Conclusion et Perspectives

1. Synthèse

La compréhension du fonctionnement hydrométéorologique des agrosystèmes de manière spatialisée s'avère délicate du fait de l'hétérogénéité spatiale des couverts, mais également de la forte influence anthropique sur les couverts de surface, via les pratiques agricoles comme les rotations de culture ou l'irrigation. Les bases de données utilisées par défaut dans les modèles de surface, à l'instar d'ECOCLIMAP, décrivent les écosystèmes de manière climatologique, avec une répartition des types de végétation et des paramètres de surface fixes dans le temps. Elles ne permettent ainsi pas de représenter l'impact de ce type de pratiques sur les flux d'eau et d'énergie. Pourtant, évaluer la part des pratiques agricoles dans le bilan hydrologique à l'échelle du paysage, comme par exemple un bassin versant, est d'une importance cruciale pour la gestion des ressources en eau, surtout dans un contexte de changement climatique. Cette thèse visait donc à montrer l'intérêt de la télédétection, notamment optique, à haute résolution, pour répondre à cette problématique, de par sa capacité à caractériser les surfaces et suivre l'évolution du couvert végétal.

Pour y parvenir, j'ai utilisé le modèle SURFEX-ISBA, développé par le CNRM ([Masson et al., 2013](#)), qui présente l'avantage de simuler de manière conjointe les bilans d'eau et d'énergie de la surface, permettant une vision assez générale des processus en jeu et lui conférant des capacités de couplage hydrologiques et météorologiques ainsi qu'une capacité prédictive intéressantes.

De nombreuses données satellitaires ont été exploitées dans cette thèse, allant des données de Formosat-2 à celles des missions Landsat en passant par les acquisitions des satellites SPOT. Ces données présentaient toutes des résolutions spatiales inférieures à 30 m, leur utilisation conjointe impliquant des nombres d'images relativement importants, permettant ainsi de caractériser au mieux l'hétérogénéité spatiale et temporelle forte des parcelles agricoles. Les données acquises in-situ, que ce soit les mesures de flux par eddy-covariance ou scintillométrie, les mesures des différentes variables biophysiques ou encore l'étude des sols ou les mesures d'humidité ont également été fort précieuses pour évaluer localement les méthodes présentées, et émettre ou conforter des hypothèses quant au fonctionnement thermo-hydrigue des couverts.

La première partie de cette thèse visait à montrer comment la télédétection optique pouvait aider à la prise en compte de la phénologie réelle dans la modélisation de surface et son impact sur les flux, avec une application sur un agrosystème du Sud-Ouest de la France. Pour ce faire, j'ai exploité des produits de télédétection sous la forme de cartes d'occupation des sols et d'indice de surface foliaire (LAI) afin de renseigner le modèle sur la

répartition spatiale et la phénologie réelle des couverts. Pour obtenir une spatialisation des flux la plus cohérente possible, j'ai opté pour une approche de simulation par unité cartographique homogène, dissociant ainsi les parcelles des différentes cultures dans ma zone d'étude. Les résultats de cette étude ([Etchanchu et al., 2017](#)) ont permis de mettre en évidence l'intérêt des données satellitaires pour capter l'impact du choix des cultures et des dates de semis et de récolte sur les flux. La comparaison aux mesures d'eddy-covariance sur les sites historiques du CESBIO à Auradé et Lamasquère montre ainsi une amélioration notable sur la temporalité de l'évapotranspiration, indicateur principal de la consommation en eau des cultures, tout particulièrement pour les cultures d'été. L'analyse spatialisée a montré que cette conclusion pouvait être généralisée à l'ensemble de la zone d'étude et montrait également un impact sur les autres flux hydriques comme le ruissellement ou le drainage vers le sol profond. Néanmoins, ces simulations trouvaient leur principale limite dans le fait qu'elles n'intégraient pas l'irrigation, générant ainsi une amplitude de l'évaporation plus faible sur les cultures concernées.

La seconde partie de la thèse a donc consisté à mettre en place des méthodes permettant de prendre en compte des pratiques d'irrigation réalistes dans la modélisation de surface. J'ai donc développé un schéma d'irrigation pour SURFEX-ISBA qui, tout en utilisant les paramètres des schémas d'irrigation classiques des modèles de surface, possède des degrés de liberté suffisants pour s'adapter spatialement et temporellement aux différentes pratiques rencontrées à l'échelle d'un agrosystème. Les pratiques d'irrigation préconisées étant bien souvent dépendantes du stade de croissance des cultures, les indices de végétation issus de la télédétection optique semblaient tous trouvés pour spatialiser ces pratiques théoriques, permettant la détermination des périodes irrigables et des seuils de stress hydrique au déclenchement de l'irrigation. Avec l'appui de la documentation technique et de l'expertise de la CACG et d'Arvalis, organismes en charge du conseil aux agriculteurs dans le Sud-Ouest de la France, j'ai éprouvé ces méthodes par une application sur une vingtaine de parcelles de maïs irrigué du Gers et de la Haute-Garonne. Les résultats montrent ainsi que l'irrigation simulée est plus réaliste en utilisant l'information satellite pour piloter les paramètres du schéma d'irrigation plutôt que de faire appel à des valeurs climatologiques, que ce soit en termes de volume annuel ou de temporalité de l'irrigation. Cela met donc bien en évidence le potentiel de la télédétection optique pour aider à la spatialisation de pratiques d'irrigation théoriques. Néanmoins, ils mettent également en lumière la sensibilité importante de l'estimation des besoins en irrigation à la capacité de stockage hydrique du sol, appelée réserve utile. Des travaux récents visent à caractériser cette dernière à partir de la télédétection mais sa détermination reste pour l'heure essentiellement liée à des cartes de texture, fonctions de pédotransfert associées et des profondeurs racinaires fixées par type de culture.

Enfin, la troisième et dernière partie de la thèse visait à valoriser les méthodes mises en place dans les deux premières parties afin de réaliser une estimation des flux hydrométéorologiques spatialisée la plus réaliste possible dans un agrosystème semi-aride

tunisien, permettant ainsi de comprendre la part des pratiques agricoles, et notamment de l'irrigation, dans le bilan hydrique régional. Le recours à des mesures scintillométriques a permis de valider de manière originale les simulations à l'échelle du paysage (quelques dizaines de kilomètres carrés), via la comparaison des flux de chaleur sensible (H) mesurés et simulés de manière intégrée sur l'emprise du scintillomètre. Une comparaison à des approches de modélisation par bilan d'énergie à partir de données de télédétection dans l'infrarouge thermique, permettant l'estimation de l'évapotranspiration instantanée aux dates des acquisitions satellite, a ensuite été réalisée. Bien qu'encore perfectible, elle a permis de pointer le potentiel d'un usage combiné de ces deux types de modèles pour déduire des séries temporelles d'évapotranspiration sur des zones agricoles semi-arides dont le fonctionnement hydrométéorologique est encore mal connu.

2. Perspectives

Cette thèse permet d'ouvrir la voie à de nombreux travaux de recherche. Outre son caractère démonstrateur pour l'usage de données satellite récentes ou à venir, à l'instar des données optiques de Sentinel-2 ou de Vénus, ou encore les futures données infrarouge thermiques de la mission spatiale franco-indienne TRISHNA, ce travail met en lumière les perspectives d'amélioration des simulations dans les agrosystèmes, pour représenter de manière plus réaliste encore les pratiques agricoles dans les modèles. Il ouvre également la voie à une meilleure compréhension de la place des pratiques agricoles dans les grands cycles biogéochimiques et hydro-climatiques à l'échelle régionale, qui reste encore largement méconnu. Parmi ces perspectives, on peut ainsi noter les suivantes :

- **Impact sur l'hydrologie et la gestion des ressources en eau à l'échelle du bassin versant**

SURFEX-ISBA a déjà fait l'objet de nombreux couplages avec des modèles hydrologiques (TRIP/MODCOU, [Habets et al., 1999](#); [Alkama et al., 2010](#)). Un tel couplage s'appuyant sur des simulations utilisant les méthodes proposées dans cette thèse pour la prise en compte de pratiques agricoles plus réalistes, notamment l'irrigation, permettrait d'avoir une idée bien moins incertaine de la place de ces dernières dans le cycle hydrologique à échelle régionale, expliquant ainsi mieux les processus responsables de l'évolution du débit des cours d'eau mais aussi du niveau des nappes phréatiques profondes. Cela permettrait notamment de proposer des scénarios d'optimisation de la gestion des ressources dans les bassins versants agricoles, notamment en région semi-aride où la pression sur les ressources hydriques est extrêmement importante. Néanmoins, la spatialisation de l'irrigation demeure un challenge important du fait de la difficulté à déterminer les zones effectivement irriguées.

Cependant, la détermination des surfaces irriguées à l'échelle du paysage, nécessaire pour pouvoir envisager un tel couplage reste un point délicat. Cependant plusieurs travaux, portés notamment par le CNES, en témoigne la mise en place du Centre d'Expertise

Scientifique (CES) sur la Cartographie des Surfaces Irriguées, et les travaux menés au CESBIO notamment dans le cadre du projet Simult'eau (Démarez et al., 2019), visent à proposer des méthodes pour déduire la répartition spatiale des zones irriguées à partir de données de télédétection. On aurait ainsi une idée bien plus précise de l'impact spatio-temporel de l'irrigation sur les ressources en eau.

- **Impact sur la météorologie et le climat**

SURFEX-ISBA est également couplé de manière opérationnelle à des modèles météorologiques (SAFRAN/AROME) et de circulation générale (ARPEGE/ALADIN). Profiter de ces couplages permettrait d'étudier de manière plus réaliste l'impact des pratiques agricoles et de l'irrigation sur la météorologie, notamment la création d'« îlots de fraîcheur » qui peuvent potentiellement influencer les variables et courants atmosphériques locaux dans les plaines agricoles. Cela peut également donner des clés pour étudier de manière plus réaliste les évolutions possibles des pratiques agricoles face aux changements climatiques, sujet déjà abordé avec SURFEX-ISBA, notamment par la thèse de Matthias Rocher. Dans ce cadre, il pourrait être extrêmement intéressant de comprendre l'impact d'une meilleure prise en compte des pratiques agricoles pour la simulation des cycles biogéochimiques, notamment du carbone, à échelle régionale, et ainsi dégager des leviers d'action pour lutter contre les effets du changement climatique. Pour ce faire, il faudrait utiliser des produits de LAI satellite, non plus en forçage direct, comme présenté dans la thèse, mais en assimilation dans la version A-Gs d'ISBA, qui simule la croissance de la biomasse ainsi que la respiration des couverts végétaux.

- **Améliorer la connaissance des pratiques agricoles à l'échelle régionale**

Les méthodes présentées dans cette thèse montrent l'intérêt de la télédétection pour suivre l'évolution des cultures. Néanmoins, de nombreuses limitations subsistent encore quant à la prise en compte de certaines pratiques dans les modèles. Ainsi, les irrigations permettant de réaliser le semis en cas de sol trop sec/compact ou d'induire la levée ne sont pas encore représentées. L'implémentation de règles de décision simples, comme un cumul de précipitations ou une période d'irrigation possible avant levée avec un seuil d'humidité de déclenchement bas seraient des pistes pour prendre en compte ces problématiques, notamment très présentes dans les agrosystèmes semi-arides. L'exemple de la Tunisie a également montré que les pratiques d'irrigations n'étaient pas forcément bien connues et donc difficiles à renseigner dans le modèle, malgré l'apport de la télédétection. La calibration des paramètres d'irrigation, et notamment des seuils de déclenchement, sur des données mesurées in-situ pourrait permettre de mieux comprendre les modes de gestion moyens de chaque culture à l'échelle de l'agrosystème. Une piste serait également d'utiliser des données de télédétection à haute résolution spatio-temporelle dans le domaine des micro-ondes, sous la forme de produits d'humidité, comme par exemple ceux issus de Sentinel-1 (Gao et al., 2017), pour détecter le timing des événements d'irrigation et calibrer les paramètres du schéma d'irrigation en accord. Dans l'idéal, on pourrait ainsi imaginer la

formation de bases de données présentant des paramètres d'irrigation types pour différentes cultures et régions climatiques.

Enfin, le fonctionnement de certains couverts comme l'arboriculture, l'agroforesterie ou le maraîchage ne sont pas bien représentés dans les simulations actuelles à l'échelle du paysage. Concernant l'arboriculture, la principale limite provient du caractère épars du couvert, qui devient ainsi dur à caractériser par satellite sans avoir une résolution spatiale inférieure à 10 m, obligeant ainsi à considérer la végétation comme fixe dans le temps, omettant ainsi la naturelle des arbres aux conditions météorologiques tout comme les pratiques influençant la biomasse aérienne, comme les tailles régulières (Chebbi, 2019). Enfin, la prise en compte du maraîchage et de l'agroforesterie nécessite, d'une part, de prendre en compte une rotation infra-annuelle des cultures, ces cycles pouvant se succéder au milieu d'une même année, et d'autre part d'une étude spécifique pour comprendre comment est réalisée la gestion agricole, et typiquement l'irrigation, de ce type de parcelles. Cela doit passer, premièrement, par la production de cartes d'occupation des sols par satellite à raison d'au moins 2 cartes par an, mais également par l'instrumentation de ce type de couvert. Concernant la production de cartes d'occupation des sols sur la base de données satellite, le CES Occupation des Sols du CNES vise actuellement à exploiter le potentiel d'algorithmes de classification, comme par exemple la chaîne IOTA2 (Inglada et al., 2015), pour produire des cartes à fréquence trimestrielle. Enfin, pour évaluer des paramètres de couverts au fonctionnement mal connu, la calibration de ces derniers sur la base de produit d'évapotranspiration issues de données satellite en infrarouge thermique, à l'image des produits issus d'EVASPA, pourrait également être une solution, permettant une estimation spatialisée de ces derniers.

- **Améliorer la représentation des propriétés hydriques du sol dans les simulations**

Comme on a pu le voir, un des facteurs essentiels à l'estimation des flux, notamment d'évapotranspiration, mais aussi de l'irrigation est l'estimation de la réserve utile accessible par les plantes. Cette dernière dépend non seulement de la texture des sols, mais également, de manière très importante, de la profondeur racinaire. Il est évidemment très complexe de déterminer avec certitude des propriétés de manière spatialisée. Néanmoins, de plus en plus de cartes de sols à haute résolution existent, à l'image de la Global Soil Map (GSM, Roman-Dobarco et al., 2019) produite par l'INRA. Concernant la profondeur racinaire, il est cependant très complexe d'obtenir une répartition spatiale, tant celle-ci peut être contrainte ou non par la profondeur de sol, paramètre extrêmement difficile à estimer à l'échelle du paysage. Néanmoins, plusieurs travaux en cours, notamment au CESBIO, visent à développer des méthodes de ré-estimation de la réserve utile sur via l'étalonnage de modèles de bilan hydrique. Une telle approche pourrait être envisagée également avec un modèle de surface, qui en combinant des informations de texture données par une carte des sols et une information satellite optique sur la croissance du couvert pour bien contraindre la consommation en eau de la culture, avec pourquoi pas en complément une information

en infrarouge thermique pour bien contraindre l'évapotranspiration, pourrait permettre une estimation spatialisée de la réserve utile dans des milieux méconnus. Ce potentiel a d'ailleurs déjà été mis en lumière dans de nombreux travaux ([Demarty et al., 2005](#) ; [Coudert et al., 2006](#)). Cependant, ces méthodes trouvent actuellement leurs limites sur les couverts irrigués, dans la mesure où l'irrigation empêche l'exploitation complète de la gamme d'humidité du sol par les plantes, masquant ainsi partiellement l'information de la réserve utile. Cette méthode se trouve donc fort adaptée sur des cultures pluviales, sensibles au stress hydrique, et tout particulièrement en milieu semi-aride où la gamme d'humidité du sol est largement exploitée du fait des conditions climatiques contrastées.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Alaoui, N., 2005. Référentiel pour la Conduite Technique de l'olivier (*Olea europea*). Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc.
- Albergel, C., Munier, S., Bocher, A., Bonan, B., Zheng, Y., Draper, C., Leroux, D.J., Calvet, J.-C., 2018. LDAS-Monde Sequential Assimilation of Satellite Derived Observations Applied to the Contiguous US: An ERA-5 Driven Reanalysis of the Land Surface Variables. *Remote Sensing* 10, 1627. <https://doi.org/10.3390/rs10101627>
- Alkama, R., Decharme, B., Douville, H., Becker, M., Cazenave, A., Sheffield, J., Voldoire, A., Tyteca, S., Le Moigne, P., 2010. Global Evaluation of the ISBA-TRIP Continental Hydrological System. Part I: Comparison to GRACE Terrestrial Water Storage Estimates and In Situ River Discharges. *J. Hydrometeor.* 11, 583–600. <https://doi.org/10.1175/2010JHM1211.1>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., others, 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome 300, D05109.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R., 1998. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 34, 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Arvalis, 2007. Pilotez l'irrigation avec la method Irrinov, www.irrinov.arvalisinstitutduvegetal.fr/fichiers/Irrinov_midipy_06_07.pdf.
- Aubinet, M., Grelle, A., Ibrom, A., Rannik, Ü., Moncrieff, J., Foken, T., Kowalski, A.S., Martin, P.H., Berbigier, P., Bernhofer, Ch., Clement, R., Elbers, J., Granier, A., Grünwald, T., Morgenstern, K., Pilegaard, K., Rebmann, C., Snijders, W., Valentini, R., Vesala, T., 1999. Estimates of the Annual Net Carbon and Water Exchange of Forests: The EUROFLUX Methodology, in: Raffaelli, A.H.F. and D.G. (Ed.), *Advances in Ecological Research*. Academic Press, pp. 113–175. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60018-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60018-5)
- Bahir, M., Boulet, G., Olioso, A., Rivaland, V., Gallego-Elvira, B., Mira, M., Rodriguez, J.-C., Jarlan, L., Merlin, O., 2017. Evaluation and Aggregation Properties of Thermal Infra-Red-Based Evapotranspiration Algorithms from 100 m to the km Scale over a Semi-Arid Irrigated Agricultural Area. *Remote Sensing* 9, 1178. <https://doi.org/10.3390/rs9111178>
- Battude, M., Al Bitar, A., Brut, A., Tallec, T., Huc, M., Cros, J., Weber, J.-J., Lhuissier, L., Simonneaux, V., Demarez, V., 2017. Modeling water needs and total irrigation depths of maize crop in the south west of France using high spatial and temporal resolution satellite imagery. *Agricultural Water Management* 189, 123–136. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.04.018>
- Battude, M., Al Bitar, A., Morin, D., Cros, J., Huc, M., Marais Sicre, C., Le Dantec, V., Demarez, V., 2016. Estimating maize biomass and yield over large areas using high spatial and temporal resolution Sentinel-2 like remote sensing data. *Remote Sensing of*

- Environment 184, 668–681. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.07.030>
- Best, M.J., Pryor, M., Clark, D.B., Rooney, G.G., Essery, R., L.H., Ménard, C.B., Edwards, J.M., Hendry, M.A., Porson, A., Gedney, N., Mercado, L.M., Sitch, S., Blyth, E., Boucher, O., Cox, P.M., Grimmond, C.S.B., Harding, R.J., 2011. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 1: Energy and water fluxes. *Geoscientific Model Development* 4, 677–699. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-677-2011>
- Béziat, P., 2009. Effets des conditions environnementales et des pratiques culturales sur les flux de carbone et d'eau dans les agrosystèmes (phd). Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier.
- Béziat, P., Ceschia, E., Dedieu, G., 2009. Carbon balance of a three crop succession over two cropland sites in South West France. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 1628–1645. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.05.004>
- Boone, A., Calvet, J.-C., Noilhan, J., 1999. Inclusion of a Third Soil Layer in a Land Surface Scheme Using the Force–Restore Method. *J. Appl. Meteor.* 38, 1611–1630. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038<1611:IOATSL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<1611:IOATSL>2.0.CO;2)
- Boone, A., Samuelsson, P., Gollvik, S., Napoly, A., Jarlan, L., Brun, E., Decharme, B., 2016. The Interactions between Soil-Biosphere-Atmosphere (ISBA) land surface model Multi-Energy Balance (MEB) option in SURFEX – Part 1: Model description. *Geoscientific Model Development Discussions* 1–56. <https://doi.org/10.5194/gmd-2016-269>
- Boulet, G., Mougenot, B., Lhomme, J.-P., Fanise, P., Lili-Chabaane, Z., Oliso, A., Bahir, M., Rivalland, V., Jarlan, L., Merlin, O., Coudert, B., Er-Raki, S., Lagouarde, J.-P., 2015. The SPARSE model for the prediction of water stress and evapotranspiration components from thermal infra-red data and its evaluation over irrigated and rainfed wheat. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 4653–4672. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4653-2015>
- Braud, I., Dantas-Antonino, A.C., Vauclin, M., Thony, J.L., Ruelle, P., 1995. A simple soil-plant-atmosphere transfer model (SiSPAT) development and field verification. *Journal of Hydrology* 166, 213–250.
- Braud, I., Tilmant, F., Samie, R., Le Goff, I., 2013. Assessment of the SiSPAT SVAT Model for Irrigation Estimation in South-East France. *Procedia Environmental Sciences* 19, 747–756. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.083>
- 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., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model stics. *European Journal of Agronomy, Modelling Cropping Systems: Science, Software and Applications* 18, 309–332. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00110-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00110-7)
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.-M., Meynard, J.M., Delécolle, R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I.

- Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311–346. <https://doi.org/10.1051/agro:19980501>
- Brisson, N., Ruget, F., Gate, P., Lorgeou, J., Nicoullaud, B., Tayot, X., Plenet, D., Jeuffroy, M.-H., Bouthier, A., Ripoche, D., Mary, B., Justes, E., 2002. STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie* 22, 69–92. <https://doi.org/10.1051/agro:2001005>
- Calvet, J.-C., Noilhan, J., Roujean, J.-L., Bessemoulin, P., Cabelguenne, M., Olioso, A., Wigneron, J.-P., 1998. An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites. *Agricultural and Forest Meteorology* 92, 73–95. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(98\)00091-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(98)00091-4)
- Carlson, T., 2007. An Overview of the “Triangle Method” for Estimating Surface Evapotranspiration and Soil Moisture from Satellite Imagery. *Sensors* 7, 1612–1629. <https://doi.org/10.3390/s7081612>
- Chahbi, A., 2015. Prédiction du rendement des céréales à partir des mesures de télédétection, application sur le bassin de merguellil. Institut National Agronomique de Tunisie, Université de Carthage, Tunis.
- Chebbi, W., Boulet, G., Le Dantec, V., Chabaane, Z.L., Fanise, P., Mougenot, B., Ayari, H., 2018. Analysis of evapotranspiration components of a rainfed olive orchard during three contrasting years in a semi-arid climate. *Agricultural and Forest Meteorology* 256, 159–178.
- Chen, F., Kusaka, H., Tewari, M., Bao, J. W., & Hirakuchi, H., 2004. Utilizing the coupled WRF/LSM/Urban modeling system with detailed urban classification to simulate the urban heat island phenomena over the Greater Houston area, Fifth Symposium on the Urban Environment, 9-11, American Meteorological Society, Vancouver, BC, Canada.
- Chen, J.M., Black, T.A., 1992. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell & Environment* 15, 421–429. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1992.tb00992.x>
- Chen, Y., Marek, G.W., Marek, T.H., Gowda, P.H., Xue, Q., Moorhead, J.E., Brauer, D.K., Srinivasan, R., Heflin, K.R., 2019. Multisite evaluation of an improved SWAT irrigation scheduling algorithm for corn (*Zea mays* L.) production in the U.S. Southern Great Plains, *Environ. Modell. & Softw.*, 118, 23–34, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.04.001>.
- Choudhury, B.J., Golus, R.E., 1988. Estimating soil wetness using satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 9, 1251–1257. <https://doi.org/10.1080/01431168808954932>
- Choudhury, B.J., Idso, S.B., Reginato, R.J., 1987. Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared-temperature based energy balance equation. *Agricultural and Forest Meteorology* 39, 283–297. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(87\)90021-9](https://doi.org/10.1016/0168-1923(87)90021-9)
- Claverie, M., 2012. Estimation spatialisée de la biomasse et des besoins en eau des cultures à l’aide de données satellitaires à hautes résolutions spatiale et temporelle : application aux agrosystèmes du sud-ouest de la France (phd). Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier.

- Coudert, B., Ottlé, C., Boudevillain, B., Demarty, J., Guillevic, P., 2006. Contribution of Thermal Infrared Remote Sensing Data in Multiobjective Calibration of a Dual-Source SVAT Model. *J. Hydrometeor.* 7, 404–420. <https://doi.org/10.1175/JHM503.1>
- Courault, D., Seguin, B., Olioso, A., 2005. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: From empirical to numerical modeling approaches. *Irrig Drainage Syst* 19, 223–249. <https://doi.org/10.1007/s10795-005-5186-0>
- Dai, Y., Zeng, X., Dickinson, R.E., Baker, I., Bonan, G.B., Bosilovich, M.G., Denning, A.S., Dirmeyer, P.A., Houser, P.R., Niu, G., Oleson, K.W., Schlosser, C.A., Yang, Z.-L., 2003. The Common Land Model. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 84, 1013–1024. <https://doi.org/10.1175/BAMS-84-8-1013>
- Dantzig, G.B., Orden, A., Wolfe, P., 1955. The generalized simplex method for minimizing a linear form under linear inequality restraints. *Pacific Journal of Mathematics* 5, 183–195.
- de Rosnay, P., Polcher, J., Laval, K., Sabre, M., 2003. Integrated parameterization of irrigation in the land surface model ORCHIDEE. Validation over Indian Peninsula. *Geophys. Res. Lett.* 30, 1986. <https://doi.org/10.1029/2003GL018024>
- Deardorff, J.W., 1977. A Parameterization of Ground-Surface Moisture Content for Use in Atmospheric Prediction Models. *J. Appl. Meteor.* 16, 1182–1185. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1977\)016<1182:APOGSM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016<1182:APOGSM>2.0.CO;2)
- Dejoux, J.-F., Dedieu, G., Hagolle, O., Ducrot, D., Menaut, J.-C., Ceschia, E., Baup, F., Demarez, V., Marais-Sicre, C., Kadiri, M., Gascoin, S., 2012. Kalideos OSR MiPy : un observatoire pour la recherche et la démonstration des applications de la télédétection à la gestion des territoires. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* 17–30.
- Demarez, V., Helen, F., Marais-Sicre, C., Baup, F., 2019. In-Season Mapping of Irrigated Crops Using Landsat 8 and Sentinel-1 Time Series. *Remote Sensing* 11, 118. <https://doi.org/10.3390/rs11020118>
- Demarty, J., Ottlé, C., Braud, I., Olioso, A., Frangi, J.P., Gupta, H.V., Bastidas, L.A., 2005. Constraining a physically based Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer model with surface water content and thermal infrared brightness temperature measurements using a multiobjective approach: CONSTRAINING A PHYSICALLY BASED SVAT MODEL. *Water Resources Research* 41. <https://doi.org/10.1029/2004WR003695>
- Dewaele, H., Munier, S., Albergel, C., Planque, C., Laanaia, N., Carrer, D., Calvet, J.-C., 2017. Parameter optimisation for a better representation of drought by LSMs: inverse modelling vs. sequential data assimilation. *Hydrology and Earth System Sciences* 21, 4861–4878. <https://doi.org/10.5194/hess-21-4861-2017>
- Dorigo, W.A., Zurita-Milla, R., de Wit, A.J., Brazile, J., Singh, R., Schaepman, M.E., 2007. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. *International journal of applied earth observation and geoinformation* 9, 165–193.
- Duchemin, B., Fieuzal, R., Rivera, M.A., Ezzahar, J., Jarlan, L., Rodriguez, J.C., Hagolle, O.,

- Watts, C., 2015. Impact of Sowing Date on Yield and Water Use Efficiency of Wheat Analyzed through Spatial Modeling and FORMOSAT-2 Images. *Remote Sensing* 7, 5951–5979. <https://doi.org/10.3390/rs70505951>
- Ducoudré, N.I., Laval, K., Perrier, A., 1993. SECHIBA, a New Set of Parameterizations of the Hydrologic Exchanges at the Land-Atmosphere Interface within the LMD Atmospheric General Circulation Model. *J. Climate* 6, 248–273. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<0248:SANSOP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<0248:SANSOP>2.0.CO;2)
- Ducrot, D., Sassier, H., Mombo, J., Goze, S., Planes, J.-G., 1998. Contextual methods for multisource land cover classification with application to Radarsat and SPOT data. pp. 225–236. <https://doi.org/10.1117/12.331867>
- Ducrot, D., 2005. Méthodes d'analyse et d'interprétation d'images de télédétection multi-sources -Extraction de caractéristiques du paysage. « Habilitation à Diriger des Recherches » thesis, INP Toulouse.
- Ducrot, D., Gouaux, P., 2007. Paysage et Télédétection dans les processus écologiques : Caractérisation des paysages par télédétection, source d'indicateurs de leur fonctionnement. JET Journées d'Ecologie Fonctionnelle, Biarritz, France.
- Ducrot, D., Ceshia, E., Marais-Sicre, C.: Détection des changements de l'occupation du sol à partir d'images de télédétection multi-temporelles. « Changement de paysage » conference, Tunis, 2009.
- Dümenil, L., Todini, E., 1992. Chapter 9 - A rainfall–runoff scheme for use in the Hamburg climate model, in: O'Kane, J.P. (Ed.), *Advances in Theoretical Hydrology*, European Geophysical Society Series on Hydrological Sciences. Elsevier, Amsterdam, pp. 129–157. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-89831-9.50016-8>
- Durand, Y., Brun, E., Merindol, L., Guyomarc'h, G., Lesaffre, B., Martin, E., 1993. A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Annals of Glaciology* 18, 65–71. <https://doi.org/10.3189/S0260305500011277>
- Eckhardt, D.W. (Bureau of R., Verdin, J.P., Lyford, G.R., 1990. Automated update of an irrigated lands GIS using SPOT HRV imagery. *Photogrammetric engineering and remote sensing (USA)*.
- Ek, M.B., Mitchell, K.E., Lin, Y., Rogers, E., Grunmann, P., Koren, V., Gayno, G., Tarpley, J.D., 2003. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108. <https://doi.org/10.1029/2002JD003296>
- Etchanchu, J., Rivalland, V., Gascoin, S., Cros, J., Tallec, T., Brut, A., Boulet, G., 2017. Effects of high spatial and temporal resolution Earth observations on simulated hydrometeorological variables in a cropland (southwestern France). *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 5693–5708. <https://doi.org/10.5194/hess-21-5693-2017>
- Evans, J.P., Zaitchik, B.F., 2008. Modeling the large-scale water balance impact of different irrigation systems. *Water Resour. Res.* 44, W08448. <https://doi.org/10.1029/2007WR006671>
- FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2012. Harmonized World Soil Database (version 1.2), FAO,

- Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
- Faroux, S., Kaptué Tchuenté, A.T., Roujean, J.-L., Masson, V., Martin, E., Le Moigne, P., 2013. ECOCLIMAP-II/Europe: a twofold database of ecosystems and surface parameters at 1km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models. *Geoscientific Model Development* 6, 563–582. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-563-2013>
- Ferrant, S., Bustillo, V., Burel, E., Salmon-Monviola, J., Claverie, M., Jarosz, N., Yin, T., Rivalland, V., Dedieu, G., Demarez, V., Ceschia, E., Probst, A., Al-Bitar, A., Kerr, Y., Probst, J.-L., Durand, P., Gascoin, S., 2016. Extracting Soil Water Holding Capacity Parameters of a Distributed Agro-Hydrological Model from High Resolution Optical Satellite Observations Series. *Remote Sensing* 8, 154. <https://doi.org/10.3390/rs8020154>
- Ferrant, S., Gascoin, S., Veloso, A., Salmon-Monviola, J., Claverie, M., Rivalland, V., Dedieu, G., Demarez, V., Ceschia, E., Probst, J.-L., Durand, P., Bustillo, V., 2014. Agro-hydrology and multi-temporal high-resolution remote sensing: toward an explicit spatial processes calibration. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 5219–5237. <https://doi.org/10.5194/hess-18-5219-2014>
- Fieuzal, R., Duchemin, B., Jarlan, L., Zribi, M., Baup, F., Merlin, O., Hagolle, O., Garatuza-Payan, J., 2011. Combined use of optical and radar satellite data for the monitoring of irrigation and soil moisture of wheat crops. *Hydrology and Earth System Sciences* 15, 1117–1129. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1117-2011>
- Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin, F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E.A., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J.A., Prentice, I.C., Ramankutty, N., Snyder, P.K., 2005. Global Consequences of Land Use. *Science* 309, 570–574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- Ford, T.W., Quiring, S.M., 2013. Influence of MODIS-Derived Dynamic Vegetation on VIC-Simulated Soil Moisture in Oklahoma. *Journal of Hydrometeorology* 14, 1910–1921. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-037.1>
- Franks, S.W., Beven, K.J., 1997. Estimation of evapotranspiration at the landscape scale: A fuzzy disaggregation approach. *Water Resources Research* 33, 2929–2938. <https://doi.org/10.1029/97WR01963>
- Fritz, S., See, L., McCallum, I., You, L., Bun, A., Moltchanova, E., Duerauer, M., Albrecht, F., Schill, C., Perger, C., Havlik, P., Mosnier, A., Thornton, P., Wood-Sichra, U., Herrero, M., Becker-Reshef, I., Justice, C., Hansen, M., Gong, P., Abdel Aziz, S., Cipriani, A., Cumani, R., Cecchi, G., Conchedda, G., Ferreira, S., Gomez, A., Haffani, M., Kayitakire, F., Malanding, J., Mueller, R., Newby, T., Nonguierma, A., Olusegun, A., Ortner, S., Rajak, D.R., Rocha, J., Schepaschenko, D., Schepaschenko, M., Terekhov, A., Tiangwa, A., Vancutsem, C., Vintrou, E., Wenbin, W., van der Velde, M., Dunwoody, A., Kraxner, F., Obersteiner, M., 2015. Mapping global cropland and field size. *Global Change Biology* 21, 1980–1992. <https://doi.org/10.1111/gcb.12838>

- Gallego-Elvira, B., Oliso, A., Mira, M., Castillo, S.R., Boulet, G., Marloie, O., Garrigues, S., Courault, D., Weiss, M., Chauvelon, P., Boutron, O., 2013. EVASPA (Evapotranspiration Assessment from SPace) Tool: An overview. *Procedia Environmental Sciences, Four Decades of Progress in Monitoring and Modeling of Processes in the Soil-Plant-Atmosphere System: Applications and Challenges* 19, 303–310. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.035>
- Gao, Q., Zribi, M., Escorihuela, M.J., Baghdadi, N., 2017. Synergetic Use of Sentinel-1 and Sentinel-2 Data for Soil Moisture Mapping at 100 m Resolution. *Sensors* 17, 1966. <https://doi.org/10.3390/s17091966>
- Garrigues, S., Oliso, A., Carrer, D., Decharme, B., Calvet, J.-C., Martin, E., Moulin, S., Marloie, O., 2015. Impact of climate, vegetation, soil and crop management variables on multi-year ISBA-A-gs simulations of evapotranspiration over a Mediterranean crop site. *Geosci. Model Dev.* 8, 3033–3053. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-3033-2015>
- Gausson, H., Bagnouls, F., 1953. Saison sèche et indice xérothermique. Université de Toulouse, Faculté des Sciences, Toulouse, France.
- Green, A.E., Hayashi, Y., 1998. Use of scintillometer technique over a rice paddy. *Journal of Agricultural Meteorology*, 54, 225–234.
- Guimberteau, M., Zhu, D., Maignan, F., Huang, Y., Yue, C., Dantec-Nédélec, S., Ottlé, C., Jornet-Puig, A., Bastos, A., Laurent, P., Goll, D., Bowring, S., Chang, J., Guenet, B., Tifafi, M., Peng, S., Krinner, G., Ducharne, A., Wang, F., Wang, T., Wang, X., Wang, Y., Yin, Z., Lauerwald, R., Joetzjer, E., Qiu, C., Kim, H., Ciais, P., 2018. ORCHIDEE-MICT (v8.4.1), a land surface model for the high latitudes: model description and validation. *Geoscientific Model Development* 11, 121–163. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-121-2018>
- Habets, F., Noilhan, J., Golaz, C., Goutorbe, J.P., Lacarrère, P., Leblois, E., Ledoux, E., Martin, E., Ottlé, C., Vidal-Madjar, D., 1999. The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area: Part I: Model and database. *Journal of Hydrology* 217, 75–96. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00019-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00019-0)
- Habets, F., Noilhan, J., Golaz, C., Goutorbe, J.P., Lacarrère, P., Leblois, E., Ledoux, E., Martin, E., Ottlé, C., Vidal-Madjar, D., 1999. The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area: Part II: Simulation of streamflows and annual water budget. *Journal of Hydrology* 217, 97–118.
- Habets, F., Boone, A., Champeaux, J.L., Etchevers, P., Franchistéguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Le Moigne, P., Martin, E., Morel, S., Noilhan, J., Quintana Seguí, P., Rousset-Regimbeau, F., Vienne, P., 2008. The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research* 113. <https://doi.org/10.1029/2007JD008548>
- Habets, F., Philippe, E., Martin, E., David, C.H., Leseur, F., 2014. Small farm dams: impact on river flows and sustainability in a context of climate change. *Hydrology and Earth System Sciences* 18, 4207–4222. <https://doi.org/10.5194/hess-18-4207-2014>

- Haddeland, I., Lettenmaier, D.P., Skaugen, T., 2006. Effects of irrigation on the water and energy balances of the Colorado and Mekong river basins. *Journal of Hydrology* 324, 210–223. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.028>
- Hadria, R., Duchemin, B., Lahrouni, A., Khabba, S., Er-raki, S., Dedieu, G., Chehbouni, A.G., Olioso, 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, 1093–1117. <https://doi.org/10.1080/01431160500382980>
- Hagolle, O., Dedieu, G., Mougenot, B., Debaecker, V., Duchemin, B., 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, Remote Sensing Data Assimilation Special Issue* 112, 1689–1701. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.08.016>
- Hagolle, O., Huc, M., Pascual, D.V., Dedieu, G., 2010. A multi-temporal method for cloud detection, applied to FORMOSAT-2, VEN μ S, LANDSAT and SENTINEL-2 images. *Remote Sensing of Environment* 114, 1747–1755. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.03.002>
- Horst, T.W., Weil, J.C., 1992. Footprint estimation for scalar flux measurements in the atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorol* 59, 279–296. <https://doi.org/10.1007/BF00119817>
- Inglada, J., Arias, M., Tardy, B., Hagolle, O., Valero, S., Morin, D., Dedieu, G., Sepulcre, G., Bontemps, S., Defourny, P., Koetz, B., 2015. Assessment of an Operational System for Crop Type Map Production Using High Temporal and Spatial Resolution Satellite Optical Imagery. *Remote Sensing* 7, 12356–12379. <https://doi.org/10.3390/rs70912356>
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jacquemin, B., Noilhan, J., 1990. Sensitivity study and validation of a land surface parameterization using the HAPEX-MOBILHY data set. *Boundary-Layer Meteorol* 52, 93–134. <https://doi.org/10.1007/BF00123180>
- Jarlan, L., Balsamo, G., Lafont, S., Beljaars, A., Calvet, J.C., Mougin, E., 2008. Analysis of leaf area index in the ECMWF land surface model and impact on latent heat and carbon fluxes: Application to West Africa. *J. Geophys. Res.* 113, D24117. <https://doi.org/10.1029/2007JD009370>
- Jarvis, P.G., 1976. The Interpretation of the Variations in Leaf Water Potential and Stomatal Conductance Found in Canopies in the Field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 273, 593–610. <https://doi.org/10.1098/rstb.1976.0035>
- Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M.W., Schmid, H.P., 2004. A Simple Parameterisation for Flux Footprint Predictions. *Boundary-Layer Meteorology* 112, 503–523. <https://doi.org/10.1023/B:BOUN.0000030653.71031.96>

- Koetz, B., Hoersch, B., Gascon, F., 2017. Sentinel-2 Mission Status and R&D. Landsat Science Team –Winter Meeting, Boston.
- Kriegler, F.J., Malila, W.A., Nalepka, R.F., Richardson, W., 1969. Preprocessing Transformations and Their Effects on Multispectral Recognition. Presented at the Remote Sensing of Environment, VI, p. 97.
- Krinner, G., Viovy, N., Noblet-Ducoudré, N. de, Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., Prentice, I.C., 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles* 19. <https://doi.org/10.1029/2003GB002199>
- Kroon, P.S., Hensen, A., Jonker, H.J.J., Ouwersloot, H.G., Vermeulen, A.T., Bosveld, F.C., 2010. Uncertainties in eddy covariance flux measurements assessed from CH₄ and N₂O observations. *Agricultural and Forest Meteorology, Special Issue on Eddy Covariance (EC) flux measurements of CH₄ and N₂O* 150, 806–816. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.08.008>
- Kueppers, L.M., Snyder, M.A., 2012. Influence of irrigated agriculture on diurnal surface energy and water fluxes, surface climate, and atmospheric circulation in California. *Climate Dynamics* 38, 1017–1029. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1123-0>
- Lagacherie, P., Rabotin, M., Colin, F., Moussa, R., Voltz, M., 2010. Geo-MHYDAS: A landscape discretization tool for distributed hydrological modeling of cultivated areas. *Computers & Geosciences* 36, 1021–1032.
- Lassabatère, L., Angulo-Jaramillo, R., Soria Ugalde, J.M., Cuenca, R., Braud, I., Haverkamp, R., 2006. Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments—BEST. *Soil Science Society of America Journal* 70, 521–532. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0026>
- Lawrence, D.M., Thornton, P.E., Oleson, K.W., Bonan, G.B., 2007. The Partitioning of Evapotranspiration into Transpiration, Soil Evaporation, and Canopy Evaporation in a GCM: Impacts on Land–Atmosphere Interaction. *J. Hydrometeor.* 8, 862–880. <https://doi.org/10.1175/JHM596.1>
- Lawston, P.M., Santanello, J.A., Zaitchik, B.F., Rodell, M., 2015. Impact of Irrigation Methods on Land Surface Model Spinup and Initialization of WRF Forecasts. *J. Hydrometeor.* 16, 1135–1154. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0203.1>
- Leblon, B., Guerif, M., Baret, F., 1991. The use of remotely sensed data in estimation of PAR use efficiency and biomass production of flooded rice. *Remote Sensing of Environment* 38, 147–158.
- Ledoux, E., Girard, G., de Marsily, G., Villeneuve, J.P., Deschenes, J., 1989. Spatially Distributed Modeling: Conceptual Approach, Coupling Surface Water And Groundwater, in: Morel-Seytoux, H.J. (Ed.), *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling: Theory and Practice*, NATO ASI Series. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 435–454. https://doi.org/10.1007/978-94-009-2352-2_16
- Leduc, C., Pulido-Bosch, A., Remini, B., 2017. Anthropization of groundwater resources in the Mediterranean region: processes and challenges. *Hydrogeol J* 25, 1529–1547.

- <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1572-6>
- Le Moigne, P., 2012. Surfex scientific documentation.
- Leng, G., Huang, M., Tang, Q., Gao, H., Leung, L.R., 2013. Modeling the Effects of Groundwater-Fed Irrigation on Terrestrial Hydrology over the Conterminous United States. *J. Hydrometeor.* 15, 957–972. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-049.1>
- Leng, G., Leung, L.R., Huang, M., n.d. Significant impacts of irrigation water sources and methods on modeling irrigation effects in the ACMEland Model. *J. Adv. Model. Earth Syst.* n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/2016MS000885>
- Li, Z.-L., Tang, R., Wan, Z., Bi, Y., Zhou, C., Tang, B., Yan, G., Zhang, X., 2009. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. *Sensors* 9, 3801–3853.
- Liang, X., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., Burges, S.J., 1994. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *J. Geophys. Res.* 99, 14415–14428. <https://doi.org/10.1029/94JD00483>
- Liu, M., Tian, H., Chen, G., Ren, W., Zhang, C., Liu, J., 2008. Effects of Land-Use and Land-Cover Change on Evapotranspiration and Water Yield in China During 1900–2000. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 44, 1193–1207. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00243.x>
- Lobell, D., Bala, G., Mirin, A., Phillips, T., Maxwell, R., Rotman, D., 2009. Regional Differences in the Influence of Irrigation on Climate. *J. Climate* 22, 2248–2255. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2703.1>
- Mahfouf, J.-F., Noilhan, J., 1996. Inclusion of Gravitational Drainage in a Land Surface Scheme Based on the Force-Restore Method. *J. Appl. Meteor.* 35, 987–992. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1996\)035<0987:IOGDIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1996)035<0987:IOGDIA>2.0.CO;2)
- Maia Veloso, A.G., 2014. Modélisation spatialisée de la production des flux et des bilans de carbone et d'eau des cultures de blé à l'aide de données de télédétection: application au sud-ouest de la France (PhD Thesis). Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
- Martin, E., Gascoin, S., Grusson, Y., Murgue, C., Bardeau, M., Ancil, F., Ferrant, S., Lardy, R., Moigne, P.L., Leenhardt, D., Rivalland, V., Pérez, J.-M.S., Sauvage, S., Therond, O., 2016. On the Use of Hydrological Models and Satellite Data to Study the Water Budget of River Basins Affected by Human Activities: Examples from the Garonne Basin of France, in: Cazenave, A., Champollion, N., Benveniste, J., Chen, J. (Eds.), *Remote Sensing and Water Resources*, Space Sciences Series of ISSI. Springer International Publishing, pp. 33–57. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32449-4_3
- Masse, A., Ducrot, D., Marthon, P., 2011. Tools for multitemporal analysis and classification of multisource satellite imagery, in: 2011 6th International Workshop on the Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images (Multi-Temp). Presented at the 2011 6th International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images (Multi-Temp), pp. 209–212. <https://doi.org/10.1109/Multi-Temp.2011.6005085>
- Masson, V., Champeaux, J.-L., Chauvin, F., Meriguet, C., Lacaze, R., 2003. A Global Database

- of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models. *Journal of Climate* 16, 1261.
- Masson, V., Moigne, P.L., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., Belamari, S., Barbu, A., Boone, A., Bouysse, F., Brousseau, P., Brun, E., Calvet, J.-C., Carrer, D., Decharme, B., Delire, C., Donier, S., Essaouini, K., Gibelin, A.-L., Giordani, H., Habets, F., Jidane, M., Kerdraon, G., Kourzeneva, E., Lafaysse, M., Lafont, S., Brossier, C.L., Lemonsu, A., Mahfouf, J.-F., Marguinaud, P., Mokhtari, M., Morin, S., Pigeon, G., Salgado, R., Seity, Y., Taillefer, F., Tanguy, G., Tulet, P., Vincendon, B., Vionnet, V., Voldoire, A., 2013. The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of Earth surface variables and fluxes. *Geoscientific Model Development* 6, 929–960. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-929-2013>
- Maurer, E.P., Wood, A.W., Adam, J.C., Lettenmaier, D.P., Nijssen, B., 2002. A Long-Term Hydrologically Based Dataset of Land Surface Fluxes and States for the Conterminous United States. *Journal of Climate* 15, 3237.
- Merlin, O., Chehbouni, A., 2004. Different approaches in estimating heat flux using dual angle observations of radiative surface temperature. *International Journal of Remote Sensing* 25, 275–289. <https://doi.org/10.1080/0143116031000116408>
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.* 19, 205–234.
- Moore, C.J., 1986. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary-Layer Meteorol* 37, 17–35. <https://doi.org/10.1007/BF00122754>
- Moore, C.J., Fisch, G., 1986. Estimating heat storage in Amazonian tropical forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 38, 147–168. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(86\)90055-9](https://doi.org/10.1016/0168-1923(86)90055-9)
- Nagler, P.L., Glenn, E.P., Nguyen, U., Scott, R.L., Doody, T., 2013. Estimating Riparian and Agricultural Actual Evapotranspiration by Reference Evapotranspiration and MODIS Enhanced Vegetation Index. *Remote Sensing* 5, 3849–3871. <https://doi.org/10.3390/rs5083849>
- Napoly, A., Boone, A., Samuelsson, P., Gollvik, S., Martin, E., Seferian, R., Carrer, D., Decharme, B., Jarlan, L., 2017. The interactions between soil–biosphere–atmosphere (ISBA) land surface model multi-energy balance (MEB) option in SURFEXv8 – Part 2: Introduction of a litter formulation and model evaluation for local-scale forest sites. *Geoscientific Model Development* 10, 1621–1644. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1621-2017>
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology* 10, 282–290.
- Noblet-Ducoudré, N. de, Gervois, S., Ciais, P., Viovy, N., Brisson, N., Seguin, B., Perrier, A., 2004. Coupling the Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer Scheme ORCHIDEE to the agronomy model STICS to study the influence of croplands on the European carbon and water budgets. *Agronomie* 24, 397–407. <https://doi.org/10.1051/agro:2004038>
- Noilhan, J., Lacarrère, P., 1995. GCM Grid-Scale Evaporation from Mesoscale Modeling. *J. Climate* 8, 206–223. <https://doi.org/10.1175/1520->

- [0442\(1995\)008<0206:GGSEFM>2.0.CO;2](#)
- Noilhan, J., Planton, S., 1989. A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models. *Mon. Wea. Rev.* 117, 536–549. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2)
- Norman, J.M., Kustas, W.P., Humes, K.S., 1995. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology, Thermal Remote Sensing of the Energy and Water Balance over Vegetation* 77, 263–293. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02265-Y](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02265-Y)
- Oleson, K.W., Niu, G.-Y., Yang, Z.-L., Lawrence, D.M., Thornton, P.E., Lawrence, P.J., Stöckli, R., Dickinson, R.E., Bonan, G.B., Levis, S., Dai, A., Qian, T., 2008. Improvements to the Community Land Model and their impact on the hydrological cycle: COMMUNITY LAND MODEL HYDROLOGY. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 113, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2007JG000563>
- Ozdogan, M., Gutman, G., 2008. A new methodology to map irrigated areas using multi-temporal MODIS and ancillary data: An application example in the continental US. *Remote Sensing of Environment* 112, 3520–3537. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.04.010>
- Ozdogan, M., Rodell, M., Beaudoin, H.K., Toll, D.L., 2010. Simulating the Effects of Irrigation over the United States in a Land Surface Model Based on Satellite-Derived Agricultural Data. *Journal of Hydrometeorology* 11, 171–184. <https://doi.org/10.1175/2009JHM1116.1>
- Papale, D., Reichstein, M., Aubinet, M., Canfora, E., Bernhofer, C., Kutsch, W., Longdoz, B., Rambal, S., Valentini, R., Vesala, T., Yakir, D., 2006. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences* 3, 571–583.
- Pielke Sr, R.A., Adegoke, J.O., Chase, T.N., Marshall, C.H., Matsui, T., Niyogi, D., 2007. A new paradigm for assessing the role of agriculture in the climate system and in climate change. *Agricultural and Forest Meteorology* 142, 234–254.
- Pokhrel, Y., Hanasaki, N., Koirala, S., Cho, J., Yeh, P.J.-F., Kim, H., Kanae, S., Oki, T., 2011. Incorporating Anthropogenic Water Regulation Modules into a Land Surface Model. *J. Hydrometeor.* 13, 255–269. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-013.1>
- Qian, Y., Huang, M., Yang, B., Berg, L.K., 2013. A Modeling Study of Irrigation Effects on Surface Fluxes and Land–Air–Cloud Interactions in the Southern Great Plains. *Journal of Hydrometeorology* 14, 700–721. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0134.1>
- Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., Morel, S., 2008. Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *Journal of Applied Meteorology & Climatology* 47, 92–107.
- RAHMAN, H., DEDIEU, G., 1994. SMAC: a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum. *International Journal of Remote*

- Sensing 15, 123–143. <https://doi.org/10.1080/01431169408954055>
- Raupach, M.R., 1994. Simplified expressions for vegetation roughness length and zero-plane displacement as functions of canopy height and area index. *Boundary-Layer Meteorol* 71, 211–216. <https://doi.org/10.1007/BF00709229>
- Reichstein, M., Falge, E., Baldocchi, D., Papale, D., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, N., Gilmanov, T., Granier, A., Grünwald, T., Havránková, K., Ilvesniemi, H., Janous, D., Knohl, A., Laurila, T., Lohila, A., Loustau, D., Matteucci, G., Meyers, T., Miglietta, F., Ourcival, J.-M., Pumpanen, J., Rambal, S., Rotenberg, E., Sanz, M., Tenhunen, J., Seufert, G., Vaccari, F., Vesala, T., Yakir, D., Valentini, R., 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology* 11, 1424–1439. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x>
- Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1, 318–333. <https://doi.org/10.1063/1.1745010>
- Roerink, G.J., Su, Z., Menenti, M., 2000. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere* 25, 147–157.
- Román Dobarco, M., Bourennane, H., Arrouays, D., Saby, N.P.A., Cousin, I., Martin, M.P., 2019. Uncertainty assessment of GlobalSoilMap soil available water capacity products: A French case study. *Geoderma* 344, 14–30. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.036>
- Roy, S.B., Avissar, R., 2002. Impact of land use/land cover change on regional hydrometeorology in Amazonia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 107, LBA 4-1-LBA 4-12. <https://doi.org/10.1029/2000JD000266>
- Saadi, S., 2018. Spatial estimation of actual evapotranspiration and irrigation volumes using water and energy balance models forced by optical remote sensing data (VIS / NIR / TIR) (phdthesis). Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier).
- Saadi, S., Boulet, G., Bahir, M., Brut, A., Delogu, É., Fanise, P., Mougenot, B., Simonneaux, V., Lili Chabaane, Z., 2018. Assessment of actual evapotranspiration over a semiarid heterogeneous land surface by means of coupled low-resolution remote sensing data with an energy balance model: comparison to extra-large aperture scintillometer measurements. *Hydrology and Earth System Sciences* 22, 2187–2209. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2187-2018>
- Saadi, S., Simonneaux, V., Boulet, G., Raimbault, B., Mougenot, B., Fanise, P., Ayari, H., Lili-Chabaane, Z., 2015. Monitoring Irrigation Consumption Using High Resolution NDVI Image Time Series: Calibration and Validation in the Kairouan Plain (Tunisia). *Remote Sensing* 7, 13005–13028. <https://doi.org/10.3390/rs71013005>
- Schewe, J., Heinke, J., Gerten, D., Haddeland, I., Arnell, N.W., Clark, D.B., Dankers, R., Eisner, S., Fekete, B.M., Colón-González, F.J., Gosling, S.N., Kim, H., Liu, X., Masaki, Y., Portmann, F.T., Satoh, Y., Stacke, T., Tang, Q., Wada, Y., Wisser, D., Albrecht, T., Frieler, K., Piontek, F., Warszawski, L., Kabat, P., 2014. Multimodel assessment of water scarcity

- under climate change. PNAS 111, 3245–3250. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222460110>
- Seguin, B., Courault, D., Guérif, M., 1994. Surface temperature and evapotranspiration: Application of local scale methods to regional scales using satellite data. *Remote Sensing of Environment* 49, 287–295.
- Sellers, P.J., Meeson, B.W., Hall, F.G., Asrar, G., Murphy, R.E., Schiffer, R.A., Bretherton, F.P., Dickinson, R.E., Ellingson, R.G., Field, C.B., 1995. Remote sensing of the land surface for studies of global change: Models—algorithms—experiments. *Remote Sensing of Environment* 51, 3–26.
- Sellers, P.J., Tucker, C.J., Collatz, G.J., Los, S.O., Justice, C.O., Dazlich, D.A., Randall, D.A., 1996. A Revised Land Surface Parameterization (SiB2) for Atmospheric GCMS. Part II: The Generation of Global Fields of Terrestrial Biophysical Parameters from Satellite Data. *J. Climate* 9, 706–737. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009<0706:ARLSPF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<0706:ARLSPF>2.0.CO;2)
- Shabou, M., Mougenot, B., Chabaane, Z.L., Walter, C., Boulet, G., Aissa, N.B., Zribi, M., 2015. Soil Clay Content Mapping Using a Time Series of Landsat TM Data in Semi-Arid Lands. *Remote Sensing* 7, 6059–6078. <https://doi.org/10.3390/rs70506059>
- Shuttleworth, W.J., Gurney, R.J., 1990. The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 116, 497–519. <https://doi.org/10.1002/qj.49711649213>
- Siebert, S., Henrich, V., Frenken, K., Burke, J., 2013. Update of the digital global map of irrigation areas to version 5. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn, Germany and Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Simonneaux, V., Le Page, M., Helson, D., Metral, J., Thomas, S., Duchemin, B., Cherkaoui, M., Kharrou, H., Berjami, B., Chehbouni, A., 2009. Estimation spatialisée de l'Evapotranspiration des cultures irriguées par télédétection. Application à la gestion de l'Irrigation dans la plaine du Haouz (Marrakech, Maroc). *Science et changements planétaires/Sécheresse* 20, 123–130.
- SSP-AGRESTE, 2012. Des surfaces irrigables en baisse à partir de 2000, Agreste primeur, 292, <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/primeur292.pdf>.
- Tang, Q., Vivoni, E.R., Muñoz-Arriola, F., Lettenmaier, D.P., 2012. Predictability of Evapotranspiration Patterns Using Remotely Sensed Vegetation Dynamics during the North American Monsoon. *Journal of Hydrometeorology* 13, 103–121. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-032.1>
- Tang, R., Li, Z.-L., Tang, B., 2010. An application of the Ts–VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi-arid regions: Implementation and validation. *Remote Sensing of Environment* 114, 540–551. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.012>
- Tardy, B., Rivalland, V., Huc, M., Hagolle, O., Marcq, S., Boulet, G., 2016. A Software Tool for Atmospheric Correction and Surface Temperature Estimation of Landsat Infrared Thermal Data. *Remote Sensing* 8, 696. <https://doi.org/10.3390/rs8090696>

- Tesemma, Z.K., Wei, Y., Peel, M.C., Western, A.W., 2015. The effect of year-to-year variability of leaf area index on Variable Infiltration Capacity model performance and simulation of runoff. *Advances in Water Resources* 83, 310–322. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.07.002>
- Therond, O., Sibertin-Blanc, C., Lardy, R., Gaudou, B., Balestrat, M., Hong, Y., Louail, T., Mayor, E., Nguyen, V.B., Panzoli, D., others, 2014. Integrated modelling of social-ecological systems: The MAELIA high-resolution multi-agent platform to deal with water scarcity problems, in: *Proceedings of the 7th International Congress on Environmental Modelling and Software*, June. Citeseer, pp. 15–19.
- Trezza, R., Allen, R.G., Tasumi, M., 2013. Estimation of Actual Evapotranspiration along the Middle Rio Grande of New Mexico Using MODIS and Landsat Imagery with the METRIC Model. *Remote Sensing* 5, 5397–5423. <https://doi.org/10.3390/rs5105397>
- Tucker, C.J., Townshend, J.R.G., Goff, T.E., 1985. African Land-Cover Classification Using Satellite Data. *Science* 227, 369–375. <https://doi.org/10.1126/science.227.4685.369>
- van den Hurk, B.J.J.M., Viterbo, P., Los, S.O., 2003. Impact of leaf area index seasonality on the annual land surface evaporation in a global circulation model. *J. Geophys. Res.* 108, 4191. <https://doi.org/10.1029/2002JD002846>
- Veloso, A., Demarez, V., Ceschia, E., 2012. Retrieving Crops Green Area Index from High Temporal and Spatial Resolution Remote Sensing Data. Presented at the First Sentinel-2 Preparatory Symposium, p. 33.
- Verseghy, D.L., 1991. Class—A Canadian land surface scheme for GCMS. I. Soil model. *International Journal of Climatology* 11, 111–133. <https://doi.org/10.1002/joc.3370110202>
- Verseghy, D.L., McFarlane, N.A., Lazare, M., 1993. Class—A Canadian land surface scheme for GCMS, II. Vegetation model and coupled runs. *Int. J. Climatol.* 13, 347–370. <https://doi.org/10.1002/joc.3370130402>
- Voirin-Morel, S., 2003. Modélisation distribuée des flux d'eau et d'énergie et des débits à l'échelle régionale du bassin Adour-Garonne. Ph.D. thesis, Université Toulouse III – Paul Sabatier.
- Wan, Z., Dozier, J., 1996. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 34, 892–905. <https://doi.org/10.1109/36.508406>
- Webb, E.K., Pearman, G.I., Leuning, R., 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 106, 85–100. <https://doi.org/10.1002/qj.49710644707>
- Weiss, M., Baret, F., Leroy, M., Hautecoeur, O., Bacour, C., Prevol, L., Bruguier, N., 2002. Validation of neural net techniques to estimate canopy biophysical variables from remote sensing data. *Agronomie-Sciences des Productions Vegetales et de l'Environnement*, 22(6), 547-554.
- Wenjuan Li, Weiss, M., Waldner, F., Defourny, P., Demarez, V., Morin, D., Hagolle, O., Baret, F., 2015. A Generic Algorithm to Estimate LAI, FAPAR and FCOVER Variables from

- SPOT4_HRVIR and Landsat Sensors: Evaluation of the Consistency and Comparison with Ground Measurements. *Remote Sensing* 7, 15494–15516. <https://doi.org/10.3390/rs71115494>
- Williams, K., Gornall, J., Harper, A., Wiltshire, A., Hemming, D., Quaife, T., Arkebauer, T., Scoby, D., 2017. Evaluation of JULES-crop performance against site observations of irrigated maize from Mead, Nebraska. *Geoscientific Model Development* 10, 1291–1320. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1291-2017>
- Wilson, M.F., Henderson-Sellers, A., 1985. A global archive of land cover and soils data for use in general circulation climate models. *Journal of Climatology* 5, 119–143. <https://doi.org/10.1002/joc.3370050202>
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme), 2014. The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy. UNESCO, Paris.
- Yang, Z.-L., Niu, G.-Y., Mitchell, K.E., Chen, F., Ek, M.B., Barlage, M., Longuevergne, L., Manning, K., Niyogi, D., Tewari, M., Xia, Y., 2011. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 2. Evaluation over global river basins. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 116. <https://doi.org/10.1029/2010JD015140>
- Zaitchik, B.F., Evans, J., Smith, R.B., 2005. MODIS-derived boundary conditions for a mesoscale climate model: Application to irrigated agriculture in the Euphrates basin. *Monthly weather review* 133, 1727–1743.

Liste des abréviations

Liste des abréviations

α = Albédo

AWC = Réserve d'eau accessible par la plante à un instant donné

AWC_{max} = Réserve d'eau maximale accessible par la plante, dite réserve utile.

CACG = Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne

CESBIO = Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère

CNES = Centre National d'Etudes Spatiales

CNRM = Centre National de Recherche Météorologique

D = Drainage dans le sol

E = Evaporation

ESA = Agence Spatiale Européenne

ETP = Evapotranspiration potentielle

ETR = Evapotranspiration réelle

EVASPA = Evapotranspiration Assessment from SPace

F2T = Seuil d'humidité en zone racinaire pour le déclenchement de l'irrigation

FAO = Food and Agriculture Organization

FCOVER = Fraction de couvert végétal

G = Flux de conduction thermique dans le sol

GDA = Groupe de Développement Agricole

GIEC = Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat

H = Flux de chaleur sensible

INAT = Institut National Agronomique de Tunisie

ISBA = Interactions between Surface Biosphere and Atmosphere

LAI = Indice de surface foliaire ou Leaf Area Index

LE = Flux de chaleur latente

LSM = Land Surface Model

MODIS = MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer

NASA = National Aeronautics and Space Administration

NDVI = Normalized Difference Vegetation Index

OSR = Observatoire Spatial Régional

PFT = Type Fonctionnel de Plante

R = Ruissellement

R² = Coefficient de corrélation

R_A = Rayonnement atmosphérique infrarouge

R_G = Rayonnement solaire global incident

R_S = Résistance stomatique

R_{Smin} = Résistance stomatique minimale

RMSE = Root-Mean Square Error

R_n = Rayonnement net

SAFRAN = Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige

SURFEX = SURFace EXternalisée

SWI = Soil Water Index

T_a = Température de l'air proche de la surface

TR = Transpiration

T_S = Température de surface

w = Humidité du sol

w_{fc} = Humidité du sol à la capacité au champ

w_{sat} = Humidité du sol à saturation

w_{wilt} = Humidité du sol au point de flétrissement

Liste des illustrations

Liste des illustrations

1. Liste des figures

Figure 1: Répartition de l'énergie solaire sur les surfaces continentales	18
Figure 2: Répartition de l'énergie solaire sur les surfaces continentales	19
Figure 3: Schéma des méthodes de spatialisation par maille régulière hétérogène (a), par maille régulière homogène(b) ou par unité cartographique homogène (c) avec trois types de couverts différents.....	25
Figure I-1: Diagramme ombrothermique (Gausсен et Bagnouls, 1953) pour la station météorologique de Toulouse-Blagnac.....	37
Figure I-2.1: Study area location (red).	43
Figure I-2.2: Land cover map for 2006.....	44
Figure I-2.3: LAI time series for Auradé (a) and Lamasquère (b) for 2006. The filled areas represent the standard deviations for the measured (gray) and remotely sensed (green) time series.....	50
Figure I-2.4: Evapotranspiration time series for Auradé (a) and Lamasquère (b) for 2006. The gray filled areas represent the standard deviations for the measured time series	50
Figure I-2.5: LAI time series for Auradé (a) and Lamasquère (b) for 2006 to 2010	51
Figure I-2.6: Evapotranspiration time series for Auradé (a) and Lamasquère (b) for 2006 to 2010	51
Figure I-2.7: Correlations between the evapotranspiration time series of the two experiments on: (a) uncultivated plots; (b) wheat crops; (c) C4 crops (maize and sorghum); and (d) sunflower and soy crops.....	53
Figure I-2.8: (a) Differences (diff.) in LAI (green) and evapotranspiration (red) between the two experiments (FORMOSAT-ECOCLIMAP) ; (b) Time series of Soil Water Index; (c) Differences in drainage (blue) and runoff (green) values; Averaged across C4 crops for 2008	54
Figure I-3.1: Coefficient de corrélation entre les LE simulés par les expériences ECOCLIMAP et FORMOSAT en 2006.....	61
Figure I-4.1: Bassin versant de la Save	62
Figure I-4.2: Occupation des sols sur le bassin de la Save	63
Figure I-4.3: Débits simulés et observé de la Save à la station de Larra (Haute-Garonne).	64
Figure II-1.1: Study area	79
Figure II-1.2: Irrigation triggering thresholds for the default and new irrigation schemes ISBA for the CACG plot n°20 in 2013.....	83
Figure II-1.3: Annual irrigation volumes on the CACG plots in 2013 (a) and 2014 (b).....	86
Figure II-1.4: Observed and simulated first (a, c) and last (b, d) irrigation event dates on the CACG plots in 2013 (a, b) and 2014 (c, d)	88
Figure II-1.5: Error on the estimation of annual irrigation volumes on the CACG plots in 2013 in function of the root depth	90
Figure II-1.6: Error on the first (a) and last (b) irrigation event dates on the CACG plots in 2013 in function of the root depth	91
Figure II-1.7: Annual irrigation volumes on Lamasquère site	92
Figure II-1.8: Observed and simulated first (a) and last (b) irrigation event dates for each year on Lamasquère.....	93

Figure II-1.9: Monthly evapotranspiration on the Lamasquère site in 2006 (a), 2008 (b), 2010 (c) and 2012 (d)	94
Figure III-1.1: Zone d'étude.....	106
Figure III-1.2: Pluviométrie annuelle à la station météorologique de Kairouan sur la période 1986-2016. Source graphique : Saadi (2018)	106
Figure III-1.3: Précipitations mensuelles moyennes à la station météorologique de Kairouan (1986-2016). Source graphique : Saadi (2018)	107
Figure III-1.4: Températures moyennes mensuelles à la station de Kairouan (1986-2016). Source graphique : Saadi (2018)	107
Figure III-1.5: Variation du niveau piézométrique de l'aquifère de Kairouan au piézomètre d'El Grin (9°50' 52" E; 35° 36' 13" N). Source : DGRE	108
Figure III-2.1: Carte d'occupation des sols SPOT-5 sur la plaine de Kairouan pour la saison 2012-2013	109
Figure III-2.2: Température de surface, en K, le 28/06/2014 sur la Tunisie centrale, estimée à partir des données infrarouge thermique de Landsat-8 via la chaîne LANDARTs.....	111
Figure III-2.3: Taux de couverture des arbres en arboriculture en 2012 estimé à partir des images Pléiades	112
Figure III-2.4: Station de mesure de flux sur la parcelle de blé sec de Ben Salem	113
Figure III-2.5: Principe de fonctionnement du scintillomètre.....	114
Figure III-2.6: Périmètre irrigué du GDA de Ben Salem II.....	116
Figure III-3.1: Comparaison des flux de chaleur sensible H instantanés à pas de temps semi-horaire sans (a, c) et avec irrigation (b, d) pour les années hydrologiques 2012-2013 (a, b) et 2013-2014 (c, d).	123
Figure III-3.2: Pluviométrie journalière mesurée à la station météorologique de Ben Salem sur la période Septembre 2012-Septembre 2014	124
Figure III-3.3: Distribution des volumes annuels d'irrigation simulés sur l'ensemble des cultures en C3 (a, c) et des parcelles d'arboriculture (b, d) pour les années 2012-2013 (a, b) et 2013-2014 (c, d)..	125
Figure III-3.4: Irrigations observées et simulées sur la station de flux en blé irrigué de Ben Salem pour l'année 2012-2013	126
Figure III-4.1: Détermination de la fraction évaporative pour un pixel donné dans l'espace (TS-albédo)	129
Figure III-4.2: Schéma des versions série et parallèle de SPARSE, représentant les diverses résistances thermiques et les diverses températures utilisées pour calculer les bilans d'énergie de chaque compartiment.	131
Figure III-5.1: Comparaison des flux d'énergie simulés par les différents modèles sur l'année 2013-2014	135
Figure III-5.2: Distributions spatiales de RN (a, c, e) et LE (b, d, f) sur la zone d'étude pour les différents modèles en Janvier (a, b), Avril (c, d) et Juillet (e, f).	137
Figure III-5.3: Différence cumulée sur l'ensemble des images Landsat-8 entre LE SURFEX et LE EVASPA instantanés en $W.m^{-2}$, débiaisée à chaque date (a), type d'occupation des sols (b) et volumes irrigués annuels (c) pour chaque parcelle de la zone d'étude sur l'année 2013-2014.....	138
Fig. III-5.4: Distribution du LAI mensuels dans les parcelles de céréales incluses dans le GDA de Ben Salem II sur les années 2012-2013 (a) et 2013-2014 (b)	140
Fig. III-5.5: LE SURFEX instantané à l'acquisition Landsat-8 du 09/04/2014 en $W.m^{-2}$	141

2. Liste des tableaux

Tableau I-1: Types Fonctionnels de Plante (PFT) présents dans les différentes versions de SURFEX ..	33
Table I-2.1: Aggregation rules of Formosat-2 cover maps by SURFEX vegetation type	47
Table I-2.2: Correlation coefficient and RMSE of evapotranspiration for the Auradé site.....	49
Table I-2.3: Correlation coefficient and RMSE of evapotranspiration for the Lamasquère site.....	49
Table I-2.4: Differences between FORMOSAT and ECOCLIMAP experiments on the annual drainage level in mm.yr-1 and the corresponding fraction of annual precipitations in % (FORMOSAT-ECOCLIMAP).	55
Table I-2.5: Differences between FORMOSAT and ECOCLIMAP experiments on annual runoff in mm.yr-1 and the corresponding fraction of annual precipitations in % (FORMOSAT-ECOCLIMAP).	55
Table I-3: Différence d'ETR, en mm, entre les expériences FORMOSAT et ECOCLIMAP par an et type de végétation	61
Table II-1.1: Summary of the numerical experiments	84
Table II-1.2: Scores on cumulated irrigation volumes on the CACG plots in 2013 and 2014	86
Table II-1.3: Scores on the estimation of the first irrigation event dates on CACG plots in 2013 and 2014	87
Table II-1.4: Scores on the estimation of the last irrigation event dates on CACG plots in 2013 and 2014	87
Table II-1.5: Scores on the annual irrigation volume and the first and last irrigation dates on CACG plots in 2013 with the measured root depths	89
Table II-1.6: Interannual scores on the annual irrigation volume and the first and last irrigation dates on Lamasquère.....	92
Table II-1.7: Interannual scores on evapotranspiration on Lamasquère	93
Table II-1.8: Results of the optimization of irrigation triggering thresholds on the Lamasquère site over 4 years (2006, 2008, 2010 and 2012).	100
Table III-1.1: Règles d'agrégation des classes entre les cartes d'occupation des sols SPOT-5 et les PFT de SURFEX-ISBA.....	118
Table III-1.2: Résultats de l'optimisation de la profondeur racinaire (D_{root}) et de la résistance stomatique minimale (RS_{min}) sur la simulation de l'évapotranspiration sur les sites flux.	120
Table III-1.3: Paramètres d'irrigation pour les différents types.....	121
Table III-2: Volumes d'irrigation observés et simulés en mm sur le périmètre du GDA chaque année sur la période Novembre-Mai, avec le détail par type de culture pour les irrigations simulées	139