



**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME
D'HABILITATION A DIRIGER LES RECHERCHES**

Spécialité : Sciences de la Terre et de l'Univers

Université Toulouse III – Paul Sabatier

Par Lionel Jarlan

**Observation spatiale du fonctionnement éco-hydrologique des surfaces
naturelles et cultivées en régions semi-arides**

Jury Composé de :

Jean-Christophe Calvet, Ingénieur général des ponts, des eaux et des forêts	Directeur
Dominique Courault, Directeur de Recherche INRA	Rapporteur
Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry, Professeur Université Toulouse III	Examineur
Saïd Khabba, Professeur Université Cadi Ayyad de Marrakech	Examineur
Eric Mougin, Directeur de Recherche CNRS	Examineur
Catherine Ottlé, Directeur de Recherche CNRS	Rapporteur
Jean-Pierre Wigneron, Directeur de Recherche INRA	Rapporteur

REMERCIEMENTS

Remerciements	3
Curriculum Vitae	7
1. Contexte et Objectifs	23
2. Parcours	25
3. Démarche et outils	26
Rapport sur les activités scientifiques	31
1. Inversion et assimilation de données satellitaires	33
1.1. Démarche	33
1.2. Outils et notation	35
Les données in situ	35
Les observations spatiales	37
Les modèles dynamiques des surfaces	39
Modèle et opérateur d'observation.....	45
L'assimilation de données dans les modèles de surface.....	45
Notions d'optimisation mathématique	48
1.3. Analyse du signal radar sur les régions sahéliennes	50
1.4. Suivi des surfaces sahéliennes	53
Un problème inverse (souvent) mal contraint	53
Restitution de la masse herbacée aérienne sur la bande sahelienne	55
1.5. Amélioration des états de surface dans les modèles atmosphériques	57
Assimilation de l'humidité superficielle dans le model ISBA-A-gs	57
Flux de carbone naturel sur l'Afrique de l'Ouest.....	58
2. Analyse diagnostique du fonctionnement éco-hydrologique des surfaces à l'échelle régionale et relation avec le climat global	60
2.1. Démarche et objectifs.....	60
2.2. Méthodologie	61
2.3. Variabilité et prévisibilité du couvert végétal sur le Maroc	63

Variabilite du couvert vegetal au maroc et lien avec le climat regional	63
Prevision precoce des rendements des cereales au Maroc	66
2.4. Variabilite du couvert neigeux sur le Haut Atlas marocain	69
Caracterisation de l'enneigement et tendance	69
Impact de l'oscillation Nord Atlantique	70
3. Suivi du besoin en eau des cultures et aide à la planification de l'eau agricole	71
3.1. Suivi de l'évapotranspiration des cultures annuelles irriguées	71
Partition de l'évapotranspiration dans les modèles TSVA.....	71
Détection du stress hydrique instantanée par teledetection thermique.....	72
Suivi en continu de l'évapotranspiration par assimilation de données dans les modèles TSVA.....	74
3.2. Application a l'aide à la planification de l'eau agricole	75
Bilan et perspectives	79
Coordination d'un Laboratoire Mixte international et Bilan.....	81
Perspectives : Rationaliser l'utilisation de l'eau agricole dans un avenir incertain.....	82
Axe 1 : Analyse regionale de l'efficacité de l'utilisation de l'eau	83
Axe 2 : Modelisation integree du fonctionnement éco-hydrologique des bassins versants semi-arides	84
Axe 3 : Nouveaux produits satellitaires pour le suivi des ressources en eau	87
Ouvertures.....	88
Bibliographie	91
Production scientifique	97

CURRICULUM VITAE

Lionel JARLAN
CR1 IRD
Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère
BPI 2801
18 avenue Edouard Belin
31401 Toulouse Cedex 4
Tél : 0561558546

Marié, né le 7 mars 1974
2 enfants

email : lionel.jarlan@ird.fr

Mots clés : végétation, hydrologie, télédétection spatiale, semi-aride.

FONCTIONS

CR1 IRD à l'UR 113 Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère (CESBIO) (01/12/2006→).

Co-responsable du module de télédétection du master 1 « Sciences de l'eau » à l'UCAM (Sep. 2014→Sep. 2016)

Responsable du groupe SUDMED (activités au Sud) et membre du comité de direction au CESBIO (Jan. 2016→).

Récipiendaire de la Prime d'Encadrement Doctoral et de Recherche (PEDR) (2015→).

Co-directeur (avec Pr. Saïd Khabba, Université Cadi Ayyad de Marrakech, UCAM, Maroc) du Laboratoire Mixte International (LMI) « Télédétection et Ressources en Eau en Méditerranée semi-Aride » (TREMA ; <http://trema.ucam.ac.ma>) 2011-2015.

Co-responsable (avec M. Le Page, ingénieur IRD au CESBIO) de l'observatoire TENSIFT 2011-2015

PARCOURS UNIVERSITAIRE (UNIVERSITE PAUL SABATIER, TOULOUSE)

2001 : Thèse de doctorat spécialité « Télédétection spatiale de la biosphère » intitulé « Inversion des données du diffusiomètre-vent des satellites ERS » réalisée au CESBIO sous la direction d'Eric Mougin (DR CNRS, CESBIO) soutenue le 18 décembre 2001.

1998 : DEA Sciences de la Terre et de l'Environnement ; stage intitulé « Suivi de l'activité photosynthétique des zones boréales par télédétection hyperfréquences » sous la direction de Yann Kerr (CNES, CESBIO).

1997 : Maîtrise de Physique (option physique de l'environnement)

PARCOURS PROFESSIONNEL (APRES LE DOCTORAT)

Depuis Déc. 2006 : CR1 IRD au CESBIO

- **Sep 2010-Sep. 2014** : affectation à l'Université Cadi Ayyad de Marrakech (UCAM), Maroc.
- **Nov. 2008-Sep. 2010** : affectation à la Direction de la Météorologie Nationale (DMN), Casablanca, Maroc.
- **Sep. 2007-Mai 2008** : mission longue durée à l'Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON), Ciudad Obregon, Sonora, Mexique (7 mois).

Jan. 06–Nov 2006 : consultant au Centre Européen de Prévision Météorologique (ECMWF, Reading, Angleterre).

Juin 04–Déc. 2005 : chercheur postdoctoral au Centre National de la Recherche Météorologique (CNRM/Météo-France, Toulouse).

Sep. 2003-Nov. 2003: visiteur Scientifique au College of Oceanic and Atmospheric Science, Corvallis, USA.

Jan. 2002 – Mai 2004 : chercheur post-doctoral CNES aux CESBIO et LEGOS.

ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT (NATURE ET NIVEAUX DES ENSEIGNEMENTS)

RESUME

Moniteur de l'Enseignement supérieur à l'université Paul Sabatier de Toulouse (1998-2001)

Enseignements/vacations (total de 144h): modélisation et télédétection des surfaces continentales et Systèmes d'Informations Géographiques (Universités Paul Sabatier de Toulouse 2002-2003, Marne la Vallée et Dijon 2004-2005, ENSG Marne la Vallée 2015) ; Intervention au sein du Master 2 « Energétique et Environnement » (2012-2014) de l'UCAM ; Intervenant et co-responsable du module « Télédétection » du master 1 « Sciences de l'eau » à l'UCAM depuis 2015.

Co-organisateur de 2 formations (télédétection radar et logiciel matlab) à l'UCAM.

DETAILS						
Intitulé	Contact	Formation	Dates	Cours	TD	TP
Traitement d'images : encadrement de projet	J.P. Gastellu Etchegorry, CESBIO, Toulouse	DUT Mesures physiques, Université Paul Sabatier (UPS), Toulouse	Avril 2002-2004			30
Télédétection radar : physique du signal	Isabelle Chenerie, D2M, Toulouse	DEA MOTO, UPS	Janvier 2003-2004	12		
Inversion et assimilation de données	Pierre Camberlin, CRC, Dijon	Master CEPSB, Université de Dijon	Novembre 2004	4		2
Caractérisation de la biosphère continentale par télédétection	Pierre Louis Frison, UMLV, Marne la Vallée	Master SIG, Université de Marne la Vallée	Novembre 2004	6		
Télédétection radar et SIG	Nicolas Chatelain, UPS, Auch	Licence GGAT, UPS	Septembre 2003-2004	4		2
Informatique : programmation en C	Robert Mauricot, CEMES, Toulouse	Formation continue, Institut National Polytechnique, Toulouse	Janvier-juin 2004	10	10	20
Initiation à l'assimilation de données	Jaime Garatuza, ITSON, Ciudad Obregon, Mexique	Niveau master 1, Instituto Tecnológico de Sonora	Avril 2008	4		
Cartographie et suivi du besoin en eau des cultures par télédétection	Saïd Khabba, LME, Université Cadi Ayyad de Marrakech (UCAM) (Maroc)	Master 2 « Energétique et Environnement » Faculté des Sciences Semlalia, UCAM, Marrakech, Maroc	Mars 2013 et Mars 2014	2*8h		
Principes de la télédétection spatiale et photogrammétrie*	Nourredine Laftouhi, LGR, Université Cadi Ayyad de Marrakech (UCAM) (Maroc)	Master 1 « Sciences de l'eau » Faculté des Sciences Semlalia, UCAM, Marrakech, Maroc	Mars 2015 (cours pour la nouvelle promotion prévue en mai 2016)	18		

Suivi du besoin en eau des cultures par télédétection spatiale	Pierre-Louis Frison LaSTIG - IGN/UPEM, Marne la Vallée	Master 2 « Information géographique : analyse spatiale et télédétection » Ecole Nationale des Sciences Géographiques (ENSG)	Février 2016	6		
--	--	---	--------------	---	--	--

ACTIVITES DE RECHERCHE

RESUME

La thématique générale de mes recherches est l'application de la télédétection spatiale multi-capteurs et multi-résolutions au suivi du fonctionnement éco-hydrologique des surfaces naturelles et cultivées essentiellement en région semi-aride. J'ai tout d'abord axé mes travaux sur l'analyse du signal radar (2000-1, 2002-1, 2005-4) et visible (2008-2) et le développement de nouvelles approches d'inversion des caractéristiques du couvert (surface foliaire, masse herbacée) (2002-2, 2003-1) sur le Sahel Ouest-Africain dont la spécificité était d'être basée sur des méthodes stochastiques afin de spécifier l'incertitude associée aux variables estimées. Assez naturellement, je me suis ensuite rapproché des processus régissant le fonctionnement du couvert tels que l'évapotranspiration et sa partition entre évaporation du sol et transpiration (2016-1), les flux de carbone (2008-4), plus spécifiquement, (1) à la représentation qui en est faite dans les modèles de transfert sol-végétation-atmosphère (TSVA) et (2) à comment et avec quelles observations satellitaires corriger les variables d'état des modèles par assimilation de données (2005-2, 2007-1, 2008-1, 2008-2, 2008-3, 2013-16). En parallèle de ces travaux amonts plutôt méthodologiques, je m'intéresse aussi à l'analyse diagnostique de la variabilité du couvert végétal (2005-1, 2005-3, 2006-3, 2007-2, 2008-5) à grande échelle sur la base des longues séries d'observations ou de produits dérivés des observations satellitaires dans le double d'objectif d'identifier les déterminants climatiques qui gouvernent cette variabilité et notamment les grandes pseudo-oscillations climatiques (NAO, ENSO ...) et de proposer, quand c'est pertinent, des systèmes d'alerte précoce ou de prévision saisonnière de l'activité photosynthétique du couvert (2014-4) et des rendements en grain (2014-3). Le montage du Laboratoire Mixte International Télédétection et Ressources en Eau en Méditerranée semi-Aride (TREMA ; <http://trema.ucam.ac.ma>) que j'ai co-dirigé de 2011 à 2015 m'a donné de plus, l'opportunité d'appliquer les méthodes décrites ci-dessus dans un objectif général un peu plus finalisé d'aide à la gestion intégrée des ressources en eau des bassins versants du Sud de la Méditerranée. Dans ce cadre, mes travaux récents portent (1) sur le suivi du manteau neigeux qui contribue significativement aux apports d'eau de surface pour les plaines en aval (2010-1, 2015-3, 2015-5) et (2) sur le suivi du besoin en eau des cultures irriguées de plaine (2010-2, 2010-3, 2013-7, 2014-1, 2014-2) comme principal consommateur en eau avec pour finalité l'aide à la planification de l'eau d'irrigation (2013-1, 2013-2, 2014-1, 2014-5).

PUBLICATIONS SIGNIFICATIVES

- Munoz-Sabater J., Jarlan L., Calvet J.C., Bouyssel F., De Rosnay P., 2007, From near surface to root zone soil moisture using different assimilation techniques, *J. Hydrometeorol.*, 8(2),194—206.
- 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.**
- Belaqiz, S., Mangiarotti S., Le Page M., Khabba S., Er-Raki S., Agouti T., Drapeau L., Kharrou H., El Adnani M., **Jarlan L., 2014, Irrigation scheduling of a classical gravity network based on the Covariance Matrix**

Adaptation-Evolutionary Strategy algorithm, *Computer and Electronics in Agriculture*, 102, p. 64-72.

Marchane, A., Jarlan, L., Hanich, L., Boudhar, A., Gascoïn, S., Tavernier, A., Filali, N., Le Page, M., Hagolle, O., Berjamy, B., 2015. Assessment of daily MODIS snow cover products to monitor snow cover dynamics over the Moroccan Atlas mountain range. *Rem. Sens. Env.*, 160, 72–86.

Jarlan, L., Khabba, S., et 53 co-auteurs, 2015. Remote Sensing of Water Resources in Semi-Arid Mediterranean Areas: the joint international laboratory TREMA. *Int. J. Rem. Sens.* 36, 4879–4917.

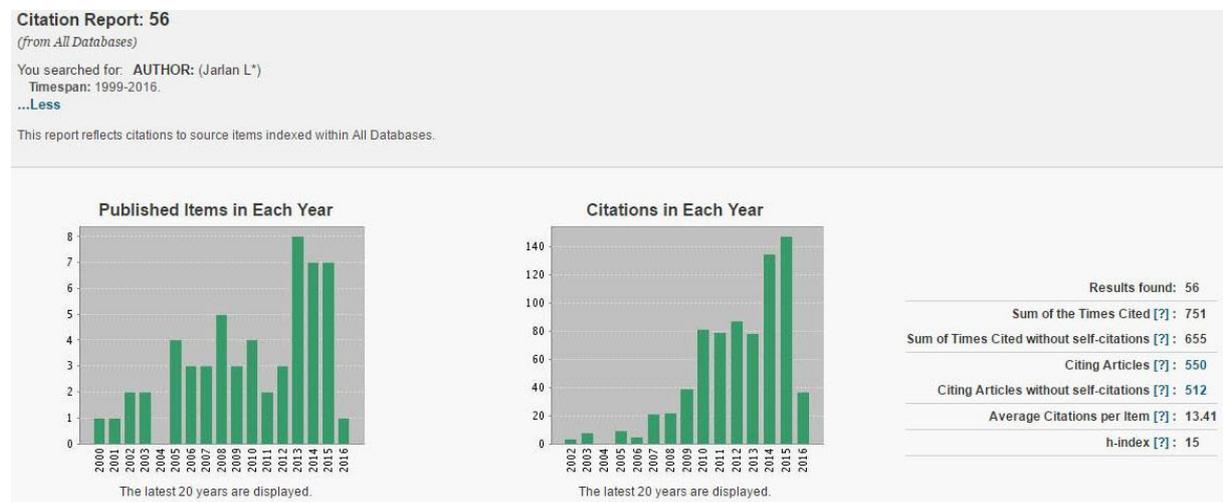
RESUME PRODUCTION (VOIR LISTE COMPLETE EN FIN DE DOCUMENT)

PRODUCTION

Nombre d'articles dans les revues		Nombre d'ouvrages			Nombre de congrès, colloques, etc.			
À comité de lecture	Sans comité de lecture	Comme auteur de l'ensemble	Comme auteur.e d'un chapitre	Comme éditeur /éditrice	Communications invitées	Communications publiées dans actes	Communications sans publication	Posters
58*			5		5**	40	28	44

* dont 56 Références web of knowledge "All databases" (voir ci-dessous) et 3 acceptés pour publication
 **essentiellement dans des colloques au Maroc

CITATION REPORT (WEB OF KNOWLEDGE, ALL DATABASES)



ARTICLES RANG A (49)

Numéro	Année	Titre Revue	IF	Quartile	Rang Auteur
2000-1	2000	IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing	1.48	Q1	3/5
2002-1	2002	Remote Sensing of Environment	1.99	Q1	1/5
2002-2	2002	IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing	1.60	Q1	1/3

2003-1	2002	Remote Sensing of Environment	2.64	Q1	1/7
2005-1	2005	Geophysical Research Letters	2.49	Q1	1/5
2005-2	2005	Remote Sensing of Environment	2.83	Q1	1/6
2005-3	2005	Journal of Geophysical Research- Atmosphere	2.78	Q1	3/4
2005-4	2005	Remote Sensing of Environment	2.83	Q1	2/6
2006-1	2006	Journal of Geophysical Research- Atmosphere	2.80	Q1	4/5
2006-2	2006	Ecological Modelling	1.88	Q2	3/4
2006-3	2006	Geophysical Research Letters	2.60	Q1	4/4
2007-1	2007	Journal of Hydrometeorology	2.19	Q2	2/5
2007-2	2007	Journal of Climate	3.55	Q1	2/5
2008-1	2008	Agricultural and Forest Meteorology			5/6
2008-2	2008	Remote Sensing of Environment	3.94	Q1	1/5
2008-3	2008	Remote Sensing of Environment	3.94	Q1	3/6
2008-4	2008	Journal of Geophysical Research- Atmosphere	3.14	Q1	1/6
2008-5	2008	Environmental Research Letters	1.72	Q2	2/5
2009-1	2009	Bulletin of the American Meteorological Society	6.12	Q1	14/26
2009-2	2009	Biogeosciences	3.24	Q1	6/14
2010-1	2010	International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation	1.56	Q1	4/8
2010-2	2010	Journal of Arid Environments	1.53	Q3	5/8
2010-3	2010	International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation	1.56	Q1	3/8
2011-1	2011	Climate Research	1.99	Q2	3/5
2011-2	2011	Hydrology and Earth System Science	3.15	Q1	3/8
2012-1	2012	Physical Review E	2.31	Q1	4/4
2012-2	2012	Water Resources Management	2.26	Q1	6/12
2013-1	2013	Water Resources Management	2.46	Q1	6/9
2013-2	2013	Agricultural Water Management	2.33	Q1	4/8
2013-3	2013	International Journal of Remote Sensing	1.35	Q2	5/5
2013-4	2013	Journal of Geophysical Research- Atmosphere	3.44	Q1	11/14
2014-1	2014	Computer and Electronics in Agriculture	1.76	Q1	10/10
2014-2	2014	Hydrology and Earth System Science	3.53	Q1	3/12
2014-3	2014	International Journal of Biometeorology	3.24	Q1	1/10
2014-4	2014	International Journal of Climatotomy	3.16	Q1	1/5
2014-5	2014	Remote Sensing	3.18	Q1	12/12
2014-6	2014	Agricultural and Forest Meteorology	3.76	Q1	4/6
2015-1	2015	Remote Sensing	3.18	Q1	5/8

2015-2	2015	Remote Sensing of Environment	6.39	Q1	7/7
2015-3	2015	Hydrology and Earth System Science	3.53	Q1	4/8
2015-4	2015	International Journal of Remote Sensing	1.65	Q2	1/59
2015-5	2015	Remote Sensing of Environment	6.39	Q1	2/10
2015-6	2015	Remote Sensing	3.18	Q1	6/6
2015-7	2015	Hydrology and Earth System Science	3.53	Q1	9/13
2016-1	2016	Agricultural Water Management	2.28	Q1	5/6
2016-2	2016	Hydrological Science Journal	1.55	Q2	5/5
2016-3	2016	Climate Research	2.49	Q1	2/5
2016-4	2016	Agricultural Water Management	2.28	Q1	7/7

ACTIVITES D'ENCADREMENT

CDD/POSTDOC

Nom	Statut	Financement	Période	% Encadrement	Sujet	Observations
Camille Szczypta	Post-doc	ANR AMETHYST	Fev. 2014-Jan. 2015	60 (avec S. Gascoin, CNRS, CESBIO)	Mise en place de la chaîne de prévision hydrométéorologique SAFRAN-ISBA-MODCOU sur le bassin versant de la Rheraya (Maroc)	Article en cours de rédaction

INGENIEURS ET TECHNICIENS

Nom	Amina Saaïdi	Adrien Tavernier et Bastien Richard	Abdelilah Al Moutammani et Adnane Chakir	Michel Le Page
Fonction	Ingénieur	Volontaire International	Assistant ingénieur	Ingénieur
Organisme	Direction de la Météorologie Nationale (Casablanca, Maroc)	IRD	IRD	IRD
Période	Sep. 2009-Sep. 2010	Adrien (dec. 2011-dec 2013) remplacé par Bastien (dec. 2013-Dec. 2015)	Abdelilah (Sep. 2010- Fév. 2013) remplacé par Adnane (Mars 2013-Dec. 2015)	Sep. 2010-Sep.2014
% Encadrement	100	100	50 (avec M. Le Page, CESBIO)	100
Attribution	Amina a mis en place le système de ré-analyse météorologique SAFRAN sur le bassin versant du Tensift (un outil opérationnel de Météo-France permettant d'avoir les principales variables	Leur attribution était double : (1) contribuer au suivi des mesures de l'observatoire Tensift et (2) mener un travail de support à la recherche. Adrien a participé au développement d'une méthodologie d'assimilation de	Abdelillah et Adnane étaient chargés de la programmation et de la calibration des instruments ainsi que du traitement des observations et de l'alimentation de	Michel a été affecté au Laboratoire Mixte International TREMA à Marrakech et était chargé du suivi de l'observatoire Tensift ainsi que du développement informatique d'outils en support. Nous avons mis en place une expérience chez l'agriculteur pour tester les

Production	météorologiques sur une grille régulière).	données dans le modèle de météo-France ISBA. Bastien a participé au développement des modèles de prévision précoce des rendements en grain des céréales pluviales basé sur mon travail (2014-3)	la base de données de l'observatoire Tensift	outils d'aide au pilotage de l'irrigation que nous avons développé (2014-5) qui a ensuite débouché sur le prototype d'un outil on-line.
		2013-16 ; 2014-29		<ul style="list-style-type: none"> Site web TREMA (http://trema.ucam.ac.ma) Article 2014-5 Outil Satellite for Irrigation ou SatIrr (http://osr-cesbio.ups-tlse.fr/Satirr/)

THESES

Nom	Joaquin Muñoz-Sabater	Guillaume Bigeard	Ahmed Marchane	Alhousseine Diarra	Ghizlane Aouade	Yoann Malbeteau
Financement	Projet européen GEOLAND	MESRT	LMI TREMA et bourse CNRS maroc	Programme doctoral international Modélisation des systèmes complexes	LMI TREMA et bourse CNRS maroc	MESRT
Période	Sep. 2004-Dec. 2005	Nov. 2009-Dec. 2014 (interruption >1 an car sportif de haut-niveau)	Déc. 2011-Juin 2015	Nov. 2013-Nov. 2016	Nov. 2013-Nov. 2016	Nov. 2013-Nov. 2016
Université	UPS	UPS	Université Cadi Ayyad de Marrakech (Maroc) ou UCAM	Université de Pierre et Marie Curie (Paris)	UCAM	Université Paul Sabatier
% Encadrement	20	50	80	80	50	20
Directeur ou co-encadrant	Jean-Christophe Calvet (CNRM, Météo-France)	Benoit Coudert (MdC UPS, CESBIO)	Lahoucine Hanich (Pr. UCAM)	Saïd Khabba (Pr. UCAM)	Abdelfattah Benkaddour (Pr. UCAM)	Olivier Merlin (CR CNRS, CESBIO)
Sujet	Assimilation de données de télédétection pour le suivi des surfaces continentales	Estimation spatialisée de l'évapotranspiration à l'aide de données infra-rouge thermique	Variabilité multi-échelle de la dynamique de la neige sur l'Atlas marocain et relation avec le climat global.	Evaluation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau des céréales pluviales en Méditerranée	Partition de l'évapotranspiration des cultures irriguées et pluviales en évaporation du sol et	Suivi des ressources en eau par une approche combinant la télédétection multi-capteur et

	: mise en multi-oeuvre sur un site expérimental		résolutions		Application à du Sud par l'impact du changement climatique sur les ressources en eau de surface	du Sud par télédétection multi-spectrale	transpiration des couverts végétaux par des techniques isotopiques et modélisation en zones semi-aride	la modélisation phénoménologique
Soutenance	13/04/2007	12/12/2014	14/06/2015	3 ^{ème} année	3 ^{ème} année	3 ^{ème} année		
Production (articles)	2007-1 ; 2008-1	2016-6 (<u>soumettre</u>)	(à 2013-9 ; 2015-5 ; 2016-3 ; 2016-4	2013-7 ; 2016-7 (<u>soumettre</u>)	2016-2	2016-5		

NIVEAU MASTER (NOM, % ENCADREMENT)

Bruno Rommens, 80%, juin 2002, « Décomposition de champs spatio-temporel en fonctions orthogonales empiriques », IUP Systèmes Intelligents, Université Paul Sabatier (UPS), Toulouse. Co-encadrement avec Eric Mougin, 4 mois.

Lise Pavard, 80%, juin 2003, "Assimilation de données satellitaires multi-capteur pour la spatialisation d'un modèle de fonctionnement régional de la végétation sahélienne", DEA "Traitement d'images", UPS et 3^{ème} année d'école d'ingénieur (Ecole Nationale d'Electronique, Electrotechnique, Informatique, Hydraulique et Télécommunications ENSEEIHT, Toulouse). Co-encadrement avec Eric Mougin, 5 mois.

Juan Cruz Gallo, 50%, juin 2003, "Evaluation des potentialités de altimètre TOPEX/POSEIDON pour l'étude des surfaces continentales. Application en région semi-aride", DEA "Astrophysique, Planétologie, Sciences et Techniques Spatiales" (UPS). Co-encadrement avec Eric Mougin, 4 mois.

Marianne Bouyssié, 100%, juin 2008, « Analyse de la variabilité de la végétation en Afrique du Nord par télédétection et lien avec le climat (1982-2006) », maîtrise IUP Statistique et Informatique Décisionnelle –STID- (UPS), 6 mois.

Sylvain Cougot, 80%, juin 2008, « Modélisation de l'irrigation dans la plaine du Yaqui, Sonora, Mexique », 3^{ème} année école ingénieur (ENSEEIHT, Toulouse), Co-encadrement avec M. A. Rivera (Instituto Tecnológico de Sonora –ITSON-, Ciudad Obregon, Mexique), 4 mois.

Eli R. Perez, 50%, juin 2008, « Suivi des couverts agricoles par télédétection optique et photographie hémisphérique dans la vallée du Yaqui (Mexique). », Graduate student ITSON, Co-encadrement avec J. Garatuza (ITSON), 4 mois.

Rajae Moujan, 80%, juin 2009, « Validation de la base de données ECOCLIMAP sur le bassin versant du Tensift », stage de 2^{ème} année de l'Ecole Hal Hassania des Travaux Publics (EHTP, Casablanca, Maroc). Co-encadrement avec Abdelaziz Ouldbba (Direction de la Météorologie Nationale, DMN, Casablanca), 3 mois.

Mathieu Alos, 50%, juin 2010, Prédiction des rendements agricoles au Maroc par machines à vecteur support. IUP STID, UPS (Toulouse). Co-encadrement Sylvain Mangiarotti et Benoit Duchemin, 6 mois.

Jalal Jaïr, 70%, juin 2011, Mise en place de la chaîne SAFRAN-ISBA-MODCOU sur le bassin versant du Tensift. Evaluation du module SAFRAN, projet de fin d'étude de l'EHTP. Co-encadrement avec Amina Saïdi (Direction de la Météorologie Nationale, DMN, Casablanca), 5 mois.

Mohamed Essaghir, 70%, juin 2012, Mise en place de la chaîne SAFRAN-ISBA-MODCOU sur le bassin versant du Tensift. Validation des flux évapotranspiratifs, projet de fin d'étude de l'EHTP. Co-encadrement avec Amina Saïdi (Direction de la Météorologie Nationale, DMN, Casablanca), 5 mois.

Alhousseine Diarra, 80%, juin 2012, Estimation de l'évapotranspiration par télédétection spatiale multi-capteurs sur un périmètre irrigué en région semi-aride (plaine du Haouz, Marrakech), Master Spécialisé «Ingénierie Ecologique & Méthodologies d'Analyse et de Gestion de la Biodiversité», Université Cadi Ayyad (UCAM, Marrakech, Maroc), co-encadrement avec Salah Er-Raki (Pr. UCAM), 5 mois.

Ahmed Marchane, 80%, juin 2012, Etude de la relation entre enneigement et climat à grande échelle sur le Haut Atlas Marocain à l'aide des images MODIS (Période 2000-2010), Master « eau et environnement », UCAM, co-encadrement avec L. Hanich (Pr. UCAM), 5 mois.

Yahia Abdoulaye Dieng, 20%, Juin 2012, Partition du bilan d'énergie à la surface d'un verger d'abricotier en

région semi-aride : mesure et modélisation, Master « Energétique et Environnement », UCAM, co-encadrement avec S. Khabba (Pr. UCAM), 4 mois.

Abdelilah El Moutamanni, 50%, juin 2014, « Assimilation sélective de données d'humidité du sol dans le modèle FAO-56 pour la prévision du besoin en eau des cultures irriguées : cas du blé dans la région de Marrakech », Master spécialisé «Energétique et Environnement», UCAM, co-encadrement avec Salah Er-Raki, 5 mois.

Bouchra Aithssaine, 50%, juin 2015, « Estimation régionale des flux turbulents à l'interface Biosphère-Atmosphère en utilisant les images satellitaires MODIS », Master spécialisé «Energétique et Environnement», UCAM, co-encadrement avec J. Ezzahar (Pr. UCAM), 5 mois.

AUTRES

ACTIVITES DE TERRAIN

1999-2000 : participation à deux campagnes de mesures de la masse herbacée aérienne sur un réseau de site localisé le long d'un transect Nord-Sud dans le Sahel Malien (2 missions de 3 semaines).

2007-2008 : coordination de la logistique, des mesures des caractéristiques de la végétation (surface foliaire, signatures spectrales) et des enquêtes pour le suivi de l'irrigation pour l'expérience « Utilisation de données spatiales pour la gestion de l'eau agricole en conditions hétérogènes » menées de septembre 2007 à juin 2008 sur un périmètre irriguée du Nord du Mexique (Ciudad Obregon, état du Sonora). Partenaires : CESBIO, ITSON (Mexique), COLPOS (Mexique). 2 missions longue durée pour un total de 7 mois.

2010-2015 : Responsable scientifique de l'observatoire Tensift (bassin versant autour de Marrakech) avec mon collègue Michel Le Page (Ingénieur IRD, responsable technique) : définition des protocoles expérimentaux et encadrement d'un assistant-ingénieur (Adnane Chakir) et d'un technicien (Mohamed Kasbani). Coordination de deux expériences : l'une ciblée sur l'estimation du besoin en eau des céréales en conditions hétérogènes (données exploitées dans le cadre de la thèse d'A. Diarra ; 2016-7 à soumettre) en 2011-2012 et l'autre dédiée à l'évaluation en conditions réelles de l'outil d'aide à la décision pour la planification de l'eau agricole SATEllite Monitoring of Irrigation ou SAMIR (2012-2013 ; 2014-5). J'ai également œuvré pour la labellisation de l'observatoire comme Service National d'Observation auprès de l'INSU sans succès mais cet observatoire est soutenu financièrement par l'IRD (~ 13keuros/an depuis 2012) et il a été labellisé « Sud » également par l'IRD en juin 2015. Il fait par ailleurs partie du réseau JECAM¹ (Joint Experiment of Crop Assessment and Monitoring)

CONTRAT DE RECHERCHE

2007-2009 : membre du projet PLEIADES, programme INCO-MED du 6^{ème} PCRD

2010-2011 : co-PI avec B. Duchemin (CESBIO) du projet « Enneigement et Climat en Méditerranée » (ECLIMED), programme EC2CO ; ~60 keuros ; Partenaires : CESBIO, Météo-France, LEGOS (15 personnes) : nous avons proposé une étude comparée de la variabilité des enneigements sur l'Atlas Marocain et le Mont Liban par télédétection spatiale.

2011-2014 : co-PI avec M. Zribi (CESBIO) du projet « Modélisation des Transferts Sol-Végétation-Atmosphère et Assimilation de Produits satellitaires multi-capteurs sur les cultures irriguées du Sud de la Méditerranée. Application à la gestion de l'eau d'irrigation » (METASIM) ; programme MISTRALS-SICMED ; ~85 keuros ; Partenaires : CESBIO, LSCE, CNRM, UCAM (Maroc), INAT (Tunisie) (27 personnes) : ce projet s'organisait en 2 axes autour (1) du développement de nouveaux produits de télédétection pour le suivi de l'humidité et des propriétés texturales des sols et (2) la caractérisation de l'évapotranspiration des cultures irriguées et pluviales.

¹ http://www.jecam.org/GEO_JECAM_Morocco_Progress_Report_2015.pdf

2013-2014 : PI du projet « Caractérisation des flux Hydriques verticaux sur les bassins versants du Sud de la Méditerranée par modélisation et Observation spatiale. Cas comparés du Merguellil (Tunisie) et du Tensift (Maroc). » (CHAMO) ; programme MISTRALS/ENVIMED ; 20 keuros ; Partenaires : CESBIO, UCAM, INAT (25 personnes), ce projet a permis de favoriser les échanges Sud-Sud entre nos collègues marocains et tunisiens.

2011-2015: Si les partenaires étrangers n'étaient pas éligibles, je me suis également beaucoup investi dans le montage et l'animation de deux projets financés par le CNRS (CNRS marocain) en support aux activités du LMI TREMA. Le premier projet « Recherche sectorielle RS 2011/09 » (2011-2014 ; PI Saïd Khabba, UCAM) a reçu 100 keuros de financement. Le 2ème intitulé SAGESSE (« Systèmes d'Aide à la décision pour la Gestion des Ressources en Eau » ; PI : Younes Fakir, UCAM) démarre cet automne avec 250 keuros de budget sur 3 ans dont 1 an de postdoc que je me suis engagé à co-encadrer.

J'ai par ailleurs été membre actif de plusieurs projets :

2002-2005 : deux projets PNTS sur le suivi de la masse herbacée sahélienne par télédétection radar et l'assimilation de données (P.I. : Eric Mougin ; partenaires : CESBIO, LEGOS)

2006-2009: projet GEOLAND, 6^{ème} PCRD: ma participation (à Météo-France puis au Centre Européen) m'a permis de renforcer mon réseau de collaboration en Europe.

2013-2016: PHC Maghreb « Estimation spatialisée de l'utilisation de l'eau par l'agriculture pluviale et irriguée au Maghreb » (P.I. Valérie Le Dantec, CESBIO), ~90 keuros: ce programme a permis de renforcer notre réseau au Maghreb avec un partenaire en Algérie et à poursuivre l'effort de coordination et d'échanges.

2012-2016 : j'ai été membre en tant qu'expert thématique de plusieurs projet (PNTS, LEFE-Assim) coordonnés par mon collègue S. Mangiarotti qui travaille sur des approches innovantes d'analyse de séries temporelles basées sur la théorie des systèmes dynamiques non-linéaires²⁰¹²⁻¹.

CO-DIRECTION D'UN LABORATOIRE MIXTE INTERNATIONAL

2010-2015 : Montage et animation du Laboratoire Mixte International –LMI- « Télédétection et Ressources en Eau en Méditerranée semi-Aride » (<http://trema.ucam.ac.ma>). Ce LMI a été construit sur 10 ans de collaboration entre le CESBIO et les acteurs de la région de Marrakech dans le cadre du programme SUDMED du laboratoire (2002-présent) et s'accompagne d'un changement d'échelle partenariale, géographique et thématique. Les principaux résultats obtenus sont synthétisés dans un article²⁰¹⁵⁻⁴ regroupant 57 co-auteurs.

Voici par ailleurs quelques points clés que je souhaiterais mettre en avant :

- TREMA regroupe une cinquantaine de scientifiques et d'ingénieurs appartenant à plusieurs institutions scientifiques au Maroc (Université Cadi Ayyad de Marrakech, Direction de la Météorologie Nationale, Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires –équivalent du CEA au Maroc-) et en France (CESBIO) et aux organismes gestionnaires de l'eau de la région de Marrakech (Agence de Bassin Hydraulique du Tensift, Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Haouz).
- Outre l'animation scientifique, j'étais également chargé du quotidien du labo à Marrakech sur les aspects administratifs (missions terrain, contrats de stage et de thèse ...) et financiers (achat de petit matériel, paiement observateurs ...).
- TREMA a été co-construit et repose sur une réelle co-direction formalisée par une gouvernance équilibrée et impliquant une mise en commun des budgets de l'ensemble des projets du laboratoire qui ont bénéficié de l'effet levier du LMI.
- Je me suis attaché à : (1) élargir le noyau des personnes impliquées d'abord au sein du CESBIO (mise à disposition d'Olivier Merlin, CR CNRS 2013-2017 et plusieurs Missions Longues) puis à l'extérieur en initiant les discussions très tôt avec nos collègues d'HSM (Yves Trambly) et du CEREGE (L. Vidal) qui ont rejoint TREMA pour le quinquennal actuel.
- **Nous avons créé le master spécialisé « Sciences de l'eau » à l'Université Cadi Ayyad** chapeauté par le LMI TREMA au sein duquel je suis co-responsable et intervenant au sein du module de télédétection.
- TREMA a atteint le niveau de maturité pour proposer des outils d'aide à la décision pour les grandes institutions en charge de la gestion de l'eau comme en témoignent les deux réalisations récentes l'outil web d'aide à décision d'irrigation SatIrr développé par mon collègue M. Le Page (<http://osr->

cesbio.ups-tlse.fr/Satirr/; voir aussi l'article sur le site de l'INSU²) et l'outil d'aide à la décision en matière de gestion intégrée des ressources en eau SAMIR-WEAP-MODFLOW²⁰¹²⁻².

- J'ai également mené plusieurs actions pour assurer **la visibilité de nos travaux** : Accompagnement du tournage d'un documentaire sur nos activités (scénarios, organisation des interventions) visibles ici : <https://youtu.be/p2ZlqBarOgk>; Référent scientifique pour le film « Le berbères des cimes » diffusé lors du dernier festival du film scientifique de Marrakech (mars 2015) ; Accueil de l'association des journalistes scientifiques de la presse d'information (AJSPI) en décembre 2013³ qui a donné lieu à un article dans le monde (principalement centré sur les travaux de mon collègue S. Mangiarotti⁴) et un article en ligne⁵.

ANIMATION ET GESTION DE LA RECHERCHE

2010-2015 : Coordination de l'expérience Yaqui (Mexique) : mesures de végétation et logistique.

2013-2017: co-responsable du Work Package principal (intitulé « présent » qui vise à analyser l'état actuel des ressources et à fournir les outils pour l'analyse des évolutions passées -WP3- et futures -WP4-) et membre du comité de direction de l'ANR TRANSMED "Assessment of changes in MEdiTerranean HYdroresources in the South: river basin Trajectories" (AMETHYST; P.I. Mehrez Zribi) dont l'objectif est d'étudier les trajectoires comparées de l'évolution des ressources hydriques sous l'effet des forçages climatiques et anthropiques sur les bassins versants du Tensift et du Merguellil. Budget ~600 keuros ; Partenaires : CESBIO, G-EAU, CNRM, LSCE, GRED, INAT, UCAM, DMN.

2016-2020 : Je suis responsable du programme SUDMED (activités au Sud) au CESBIO pour le quinquennal actuel (2016-2020). Ce programme regroupe 3 chantiers au Maroc, Tunisie et Liban et implique 5 chercheurs IRD, 2 chercheurs CNRS, 2 MdC UPS, 4 ingénieurs IRD et 1 ingénieur CNRS.

AUTRES

- Récipiendaire de la **Prime d'Encadrement Doctoral et de Recherche** (PEDR) depuis 2015.
- Membre élu au conseil de laboratoire du CESBIO (1999-2003) et **membre du comité de direction** (depuis 2016) ; Membre du conseil Scientifique du CNEREE (Marrakech) ; membre de l'International Advisory Comity for the African Association of Remote Sensing of the Environment
- **Relecteur** pour plusieurs revues dont « Remote Sensing of Environment », « IEEE transaction on Geosciences en Remote Sensing », « Global Change Biology », « Geophysical Research Letters », « Agricultural Water Management » et « Journal of Geophysical Research »
- **Examineur** des thèses de W. Bouarifi (UCAM, 19/12/2009), C. Szczypta (UPS, 24/09/2012), S. Rochdane (UCAM, 14/12/2013).
- Participation **aux comités de thèse** de C. Szczypta (UPS, 2009-2012) et A. Napoly (UPS, 2013-2016).
- **Evaluateur** de dossiers BEST (bourses d'Echanges Scientifiques et Technologiques), ARTS (Allocation de Recherche pour une thèse au Sud) et postdoc pour l'IRD ; évaluateur (très) occasionnel pour le PNTS, le National Research Council Sud-africain et pour le Belgian Remote Sensing Program.

² <http://www.insu.cnrs.fr/node/5374>

³ <http://www.ajspi.com/activites/voyages/voyage-detude-au-maroc>

⁴ http://www.lemonde.fr/sciences/article/2014/01/20/appliquer-la-theorie-du-chaos-a-l-environnement_4351231_1650684.html

⁵ <http://www.up-magazine.info/index.php/planete/climat/2858-maroc-quand-la-haute-technologie-et-l-intelligence-collective-cooperent-pour-capter-l-eau>

- **Co-organisateur** de la session « Changes in the Mediterranean hydrology : observation and modelling » à l'European Geophysical Union (EGU) depuis 2015; co-organisateur du colloque de l'association internationale des hydrogéologues (IAH 2014; 15-19 septembre, Marrakech).

INTRODUCTION GENERALE

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

La thématique de mes recherches est le suivi du fonctionnement éco-hydrologique des surfaces essentiellement en région semi-aride grâce à la télédétection spatiale multi-capteurs et multi-résolutions. Dans ce cadre général, je me suis plus spécifiquement intéressé à la dynamique multi-échelle du couvert végétal naturel et cultivé. L'importance de mieux comprendre le fonctionnement du couvert et de développer des outils pour assurer son suivi à grande échelle est liée à ses multiples rôles :

- Comme conditions aux limites de l'atmosphère, la végétation interagit avec celle-ci en modulant les échanges d'humidité, de chaleur et de quantité de mouvement. Elle influence ainsi directement les caractéristiques thermo-hydriques de la basse atmosphère et, *in fine*, le temps et le climat (Shukla & Mintz 1982; Arora 2002; 2013-3). La végétation est également un moteur majeur des échanges de carbone naturel entre la surface et l'atmosphère et joue ainsi un rôle sur l'effet de serre soit en relarguant du carbone en cas de perturbation (déforestation), soit en l'absorbant pendant la croissance. Enfin, l'évapotranspiration est, de plus, un terme clé du cycle de l'eau continental d'autant plus sur les zones semi-arides où 80% de l'eau est recyclée vers l'atmosphère (Koster et al. 2004). Le couvert végétal en modulant la partition entre évaporation du sol et transpiration joue en particulier un rôle important sur la dynamique spatio-temporelle du flux d'évapotranspiration au travers des échanges gazeux au niveau des stomates et l'extraction racinaire (Kutzbach et al. 1996; Rodriguez-Iturbe 2000). Ce terme est encore très mal connu (Jasechko et al. 2013) alors qu'une bonne caractérisation de l'évapotranspiration présente des enjeux majeurs pour la compréhension des processus du fonctionnement hydrologique des bassins versants et des enjeux sociétaux au travers de la demande agricole (Chehbouni et al. 2008) et pour l'aide au pilotage de l'irrigation (Allen, Pereira, et al. 1998).
- Comme marqueur des changements globaux, notamment sur les régions semi-arides où la production végétale est étroitement liée au régime saisonnier des précipitations. Au Sahel Ouest Africain par exemple, transition entre le désert du Sahara au nord et les savanes soudanaises au sud, la prédominance d'une période sèche dans les années 70 et 80 a profondément modifié la structure de la végétation conduisant à une diminution sensible du couvert végétal. Cela a donné lieu à des théories alarmistes sur la progression inexorable du désert (Lamprey 1975) reprises par l'ensemble des médias. Même si le débat n'est pas clos, l'analyse des indices de végétation témoignant de l'activité photosynthétique de la végétation dérivés de la série d'instruments AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) de la NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration) depuis 1981 ont permis de montrer la résilience du couvert végétal dans cette région avec un retour à des conditions de précipitations plus favorables depuis le milieu des années 1990s (Dardel et al. 2014; Nicholson, Tucker, and Ba 1998).
- Comme service écosystémique : la végétation est également au centre des activités humaines en fournissant les ressources nécessaires à la survie de nombreuses populations qui pratiquent une agriculture familiale de subsistance comme en Afrique de l'Ouest ou en Méditerranée du Sud. Sur ces régions, le fonctionnement des couverts végétaux naturels et cultivés sont directement impactés par des conditions hydriques difficiles caractérisées :(1) à

l'échelle annuelle par une période récurrente de déficit hydrique associée à une forte demande évaporative ; (2) à toutes les échelles, par une forte variabilité des précipitations et des périodes de sécheresses. La production agricole peut notamment être dramatiquement affectée par une sécheresse, même courte, si elle intervient à un stade phénologique clé de la croissance de la culture et ainsi conduire à une crise alimentaire et sociale.

Comprendre et prévoir le fonctionnement éco-hydrologique des surfaces continentales nécessite des modèles déterministes. Un modèle est une représentation mathématique des processus biophysiques régissant le fonctionnement des surfaces. On parle de modèle dynamique lorsque ce dernier simule l'évolution temporelle du système qu'il décrit. Les recherches en modélisation effectuées depuis le premier modèle de processus de surface de Manabe (1969) tendent vers une représentation exhaustive des processus complexes et interconnectés régissant le fonctionnement des surfaces Dickinson (1995). Idéalement, les processus décrits devraient découler des principes fondamentaux de la physique. En pratique, même pour les modèles mécanistes, certains processus, et c'est particulièrement vrai pour les processus physiologiques liés au fonctionnement des plantes, sont mal connus ou trop complexes, et donc paramétrés à l'aide de relations empiriques. Dans la réalité, la forte hétérogénéité des surfaces terrestres et du climat introduisent un facteur d'incertitude supplémentaire. Au final, les modèles de surface permettent de simuler les principaux processus (profil de température au sein du continuum sol-végétation, dynamique spatio-temporelle de la végétation et hydrologie dans le sol) de manière continue et spatialisée mais imparfaite.

Dans ce contexte, accéder à une vision spatialisée et dynamique des surfaces terrestres est une préoccupation qui concerne à la fois le chercheur dont l'objectif est une meilleure compréhension de son fonctionnement que le gestionnaire des ressources. La télédétection spatiale apparaît ainsi comme un complément essentiel à la modélisation imparfaite par nature et des mesures *in situ* souvent coûteuses à mettre en place, éparses et très localisées. C'est d'autant plus vrai pour les pays du Sud qui ne disposent en général pas du panel de réseaux de mesure opérationnel de leurs homologues au nord (faible densité de mesures météorologiques et hydrologiques, données bruitées et manquantes, pas de temps de mesure inadapté à la variabilité des processus ...etc...).

Enfin, les régions semi-arides déjà vulnérables doivent faire face à une demande en eau en constante augmentation pour l'ensemble des secteurs urbains, agricoles, touristiques et industriels. La gestion intégrée des ressources et des demandes en eau a notamment été identifiée comme la première priorité de la stratégie méditerranéenne pour un développement durable (Blinda and Giraud 2012). Depuis le 5^{ème} rapport du Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, il est maintenant bien établi que l'évolution climatique ne sera pas favorable (IPCC 2013). Le Sud de la Méditerranée notamment a été désigné comme un « hot spot » du changement climatiques (Giorgi and Lionello 2008) avec une tendance nette au réchauffement et dans une moindre mesure à l'assèchement. Le suivi du fonctionnement hydrologique des couverts végétaux et une meilleure compréhension des processus éco-hydrologique régissant leurs dynamiques sont donc indispensables pour anticiper et développer des mesures d'adaptation à ces changements annoncés.

Mes travaux, à la frontière entre télédétection spatiale et modélisation du fonctionnement éco-hydrologique des surfaces continentales principalement en région semi-aride ont pour double objectif :

(1) **de mieux comprendre et restituer les processus régissant le fonctionnement du couvert végétal et son rôle sur les cycles de l'eau, de l'énergie et du carbone.** Mes contributions se sont inscrites dans un ensemble d'activités de recherche: (1) le suivi des caractéristiques du couvert végétal (surface foliaire, masse aérienne) par télédétection ; (2) l'évaluation de la représentation des processus de croissance du couvert et de leur interaction avec l'hydrologie de surface dans les modèles; et (3) l'analyse diagnostique de la variabilité du couvert végétal et des déterminants climatiques qui gouvernent sa variabilité.

(2) plus récemment, **de contribuer aux développements d'outils pour le suivi et la gestion des ressources** hydriques et biotiques. Si une grande partie de mes activités est orientée vers la production de connaissance, j'ai eu la chance sur les dernières années de toucher du doigt une recherche un peu plus finalisée grâce au contact quotidien avec des gestionnaires de l'eau en contribuant au développement d'outil d'aide à gestion des ressources en eau.

2. PARCOURS

J'ai débuté mon activité scientifique en maîtrise de physique, au laboratoire d'aérodynamique, stage encadré par Bruno Benech et Bernard Campistron. L'objectif de mes travaux était d'étudier la faisabilité du suivi du développement diurne de la couche limite atmosphérique à l'aide d'un capteur au sol (radar UHF). Les sondages par ballon effectués en parallèle des acquisitions radar ont permis de mettre en évidence les potentialités de l'instrument. La couche limite atmosphérique étant en interaction étroite avec les surfaces continentales dont elles constituent les conditions aux limites, c'est cette expérience qui a éveillé ma curiosité pour cet objet d'étude alors que je me destinais plutôt à devenir physicien de l'atmosphère. J'allais me rapprocher définitivement du monde du vivant l'année suivante. Dans le cadre du stage de DEA « Sciences de la terre et environnement » encadré par Yann Kerr (Ingénieur-chercheur CNES au CESBIO), je me suis intéressé à l'activité photosynthétique de la végétation boréale par télédétection hyperfréquence passive et active (capteurs SMMR/SSM/I et diffusiomètre ERS). La durée de cette activité (pendant les quelques mois d'été) est un bon traceur des changements climatiques et ces écosystèmes sont une composante clé du cycle du carbone global.

Ma formation s'est ensuite poursuivie en thèse au CESBIO sous le co-encadrement d'Eric Mougin (CNRS) et de Pierre Mazzega (CNRS, LEGOS). S'il a fallu changer drastiquement l'orientation des capteurs vers les basses latitudes du Sahel ouest africain, j'allais renforcer ma formation en physique du signal dans le domaine hyperfréquences. Ce travail avait pour objectif de développer une méthodologie de suivi de la masse herbacée aérienne à l'aide des données radar du diffusiomètre-vent des satellites ERS. Il m'a permis de commencer à sculpter une démarche d'exploitation de la donnée satellitaire et d'avoir un premier contact avec le terrain et la mesure *in situ*. J'ai axé mes travaux sur l'analyse du signal radar (2000-1, 2002-1, 2005-4) et le développement de nouvelles approches d'inversion des caractéristiques du couvert (masse herbacée) (2002-2, 2003-1) sur le Sahel Ouest-Africain dont la spécificité était d'être basées sur des méthodes stochastiques afin de spécifier l'incertitude associée aux variables estimées.

Assez naturellement, je me suis ensuite rapproché des processus régissant le fonctionnement du couvert tels que l'évapotranspiration et les flux de carbone lors de mes postdocs à Météo-France et au Centre Européen de prévision météorologique. A Météo-France, j'ai effectué des développements

informatiques visant à rendre opérationnel le modèle de végétation (2005-6 ; 2006-9) qui simule les processus de photosynthèse, d'allocation du carbone au sein des différents organes de la plante et de croissance que nous avons évalué sur la France (2009-2) et le globe (2006-1). J'ai également développé un petit module d'irrigation pour pouvoir représenter la croissance des cultures d'été sur la France (Maïs). Plus spécifiquement, mes travaux ont contribué à questionner la représentation des processus qui en est faite dans les modèles de transfert sol-végétation-atmosphère (TSVA) et, surtout, à identifier les méthodes et les observations satellitaires pour corriger les variables d'état des modèles par assimilation de données (2005-2, 2007-1, 2008-1, 2008-2, 2008-3, 2013-16). En parallèle de ces travaux amont plutôt méthodologiques, j'ai découvert la climatologie grâce à ma rencontre avec Yves Turre (océanographe à Météo-France et à la Columbia University) quand où peu d'études climatologiques exploitaient encore le potentiel des informations satellitaires pour l'analyse de la variabilité des surfaces continentales. J'ai ainsi développé un autre volet plus aval de mes activités axé sur l'analyse diagnostique de la variabilité du couvert végétal (2005-1, 2005-3, 2006-3, 2007-2, 2008-5, 2014-4) à grande échelle sur la base des longues séries d'observations satellitaires dans le double objectif d'identifier les déterminants climatiques qui gouvernent cette variabilité et notamment les grandes pseudo-oscillations climatiques (NAO, ENSO ...) et de proposer, quand c'est pertinent, des systèmes d'alerte précoce ou de prévision saisonnière de l'activité photosynthétique du couvert (2014-4) et des rendements en grain (2014-3).

Les enjeux évoqués en introduction sont à la fois scientifiques, sociétaux et de développement. Ils sont au centre des activités du CESBIO (Chehbouni et al. 2008; 2015-4) où j'ai été recruté en décembre 2006. Si la télédétection occupait toujours une place centrale dans mon projet de recherche, mon recrutement à l'IRD a constitué une rupture à 2 niveaux : (1) la confrontation concrète avec l'anthropisation des surfaces que j'avais quasiment toujours considérées comme naturelles durant mes précédents travaux ; j'ai depuis développé mes activités autour du fonctionnement hydrologique des bassins versants semi-arides où l'agriculture joue un rôle majeur ; (2) le travail en partenariat avec des gestionnaires qui m'a permis d'appréhender les préoccupations et les attentes des opérateurs. Dans ce contexte, le montage du Laboratoire Mixte International Télédétection et Ressources en Eau en Méditerranée semi-Aride (TREMA⁶) que j'ai co-dirigé de 2011 à 2015 m'a donné l'opportunité d'appliquer les méthodes décrites ci-dessus dans un objectif général un peu plus finalisé d'aide à la gestion intégrée des ressources en eau des bassins versants du Sud de la Méditerranée. Dans ce cadre, mes travaux récents portent sur le suivi du manteau neigeux qui contribue significativement aux apports d'eau de surface pour les plaines en aval (2010-1, 2015-3, 2015-5, 2016-2, 2016-3) et sur le suivi du besoin en eau des cultures irriguées de plaine (2010-2, 2010-3, 2013-7, 2014-1, 2014-2) comme principal consommateur en eau avec pour finalité l'aide à la planification de l'eau d'irrigation (2013-1, 2013-2, 2014-1, 2014-5).

3. DEMARCHE ET OUTILS

La télédétection spatiale des surfaces continentales a connu un essor considérable ces dernières années avec le lancement de capteurs dédiés à l'observation de ces cibles complexes. En particulier,

⁶ Pour plus d'information : se référer au site web (<http://trema.ucam.ac.ma>), à un film documentaire sur nos activités (<https://youtu.be/p2ZlqBarOgk>) et à l'article 2015-4 qui résume les principaux résultats obtenus.

la constellation copernicus constitue une vraie révolution en combinant un temps de revisite court avec une résolution spatiale fine, compatible avec l'échelle de la parcelle agricole. Néanmoins, l'exploitation de ces données dans des contextes applicatifs fait toujours face à certaines limitations :

- (1) *l'information recueillie par les capteurs spatiaux est une grandeur électromagnétique qu'il convient de rendre utile au thématicien* ; Les caractéristiques biophysiques des surfaces continentales affectent directement la signature spectrale des surfaces dans différents domaines de longueur d'onde. C'est cette sensibilité du signal mesuré par un satellite qui rend possible l'estimation de certaines caractéristiques biophysiques de surface comme la surface foliaire, l'humidité du sol ou la couverture neigeuse à partir de la grandeur électromagnétique mesurée par les capteurs spatiaux. Néanmoins, le lien entre cette dernière (réflectance, température de brillance, coefficient de rétrodiffusion ...) et la variable utile au thématicien n'est pas direct.
- (2) *plusieurs informations au centre du fonctionnement hydrologique des surfaces ne sont pas observables par télédétection.* ; En effet, la télédétection ne fournit qu'une vision superficielle des surfaces terrestres. La première limitation est due à la physique de l'interaction de l'onde électromagnétique avec la surface qui limite sa profondeur de pénétration : les produits d'humidité du sol dérivés des observations hyperfréquences ne concernent que l'horizon superficiel. Certaines variables clés du cycle hydrologique de surface comme les échanges turbulents entre la surface et l'atmosphère tel que le flux évapotranspiratif ne sont tout simplement pas observables. Enfin, les images de télédétection ne fournissent qu'un instantané au passage du satellite. Certaines variables sont donc observables mais avec un échantillonnage spatio-temporel insuffisant pour caractériser la dynamique de processus de surface rapides : par exemple, disposer d'une information mensuelle sur la température de surface est largement insuffisant pour reconstituer la dynamique multi-échelle du bilan d'énergie de surface.
- (3) *Il existe un déficit de connaissances principalement du à des formations inadaptées* qui limite l'utilisation de ces observations encore considérées comme non conventionnelles pour l'aide à la décision dans le domaine de la gestion des ressources. Pourtant, leur intérêt est indéniable dans des contextes appliqués à la gestion.

Ma démarche générale (Figure 1) repose sur la combinaison originale de mesures *in situ* (micrométéorologie à l'échelle stationnelle) et de télédétection multi-fréquences et multi-résolutions pour calibrer, corriger par assimilation de données et adapter aux spécificités des couverts les outils de modélisation multi-échelles du fonctionnement éco-hydrologique des surfaces. Les modèles sont de type 1D simulant les échanges verticaux d'eau, d'énergie et/ou de carbone entre la surface, la végétation et l'atmosphère. Ils sont à bases mécanistes (modèles TSVA développés initialement pour la représentation des conditions aux limites basses de l'atmosphère dans les modèles de prévision du temps et du climat) ou plus empiriques, et donc plus parcimonieux, de type bilan d'énergie ou FAO-56 (Allen et al. 1998) dans des contextes applicatifs. Les données de télédétection utilisées ont pour dénominateur commun un temps de revisite assez court de l'ordre de quelques jours afin de pouvoir suivre les processus de surface rapides comme la dynamique de l'eau dans le sol qui régissent le fonctionnement des surfaces en régions semi-arides. Contraint par le compromis historique résolution spatiale-résolution temporelle, mes travaux se sont longtemps basés sur les données des

capteurs moyen et grand-champ (AVHRR, MODIS, diffusiomètre-vent avec des résolutions spatiales ≥ 1 km). Ils évoluent, sur les dernières années, grâce aux nouvelles données associant temps de revisite court et haute résolution temporelle (capteur FORMOSAT-2, expériences Take5 du CNES et bientôt Sentinel-1 et -2). Si l'observation satellitaire est mon outil d'observation privilégié, la mesure *in situ* (de l'échelle de la station de mesure jusqu'à un ensemble de parcelle) occupe une place centrale dans mes activités pour valider et calibrer la modélisation et les produits de télédétection.

Le premier volet de mes activités est plutôt méthodologique autour de l'extraction d'information des données de télédétection et couvre deux axes :

- L'inversion du signal satellitaire sans aucun recours à un modèle dynamique de surface ; il s'agit ici d'estimer les variables biophysiques utiles aux thématiciens par l'inversion d'un modèle simulant les interactions du signal électromagnétique avec les constituants de la surface (modèles d'observation de type transfert radiatif).
- La plupart des modèles de surface que j'ai manipulés ont été développés et validés au Nord et ne sont pas nécessairement adaptés aux spécificités des régions du Sud notamment en termes de réponse du couvert végétal au climat. Ils nécessitent donc d'être adaptés et/ou corrigés. C'est notamment l'objectif de l'assimilation de données dans les modèles qui consiste à contraindre leur trajectoire sur la base d'une « réalité » observée. Le double avantage de l'assimilation sur l'inversion est : (1) d'avoir accès à des variables qui ne sont pas directement observables comme le flux évapotranspiratif ; (2) d'avoir des prédictions continues dans le temps et dans l'espace et non plus uniquement instantanées au temps de passage du satellite. Je me suis notamment intéressé à l'utilisation conjointe des observations spatiales acquises dans les trois grands domaines de longueur d'onde.

Le deuxième volet de mes activités que j'ai principalement développé depuis mon recrutement à l'IRD est dédié à des travaux plus thématiques et pour certains, plus finalisés. Dans cette partie, la télédétection occupe toujours une place centrale mais je me place davantage en tant qu'utilisateur de données ou de produits existants afin :

- de réaliser des études diagnostiques sur l'évolution historique du couvert végétal pour mieux comprendre les facteurs qui gouvernent leur variabilité.
- de développer des outils pronostiques à différentes échéances temporelles en fonction de la finalité : de quelques jours à la saison pour l'aide à la décision dans le domaine agricole jusqu'à quelques décennies pour les outils d'aide à l'aménagement des bassins versants.

Ce deuxième volet se différencie également du premier car il est basé sur la donnée disponible (principalement les longues séries temporelles d'observation satellitaire). Enfin, cette ré-orientation de mes travaux résulte à la fois d'une volonté personnelle et d'une attente forte de nos partenaires au Sud dans ce domaine. En effet, m'étant focalisé dans la première partie de mon parcours sur des questions plutôt méthodologiques, j'ai attaché beaucoup d'importance à contribuer à répondre à des questions plus thématiques par la suite. Par ailleurs, la mise à disposition récente de nombreux produits opérationnels en quasi temps réel tels que les produits MODIS rend certains développements méthodologiques moins pertinents.

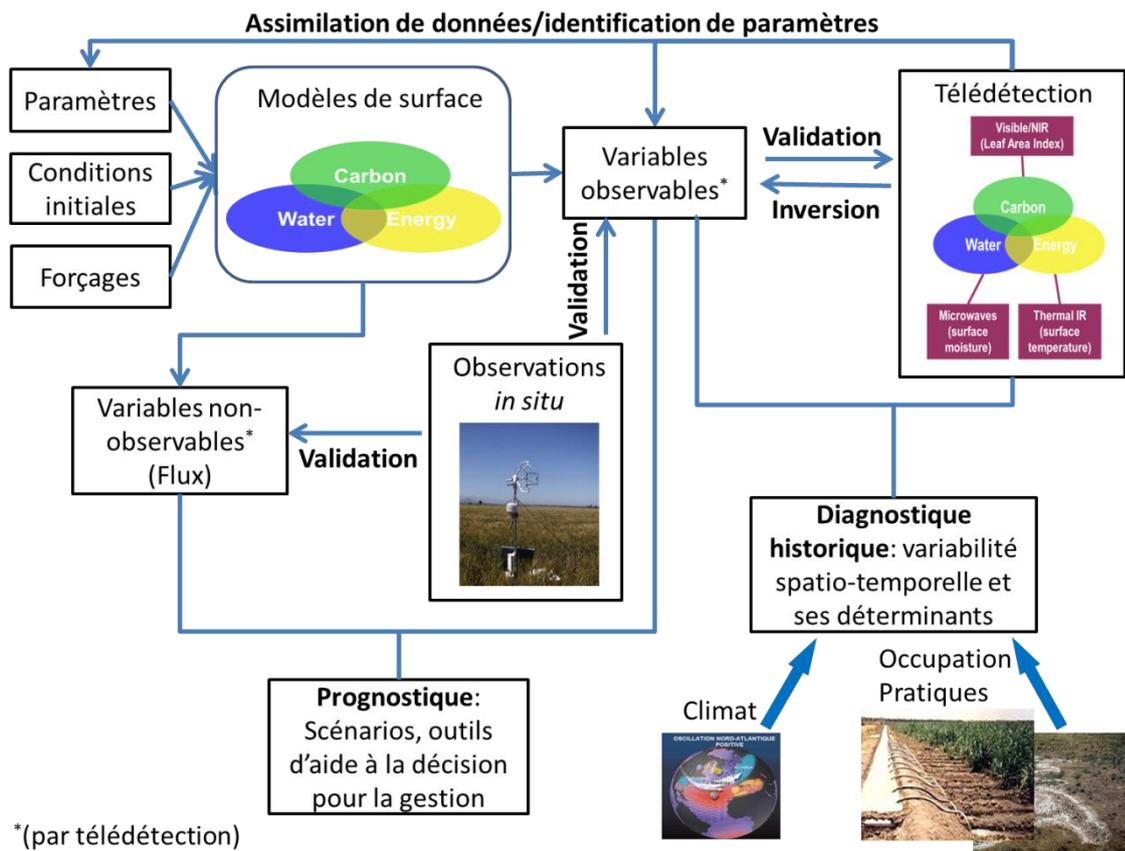


Figure 1 : Démarche générale

RAPPORT SUR LES ACTIVITES SCIENTIFIQUES

1. INVERSION ET ASSIMILATION DE DONNEES SATELLITAIRES

1.1. DEMARCHE

La démarche pour l'exploitation de l'observation satellitaire pour le suivi des surfaces peut être résumée par la Figure 2 ci-dessous. Le mode direct consiste à reproduire le signal satellitaire mesuré afin d'identifier les composantes de la surface qui contribuent au signal observé et de quantifier leurs contributions respectives. Par opposition, le mode inverse a pour objectif de restituer une ou plusieurs variables de surface d'intérêt. Deux approches peuvent être distinguées :

- l'inversion du signal satellitaire sans aucun recours à un modèle dynamique de surface ; il s'agit ici d'estimer les variables biophysiques à partir des seules observations satellitaires.
- l'assimilation de données dans le modèle qui consiste à contraindre la trajectoire de ce dernier par correction de ses variables pronostiques ou par identification des paramètres qui régissent sa dynamique.

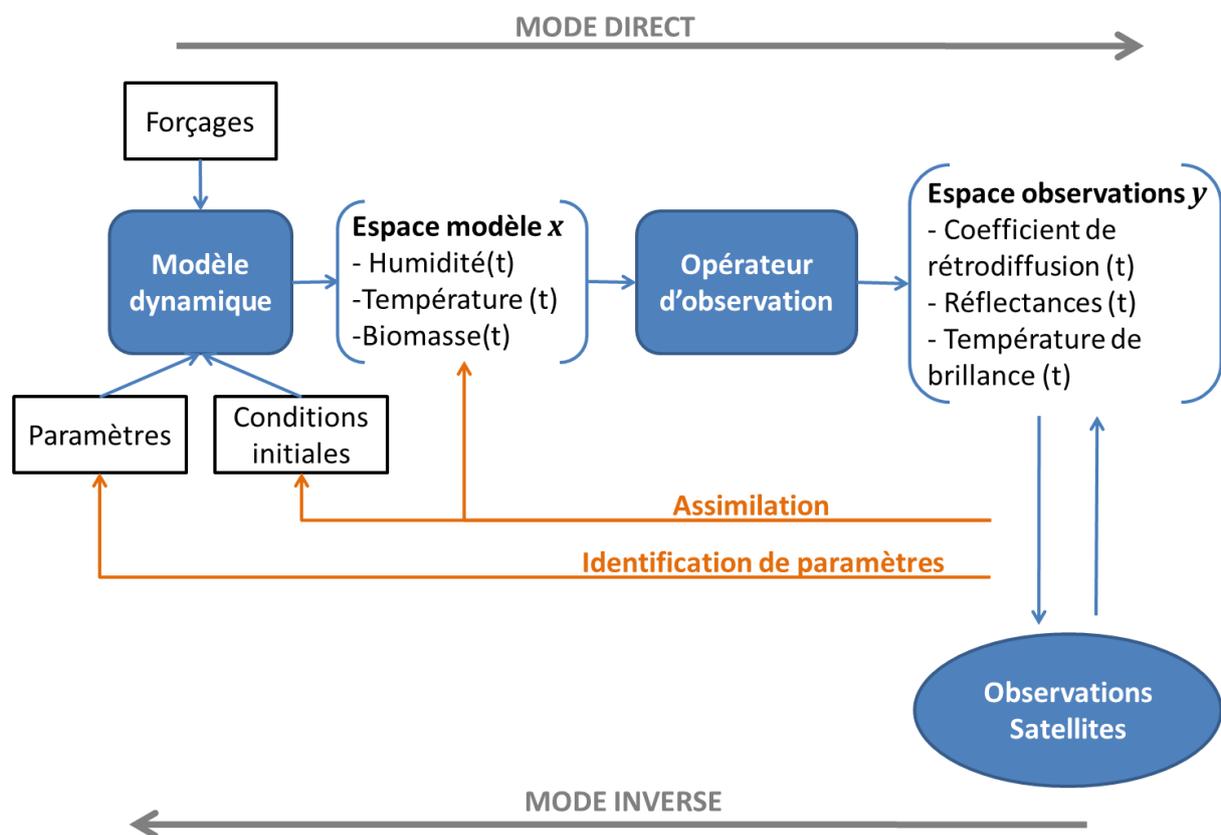


Figure 2 : méthodologie d'exploitation des observations satellitaires pour le suivi des surfaces continentales (d'après Jarlan and Boulet, 2014).

Que ce soit par l'inversion de modèles de transfert radiatif ou par assimilation de données dans les modèles, j'ai beaucoup ajusté des observations à des prédictions de modèles sur la base de méthodes de filtrage ou d'optimisation. Il s'agit d'une démarche assez classique où nous cherchons, dans un premier temps, à représenter la dynamique des processus étudiés sous formes d'équations moyennant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Ces modèles sont dits « de

connaissance ». Ce processus de construction de modèle, hérité de la mécanique newtonienne, consiste à mettre en équation l'ensemble des processus régissant le fonctionnement des surfaces. Ce fonctionnement étant complexe et mal connu, notamment pour les processus écophysologiques, une partie de ces équations reposent sur de nombreux paramètres empiriques. Ces équations sont optimisées ensuite (recherche de conditions initiales ou de la valeur de certains paramètres) afin de trouver la représentation qui s'ajuste au plus près des observations disponibles. La valeur des paramètres et/ou variables minimisant une certaine mesure de la distance prédictions-observations, appelée fonction coût ou fonction objectif, est généralement acceptée comme la « meilleure » solution et par voie de conséquence, le problème inverse est considéré comme résolu. La réalité est plus complexe. La sur-paramétrisation des modèles et la non-linéarité de leurs équations combinées à un nombre d'observations limité entraînent :

- des solutions au problème inverse qui ne sont pas univoque : si dans le cas idéal d'un modèle linéaire, la fonction coût basée sur une norme L2 (moindres carrés) ne présente pas d'inflexion et a donc une seule solution unique, la solution optimale, ce n'est plus vrai dans le cas non-linéaire où l'espace de recherche n'est plus convexe. Cela peut avoir 2 conséquences : (1) la présence de minimum locaux autour desquels les méthodes encore classiquement utilisées (descente de gradient, simplex) dans notre domaine peuvent être piégées et (2) la multiplicité des solutions en cas de deux bassins d'attraction disjoints. D'un strict point de vue mathématique, il est possible de contourner ces limites par le choix d'une méthode d'optimisation adaptée tel que les méthodes globales qui par opposition aux méthodes locales échantillonnent l'espace des paramètres dans son ensemble. Cela est discuté plus bas dans la partie « notions d'optimisation mathématique ».
- une probable « équifinalité » : on ne peut pas en vouloir aux modélisateurs qui nous offrent des modèles élégants à la représentation toujours plus fine des processus, et par la même de nombreux degrés de liberté pour ajuster nos prédictions aux quelques observations disponibles. Néanmoins, leur application à grande échelle est limitée par la disponibilité en données qui ne permettent pas de renseigner ou de calibrer les nombreux processus qui sont représentés. En hydrologie par exemple, de bonnes performances sur les débits ne garantissent pas que les processus intermédiaires tels que ruissèlement, infiltration et évapotranspiration soient correctement reproduits. De même, bien reproduire l'évapotranspiration n'entraîne pas nécessairement que la partition évaporation/transpiration soit bien représentée. La solution, plus difficile à mettre en œuvre que pour le point précédent est ici de mettre en place des dispositifs observationnels afin de valider directement ou non ces processus intermédiaires. C'est la stratégie que nous avons adopté dans le cadre du LMI TREMA (cf. stratégie de modélisation plus bas). Quelques exemples de problèmes inverses mal contraints sont, de plus, analysés dans la partie 1.4.
- certains paramètres ne sont tout simplement pas observables : Il est très tentant d'optimiser l'ensemble des paramètres, souvent nombreux, d'un modèle de surface. Néanmoins, compte tenu du faible nombre d'observations, certains ne seront tout simplement pas observables. En d'autres termes, leur valeur n'aura aucun impact sur la fonction coût. Heureusement, une simple analyse de sensibilité permet de les identifier et donc de les éliminer du problème inverse à résoudre. Le choix du modèle est ici crucial et la contrainte sur les données

disponibles doit être un critère prioritaire pour orienter ce choix (voir également « stratégie de modélisation » plus bas).

L'inversion de données en télédétection a quasiment vu le jour avec le lancement des premiers satellites. Pourtant, nombreuses sont les études qui font encore abstraction des limitations évoquées très brièvement ci-dessous. Le manuscrit d'habilitation de Pierre Mazzega est, de mon point de vue, une référence, pour qui souhaite approfondir ces questions liées à la « relation difficile modèles-données » (Mazzega 2002). Mon apport principal dans ce domaine est une démarche d'analyse et de résolution des problèmes inverses basée sur des méthodes d'optimisation et de filtrage stochastiques et globales afin (1) de contourner les conséquences d'éventuelles non-linéarités et (2) d'estimer les incertitudes sur les variables/paramètres inversés.

1.2. OUTILS ET NOTATION

LES DONNEES IN SITU

L'utilisation d'observations qu'elles soient satellitaires ou *in situ* a constitué le dénominateur commun à l'ensemble de mes recherches. Les données recueillies sur le terrain sont essentielles car, bien que manquant de représentativité dans le temps et dans l'espace par rapport aux sorties de modèles ou aux produits satellites, elles représentent la « vérité » terrain. Elles sont donc indispensables à toutes les étapes de mes travaux de recherche : la paramétrisation des modèles de surface ou d'observation satellite, leur calibration et finalement leur validation.



Figure 3 : (a) mesure de la masse aérienne herbacée dans le Sahel Malien ; (b) Station micro-météorologique (Observatoire Tensift, Maroc) ; (c) Station météorologique (Observatoire Tensift, Maroc) ; (d) Mesures des signatures spectrales d'un couvert de blé (Observatoire Tensift, Maroc) ; (e) Mesure de la hauteur et de la densité de neige (Observatoire Tensift, Maroc) ; (f) Mesures du rendements en grain (Observatoire Tensift, Maroc) .

Les dispositifs expérimentaux mis en place sont constitués de mesures automatiques ou d'échantillonnage manuel. Les stations automatiques mesurent les profils verticaux d'humidité (sonde résistive et capacitive) et de température dans le sol, les flux convectifs par eddy covariance, le flux conductif, les composantes du rayonnement net et, dans le cas surfaces enneigées, la hauteur de neige. Les échantillonnages manuels concernent les caractéristiques de la végétation (hauteur, masse aérienne pour les annuelles, taux de recouvrement et surface foliaire par photo hémisphériques), l'occupation du sol, les apports d'eau d'irrigation, les hauteurs et densité de neige par carottage. A titre illustratif, la Figure 3 regroupe quelques exemples de mesures.

J'ai par ailleurs coordonné les activités de l'observatoire TENSIFT depuis 2010. Cet observatoire a reçu la labellisation « Sud » de l'IRD en 2014. Cette labellisation, très attendue par nos partenaires gestionnaires, a été l'aboutissement d'un long processus puisque la première demande de labellisation (à l'INSU) date de 2010. La Figure 4 montre le dispositif expérimental de l'observatoire que nous avons structuré en trois échelles spatiales du super-site (échelle de la station) à l'ensemble du bassin versant. A cet ensemble de mesures réalisés en routine, se greffent des expériences plus courtes visant à répondre à des questions scientifiques ciblées notamment dans l'objectif de quantifier certains processus intermédiaires mal connus (recharge le long des oueds, infiltration en montagne, partition évaporation/transpiration ...) dans les modèles (cf. « Stratégie de modélisation »). Enfin, ce dispositif *in situ* est doublé d'acquisitions d'imagerie satellitaire qu'elles soient programmées pour la haute résolution ou en routine pour la moyenne et la basse résolution spatiale.

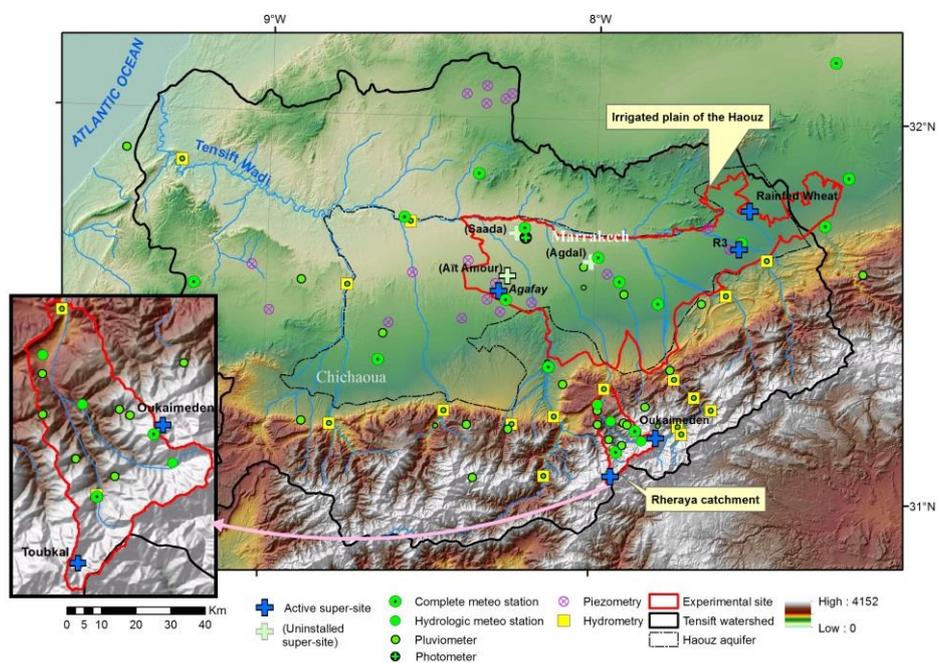


Figure 4 : Dispositif expérimental de l'observatoire TENSIFT.

En conclusion, les mesures *in situ* sont une source d'information inestimable pour tous travaux de modélisation. Je souhaiterais donc insister sur l'importance de ce travail de terrain qui est souvent chronophage et un peu ingrat car pas toujours facile à valoriser. Pourtant, les chercheurs et

ingénieurs impliqués dans la mesure de terrain sont les mieux placés pour critiquer la donnée et ainsi en permettre une exploitation pertinente en particulier pour les travaux de modélisation.

LES OBSERVATIONS SPATIALES

La télédétection occupe une place centrale dans mes activités de recherche. Les caractéristiques biophysiques des surfaces continentales affectent directement la signature spectrale des surfaces dans différents domaines de longueur d'onde. Dans le domaine visible et proche infra-rouge, le capteur mesure l'énergie solaire réfléchi par la surface terrestre sur un domaine restreint de longueur d'onde dans la direction du capteur. Cette mesure, normalisée par l'énergie solaire incidente, est appelée réflectance. Dans le cas des surfaces couvertes de végétation, les pigments chlorophylliens absorbent fortement dans le rouge alors que la structure interne de la feuille réfléchit fortement dans le proche infra-rouge. Ce comportement contrasté a conduit à au développement de l'indice normalisé de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) qui peut être directement relié à la densité de végétation (biomasse aérienne ou surface foliaire). Dans le domaine de l'infra-rouge thermique (IRT), les capteurs sont des radiomètres mesurant une température de brillance qui est directement reliée à la température de la surface par la loi de Stefan-Boltzmann faisant intervenir l'émissivité. Ce domaine apparaît particulièrement adapté pour suivre le stress hydrique de la plante (lors d'un stress hydrique, la température de la plante augmente). Enfin, La télédétection micro-ondes active et passive est sensible aux propriétés diélectriques, principalement gouvernées par le contenu en eau de la cible (l'humidité des premiers centimètres du sol et végétation) et à ses propriétés structurales (rugosité du sol, densité et géométrie du couvert végétal).

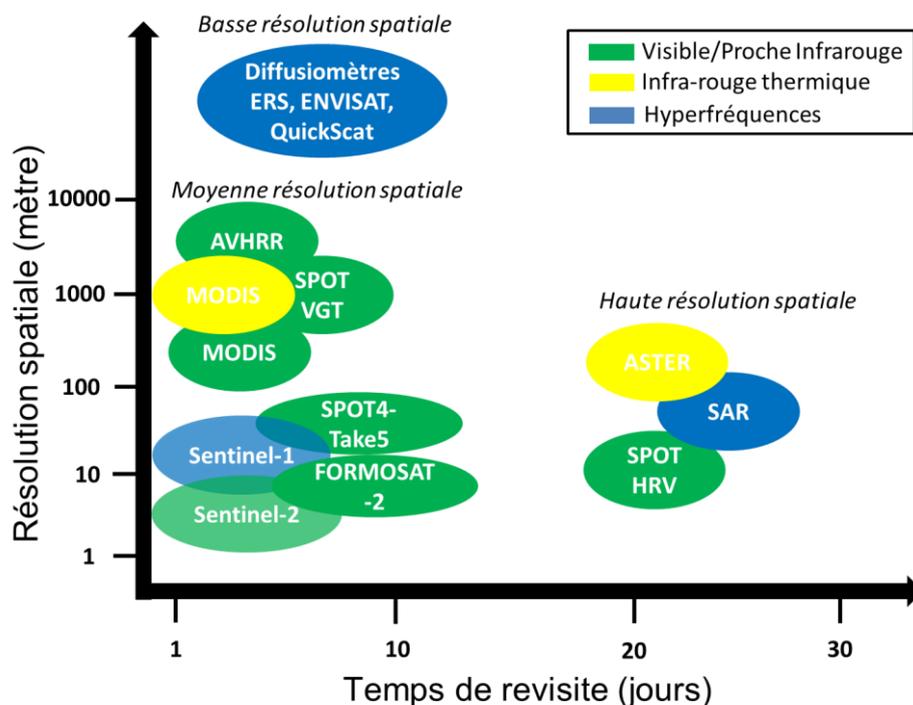


Figure 5 : Temps de revisite et résolution spatiale approximatifs des capteurs utilisés dans mes travaux passés ainsi que le domaine de longueur d'onde dans lequel ils opèrent.

La Figure 5 résume schématiquement les capteurs utilisés dans le cadre de mes travaux. Une grande partie de mes activités de recherche ont été menées à grande échelle : du bassin versant à la région. Par ailleurs, je m'intéresse au suivi de processus de surface rapides pour lesquels le temps de revisite est important. J'ai donc beaucoup travaillé avec les observations à moyenne et basse résolution (> 500 m) qui, jusqu'à récemment, étaient les seules à offrir un temps de revisite adapté au suivi des processus de surface à la dynamique rapide, particulièrement en région semi-aride, comme la dynamique de l'eau dans le sol. Parmi ces données, j'ai particulièrement exploité les données les données diffusiomètre-vent des satellites ERS (hyperfréquence actif) tel que QUICKSCAT et ENVISAT, les données des capteurs AVHRR et MODIS (Visible/Proche infrarouge). Ces données sont décrites brièvement ci-dessous. J'ai commencé plus récemment à m'intéresser aux données à haute résolution spatiale en particulier dans le cadre de l'expérience SPOT4-Take5 (Hagolle et al. 2013) du CNES qui visait, par un désorbitage de SPOT4 en fin de vie, à acquérir des données avec une répétitivité similaire à Sentinel-2. Le lancement des satellites sentinel constitue une vraie révolution puisqu'ils vont permettre d'offrir un temps de revisite similaire aux capteurs à basse résolution.

DONNEES DIFFUSIOMETRE-VENT (RADAR)

Bien que les premières séries de données n'aient été disponibles pour des applications civiles qu'avec le lancement du satellite ERS en 1991, les données diffusiométriques ont fait l'objet d'un intérêt croissant de la part de la communauté scientifique depuis cette date comme en témoigne la diversité des applications. Les diffusiomètres sont des capteurs radar à visée latérale, conçus pour estimer avec une grande précision le coefficient de rétrodiffusion radar σ^0 des surfaces observées. Cette grande résolution radiométrique est obtenue au détriment de la résolution spatiale (>10 km). Initialement destinés à l'estimation de la vitesse et de la direction des vents sur les surfaces océaniques, des travaux ont montré très tôt le potentiel de ces capteurs pour le suivi des surfaces continentales à l'échelle régionale ou globale (Frison and Mougin 1996; Kennett and Li 1989; E Mougin et al. 1995; Wagner et al. 1999; Wismann 2000). Le fort potentiel des données des diffusiomètres réside principalement dans leur haute fréquence temporelle d'acquisition (quasi journalière pour les diffusiomètres actuels), particulièrement bien adaptée pour relier les variations de signal aux variations saisonnières des paramètres biophysiques de surface. C'est en particulier la sensibilité de ces données aux variations des propriétés diélectriques et géométriques des surfaces continentales qui les rend très complémentaires des données acquises dans les domaines du Vis/PIR utilisées depuis le début des années 1970. En effet, les variations de permittivité diélectrique sont directement liées aux variations du contenu en eau ouvrant la voie au suivi du contenu en eau de la végétation et donc à la détection du stress hydrique et des sécheresses depuis l'espace et à l'estimation directe de l'humidité superficielle du sol. La continuité des programmes mis en place par les agences spatiales assurent des observations globales continues depuis 1991 en bande C et 1996 en bande Ku. Ces longues séries temporelles représentent des jeux de données de grande valeur pour l'analyse de l'évolution à moyen et long terme des surfaces continentales. Pour plus de détails sur le principe de la mesure diffusiométrique, les différents capteurs et les applications de ces données à l'observation des surfaces continentales, se référer à 2016-8.

DONNEES AVHRR

Les capteurs Advanced Very High Resolution Radiometer ou AVHRR (Hastings and William 1992) à bord des satellites de la NOAA opèrent dans le visible, le proche infra-rouge et l'infra-rouge thermique avec 4 ou 5 bandes selon les capteurs et acquièrent des données depuis juin 1979 (NOAA-6). Si ces données étaient initialement destinées au suivi de l'atmosphère, des potentialités pour le suivi du couvert végétal ont rapidement été mises en évidence notamment sur les zones semi-arides africaines (Henricksen and Durkin 1986; Justice and Hiernaux 1986; Nicholson, Davenport, and Malo 1990; Prince 1991); potentialités qui ont été exploitées par la suite pour le développement de systèmes d'alerte précoce à la sécheresse (Brown and de Beurs 2008) ou pour étudier les tendances de la production des prairies sahéliennes (Anyamba and Tucker 2005; Prince et al. 2007; Prince, Brown De Colstoun, and Kravitz 1998). Ces données bien qu'acquises à 1.1 km de résolution ne sont disponibles librement qu'à une résolution plus faible. En effet, pour des raisons de capacité de stockage, la résolution initiale était dégradée à 4 km de résolution par ré-échantillonnage en vol. Néanmoins, la mise à disposition de longues séries temporelles homogènes pour ces données issues de capteurs à bord de différents satellites est une tâche ardue car la réponse des capteurs, qui peut se dégrader avec les années, les conditions d'illumination qui peuvent changer en cas de dérive d'orbite et la qualité des corrections atmosphériques doivent être bien maîtrisées. On se souvient notamment de la controverse de la fin des années 2000 née de la publication de Ranga Myneni démontrant l'allongement de la saison de croissance sur les zones boréales en lien avec le réchauffement climatique (Myneni et al. 1997). Gary Gutman avait démontré quelques années plus tard que les tendances observées pourraient tout aussi bien être dues à des changements de conditions d'illumination et de réponse des capteurs mal corrigées (Gutman 1999). Depuis, un travail de retraitement de ces données a été mené dans le cadre du projet Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) de la NASA. Le jeu de données GIMMS (Tucker et al. 2005) agrégées à 8 km de résolution est disponible depuis 1981 à nos jours et librement accessible sur internet.

LES MODELES DYNAMIQUES DES SURFACES

PRINCIPES GENERAUX

La surface terrestre représente un système dynamique⁷. La représentation mathématique qui en est faite est un modèle dynamique déterministe⁸ qui décrit au cours du temps l'évolution de l'état du système. Il est constitué d'équations algébriques ou aux dérivés partielles qui permettent de connaître l'état unique du système dans le futur à partir de conditions initiales fixées. Ces modèles sont pour la plupart markovien dans le sens où l'état à tout instant est décrit intégralement à partir de l'état au pas de temps précédent et de variables externes dites de forçage. Dans le cas des modèles de surface, le système d'équation repose sur une équation de bilan : d'énergie, d'eau et/ou de carbone. En pratique, la résolution de ce système d'équations, souvent non-linéaire et potentiellement chaotique, repose sur une discrétisation dans le temps et une intégration

⁷ qui évolue au cours du temps

⁸ Un système déterministe fait correspondre à une condition actuelle donnée, un et un seul état futur

numérique avec un pas de temps bien inférieur à la dimension temporelle typique du processus représenté (afin d'éviter les divergences dues aux non-linéarités).

L'équation principale du modèle dynamique pour les trois bilans (énergie, eau, carbone) régissant le fonctionnement des surfaces peut s'écrire sous la forme simple d'une équation générique aux dérivées partielles de ce type:

$$\text{capacité}(\mathbf{z}) \frac{\partial \mathbf{z}}{\partial t} = \text{sources}(\mathbf{z}) - \text{puits}(\mathbf{z}) \quad (1.1)$$

Où \mathbf{z} est un scalaire ou un vecteur de scalaires représentant la ou les variables pronostiques du modèle. Ces variables sont simulées par le modèle à partir d'un état initial. Ce sont notamment ces variables pronostiques qui sont ajustées par **assimilation de données** (i.e. analysées). Concrètement l'état des surfaces terrestres naturelles à un instant donné pour le modèle sera donc constitué d'un vecteur de variables pronostiques décrivant, par exemple, l'humidité et la température du sol à différentes profondeurs, la surface foliaire de la végétation ... Les variables diagnostiques sont les variables dérivées des variables pronostiques. Ces variables sont simulées par le modèle mais aucune condition initiale n'est nécessaire. Le flux de chaleur sensible par exemple est une variable diagnostique calculée à partir de la température qui, elle est une variable pronostique. Enfin, l'état des surfaces dans un modèle va dépendre d'un nombre de paramètres ou pseudo-constantes également incertains. La Figure 6 représente de manière (très) simplifiée les trois bilans principaux résolus par les modèles de surface ainsi que les termes sources et puits et les scalaires associés. Ainsi, pour le bilan d'énergie, par exemple, la capacité est la capacité thermique, \mathbf{z} contient la température de surface ou un profil de température dans le sol discrétisé à différentes profondeurs, la source est le rayonnement net qui dépend de la température de surface du sol, et les termes de puits rassemblent tous les autres termes du bilan (flux de chaleur latente et de chaleur sensible, conduction dans le sol...).

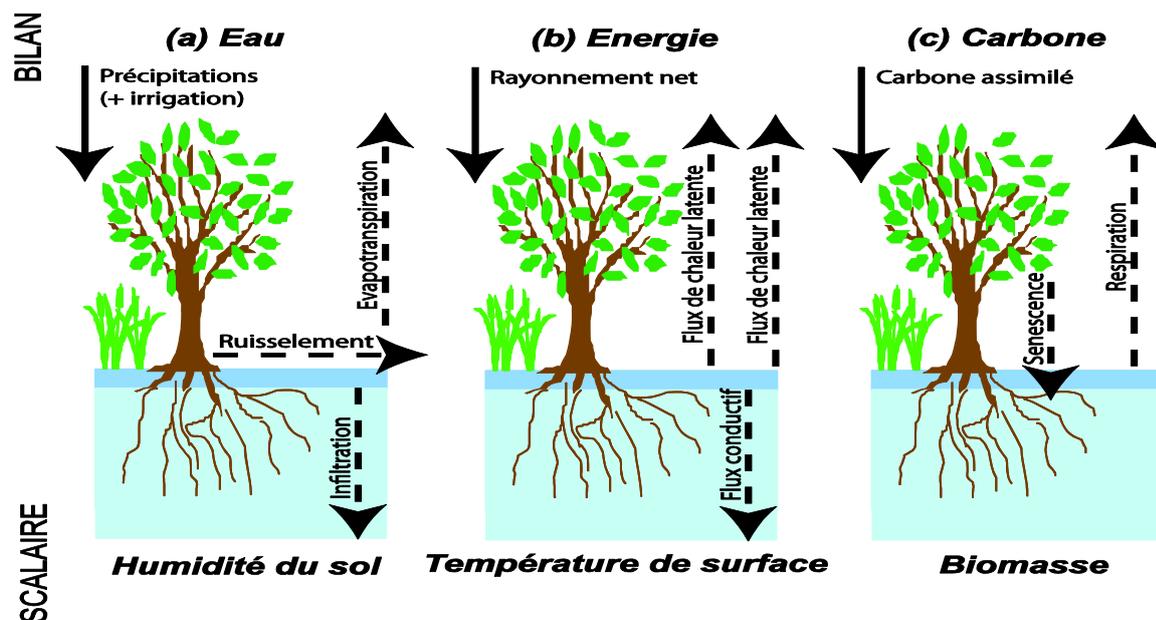


Figure 6 : Bilan d'Eau (a), d'Énergie (b) et de Carbone (c) ; les termes puits (traits pointillés) et sources (traits pleins) intervenant dans l'équation de bilan 1.1 ainsi que les scalaires considérés (d'après Bonan, 2008).

Ce qui différencie les modèles entre eux sont les représentations mathématiques des différents termes de sources ou de puits de l'équation 1.1 (infiltration, flux G, ruissellement ...etc...). Les paramètres p intervenants dans ces représentations sont considérés constants pour les échelles de temps caractéristiques du modèle (on parle de pseudo-constantes). Ces paramètres sont soit mesurés directement sur le terrain et spatialisés à l'aide d'un support cartographique (carte de texture, modèle numérique de terrain...) soit déduits indirectement par calibration sur des mesures de terrain (longueur de rugosité dynamique). Certains paramètres comme l'albédo⁹ peuvent être facilement mesurés à l'échelle locale et à grande échelle grâce à la télédétection et la relation entre les échelles est linéaire. Pour d'autres, la mesure est plus complexe voire impossible même à l'échelle locale (résistance aérodynamique, conductance stomatique) et la relation multi-échelles est non-linéaire. Il est très difficile de connaître des valeurs représentatives sur une région de plusieurs milliers de km². Leurs valeurs sont donc calibrées sur des observations qui présentent une sensibilité à ces pseudoconstantes. Ces approches de calibration sont regroupées sous le terme **identification de paramètres**.

Enfin, les variables de forçage u sont les variables imposées au modèle. Dans le cas des modèles de surface, le rayonnement global, la température de l'air ou les précipitations sont des variables de forçages. Pour le bilan d'eau, le terme source (Figure 6), est directement une variable imposée au modèle. Ce n'est pas directement le cas pour le bilan d'énergie et, pas du tout le cas pour le bilan de carbone. Dans le premier cas, le terme source, le rayonnement net est relativement facile à déduire des variables de forçage. En effet, il est égal à la somme des bilans d'énergie dans le domaine solaire (énergie solaire reçue, qui est un forçage, moins l'énergie réfléchie par la surface¹⁰) et dans le domaine de l'infra-rouge thermique (énergie reçue, une variable de forçage, moins l'énergie émise par la surface¹¹). Dans le cas du bilan de carbone, le terme source, la quantité de carbone assimilée par les plantes est encore plus difficile à estimer. Le calcul de ce terme fait généralement intervenir une paramétrisation complexe basée très indirectement sur les variables de forçages (humidité et température de l'air, concentration en CO₂ de l'atmosphère) mais aussi sur les conditions hydriques du sol car il faut une bonne alimentation en eau pour que la plante photosynthétise. Ce dernier point met d'ailleurs en évidence le couplage fort entre les bilans d'eau et de carbone des surfaces naturelles.

Pour finir, la Figure 7 illustre la complémentarité des trois principaux domaines de longueurs d'onde utilisés en télédétection spatiale des surfaces grâce à l'information qu'ils peuvent permettre d'obtenir sur une variable clé de chacun des bilans.

⁹ L'albédo en modélisation des surfaces naturelles a une valeur comprise entre 0 et 1 et correspond à la partie de l'énergie solaire incidente réfléchie par la surface

¹⁰ L'énergie réfléchie est égale à l'énergie reçue multipliée par l'albédo de surface, un paramètre du modèle.

¹¹ L'énergie émise par la surface est déduite de la loi de Stefan-Boltzmann à partir de l'émissivité, un paramètre du modèle, et de la température de surface, une variable pronostique.

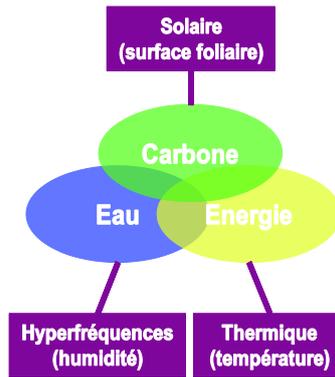


Figure 7 : complémentarité des trois grands domaines de longueur d'onde pour le suivi des bilans d'eau, d'énergie et de carbone des surfaces terrestres naturelles ou cultivées.

Notations

x est le vecteur rassemblant toutes les variables z (appelées « variables pronostiques » ou encore « variables d'état ») permettant de définir à tout instant l'état « réel »¹² du système que l'on étudie. Ce vecteur est parfois complété (« augmenté ») par d'autres variables ou les pseudo-constantes (paramètres p et conditions initiales par exemple) dont il n'est pas nécessaire de connaître la valeur pour définir l'état du système à un instant donné mais dont la connaissance est par contre indispensable pour prévoir son évolution. Dans le cas des surfaces continentales, les variables d'état peuvent être l'humidité du sol et/ou la température à différentes profondeurs du sol, la surface foliaire, et on peut citer parmi les paramètres la conductivité hydraulique du sol à saturation. L'assimilation de données, en combinant les prédictions du modèle et les observations, va nous permettre d'obtenir une estimation optimale (au sens statistique du terme) de cet état réel qui est noté x^a pour x analysé ou simplement « analyse » (sous-entendu de x). Dans certains cas, on peut avoir une idée approximative de l'état vrai (la prédiction du modèle juste avant l'utilisation des observations) et souhaiter que l'analyse ne s'écarte pas trop de cette solution. Cette valeur est appelée x^b , pour « background » en anglais, ou « ébauche ». x^a et x^b contiennent, comme pour x , n composantes (pour m points de grilles le cas échéant).

L'opérateur du modèle dynamique sera noté \mathcal{M} . La plupart des modèles de surface étant de type markovien, l'état au temps $i+1$ x_{i+1} prédit par le modèle sera donné par :

$$x_{i+1} = \mathcal{M}(x_i, u, p) \quad (1.2)$$

Où u représente l'ensemble des variables de forçages (la température et l'humidité de l'air, la vitesse du vent, les précipitations ...etc...) et p le vecteur de pseudo-constantes ou paramètres. Plusieurs approches classiques présentées dans la partie suivante nécessitent une linéarisation de l'opérateur non-linéaire \mathcal{M} . La version linéarisée (le modèle linéaire tangent autour de l'état x au temps i x_i) sera notée M_i et x_{i+1} s'écrira :

$$x_{i+1} = M_i(p)x_i + F_i(p)u \quad (1.3)$$

F_i est l'opérateur linéaire qui relie l'état x au forçage. Le modèle direct propage dans le temps un état au temps i x_i vers l'état au temps $i + 1$ x_{i+1} .

MODELES UTILISES ET STRATEGIE DE MODELISATION

¹² Il est important de souligner que ce terme « réel » est un peu abusif. Dans le cas de modèles en géosciences, l'état « réel » est représenté par un nombre infini de variables ou paramètres et de plus, le domaine est discrétisé et l'état dit « réel » n'est qu'une représentation discrétisée de la réalité.

Mieux comprendre les processus régissant le fonctionnement hydrologique des surfaces et en même temps être capable de contribuer à fournir des outils appliqués d'aide à la gestion de l'eau et à la planification de l'eau agricole nécessite de faire appel à une grande diversité d'outils de modélisation parmi lesquels on peut distinguer :

(1) **les outils conceptuels** globaux qui visent à prédire une variable globale, par exemple l'évapotranspiration ou un débit à l'exutoire. Ils sont pilotés par l'observation disponible en particulier de télédétection (par exemple les modèles de bilan d'énergie forcé par une observation de la température de surface), parcimonieux en termes de paramétrisation et donc peu gourmand en entrées. Tributaires de la disponibilité en observations, ils sont cantonnés à un rôle diagnostique mais ils offrent un potentiel important dans des contextes applicatifs comme l'aide au pilotage de l'irrigation ou le suivi de l'efficacité de l'utilisation de l'eau.

(2) **les outils à base mécaniste** voire physique tels que les modèles SVATs représentant l'ensemble des processus éco-hydrologiques intermédiaires ; par exemple le bilan hydrique dans le sol pour représenter explicitement l'état hydrique des cultures. Ces outils permettent de mieux comprendre les processus qui régissent le fonctionnement des cultures (réponse physiologique à un stress hydrique, conséquences sur la production ...). En contre-partie, ils nécessitent une bonne connaissance des apports d'eau, des caractéristiques du couvert et des sols. Ces informations ne sont pas toujours disponibles avec une précision suffisante à l'échelle de la parcelle pour une application opérationnelle mais ils peuvent être utilisés en mode pronostique notamment pour établir des scénarios d'utilisation de l'eau sous l'effet des changements globaux.

Plus spécifiquement, la Figure 8 montre une tentative de classification des modèles de fonctionnement des surfaces utilisés dans le cadre de mes travaux en fonction de leurs niveaux de complexité. A titre indicatif, sont représentées également leurs échelles d'application théoriques en termes de temps et d'espace. La complexité s'entend soit par le nombre de processus représentés soit par la complexité des paramétrisations de chacun de ces processus pris individuellement.

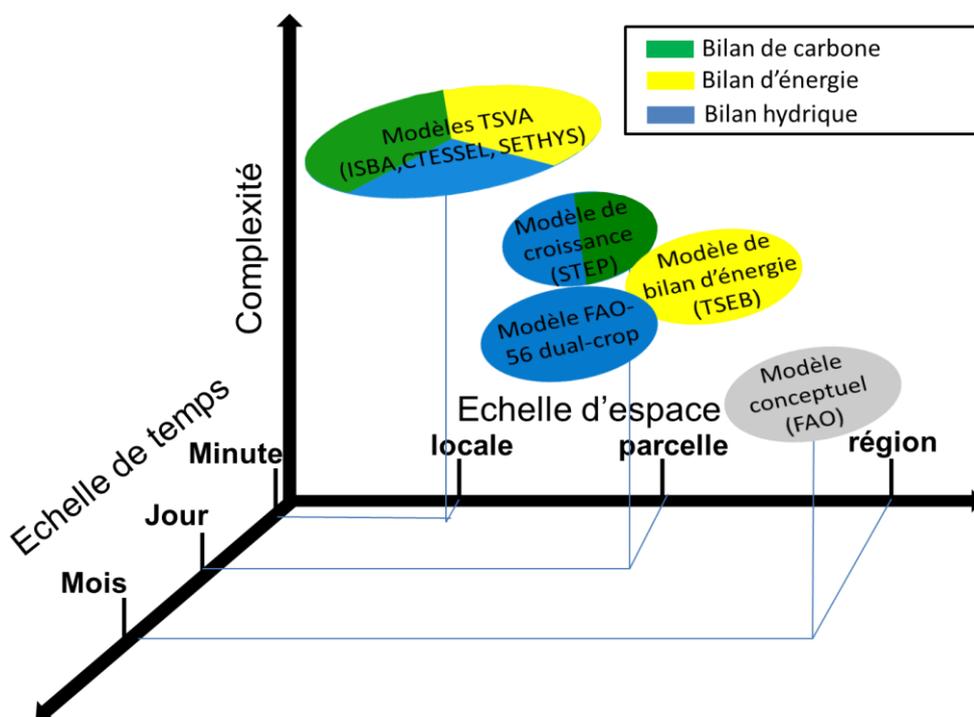


Figure 8 : Classification des modèles de fonctionnement des surfaces utilisés (d'après Boulet, 2010).

En haut de l'échelle, se trouvent les modèles de type Transfert Sol-Végétation-Atmosphère qui, pour les plus complexes, simulent de manière couplée les trois bilans régissant le fonctionnement des surfaces. C'est le cas du modèle ISBA-A-gs (Calvet et al. 1998; Noilhan and Mahfouf 1996; Noilhan and Planton 1989) et du modèle C-TESEL (2008-4 ; 2013-4) ; Le modèle SETHYS (Coudert et al. 2006) ne résout pas de bilan de carbone. Ces modèles ont été initialement développés pour renseigner les flux de surface dans les modèles de prévisions du temps et du climat et résolvent ainsi le cycle journalier. A l'autre extrémité, l'approche FAO-56 à simple coefficient (Allen, Pereira, et al. 1998) donne une estimation journalière de l'évapotranspiration des cultures irriguées par la simple modulation de la demande évaporative à l'aide d'un coefficient empirique appelé coefficient cultural qui intègre tous les effets non climatiques (type de culture, son stade de développement, type de sol et pratiques agricoles). Cette approche conceptuelle cible une variable intégratrice, l'évapotranspiration, sans représenter les processus intermédiaires qui régissent sa dynamique (bilan d'eau dans le sol, ouverture stomatique, partition évaporation/transpiration ...). Elle ne résout aucun des 3 bilans. J'ai pour ma part mis l'accent sur des modèles de complexité intermédiaires pour (1) leur nombre d'entrées modéré dont certaines peuvent être renseignées par la télédétection spatiale : la fraction de recouvrement de la végétation pour le modèle de bilan d'énergie TSEB (Norman, Kustas, and Humes 1995) ou le coefficient cultural qui peut être dérivé du NDVI pour la méthode FAO-56 à double coefficient (Allen, Pereira, et al. 1998) ; (2) la possibilité de contraindre la trajectoire de certaines de leurs variables pronostiques grâce aux produits satellitaires : l'humidité du sol pour la méthode FAO-56 à double coefficient ou la masse herbacée aérienne pour le modèle de croissance des prairies sahéniennes STEP (Mougin et al. 1995) ; (3) plus récemment, leur relative facilité de mise en œuvre dans un objectif appliqué d'aide à la gestion des ressources. Une partie de mes travaux a été consacré à l'évaluation de leurs performances et de leurs domaines de validité notamment afin de renseigner les matrices de covariances d'erreur de modélisation qui sont des entrées essentielles pour l'assimilation de données.

Enfin, de manière générale, ces échelles d'applications sont théoriques car les modèles TSVA, notamment, sont utilisés à toutes les échelles. Pour la spatialisation des bilans hydriques de surface, deux approches sont souvent opposées:

- **Ascendante** : Le point de départ est l'étude des processus et nous allons chercher à valider, souvent par la mise en place d'un dispositif expérimental *in situ* dédié, l'ensemble des processus intermédiaires d'un modèle mécaniste complexe qui régissent la dynamique d'une variable intégratrice. Par exemple, la prédiction de l'évapotranspiration par le modèle ISBA nécessite l'évaluation de la dynamique de l'eau dans le sol et donc la validation de l'humidité à différentes profondeurs, la validation de la partition entre transpiration de la plante et évaporation du sol car correctement reproduire l'évapotranspiration ne garantit pas que la partition soit correctement simulée. De même pour les modèles hydrologiques, reproduire les débits sur lesquels ces modèles sont souvent calés ne signifie pas que les différents flux (évapotranspiration, infiltration ...) sont correctement quantifiés.
- **Descendante** : à l'inverse, c'est la donnée disponible qui va gouverner le choix des outils de modélisation. Par exemple, en hydrologie en présence des seules données hydroclimatiques, on va plutôt mettre en place un modèle conceptuel global de type GR4J et GR2M. Si une

information spatialisée sur les surfaces enneigées est disponible, on va être tenté d'y adjoindre un modèle spatialisé de fonte. Si on a de plus, une idée sur l'évapotranspiration des surfaces, on remplacera la formulation simple fondée sur la demande évaporative par une approche plus mécaniste ...etc...

En pratique, les deux approches sont souvent menées en parallèle et l'une se nourrit de l'autre. C'est notamment l'option que j'ai encouragée pour la modélisation hydrologique intégrée du bassin versant du Tensift dans le cadre du LMI TREMA. Nous nous sommes orientés vers la mise en place d'un modèle conceptuel (SAMIR-WEAP-MODFLOW ; 2012-2) et un modèle mécaniste (la chaîne de prévision hydrométéorologique SAFRAN-ISBA-RAPID-MODCOU ; 2015-7, 2015-10).

MODELE ET OPERATEUR D'OBSERVATION

Le lien entre la grandeur électromagnétique mesurée par un capteur (réflectance, température de brillance ...) et la variable que l'on souhaite contraindre par assimilation de données (surface foliaire, température, humidité du sol ...) ou que l'on souhaite inverser n'est pas direct. Ce lien fait appel à un modèle, le modèle d'observation, qui peut être simplement une relation empirique entre les mesures acquises par le satellite et des mesures de terrain de la variable pronostique basée sur une simple régression (cf. Prince, 1991 qui établit une régression entre le NDVI et la surface foliaire) ou un modèle à base physique simulant l'interaction de l'onde électromagnétique avec les constituants de la surface. En d'autres termes, ces modèles reproduisent la réponse d'un capteur spatial sur la base d'un certain nombre de caractéristiques décrivant la surface observée (humidité du sol, surface foliaire ...), les caractéristiques du capteur (longueur d'onde, réponse spectrale ...) et la configuration d'acquisition. Les modèles d'observation des surfaces naturelles que j'ai utilisés durant mon parcours sont basés sur la solution au premier ordre des équations du transfert radiatif. La théorie du transfert radiatif (Chandrasekhar, 1960) donne les contributions et pertes de l'intensité spécifique d'une onde lors de sa traversée d'un volume élémentaire. Ces équations se traduisent en termes d'intensité (et non de champ électrique) et, de ce fait, toute information sur la phase du champ diffusé est perdue.

Notations

Le système d'assimilation est alimenté par un ensemble de N observations noté \mathbf{y} . Sa taille est, en général, inférieure à celle du vecteur d'état du modèle ($N < n$) car il y a beaucoup moins d'observations que de variables dans le modèle. Il peut être composé d'observations hétérogènes (observation satellitaire dans différents domaines de longueur d'onde par exemple). L'opérateur d'observation, potentiellement non-linéaire, relie l'état du système (donc le vecteur \mathbf{x}) aux observations \mathbf{y} . Il est noté \mathcal{H} . Le vecteur $\hat{\mathbf{y}} = \mathcal{H}(\mathbf{x})$ représente donc les valeurs que les observations prendraient si ces observations et le vecteur d'état étaient parfaits (en l'absence d'erreurs de modélisation). De même, sa version linéarisée autour de l'état \mathbf{x} au temps i \mathbf{x}_i sera notée \mathbf{H}_i . Ainsi le vecteur d'état projeté dans l'espace des observations sera donné par :

$$\hat{\mathbf{y}}_i = \mathbf{H}_i \mathbf{x}_i \quad (1.4)$$

L'ASSIMILATION DE DONNEES DANS LES MODELES DE SURFACE

L'objectif de l'assimilation de données de télédétection dans les modèles de surface est de tirer parti de la vision spatialisée et répétitive de la surface mais instantanée par la télédétection d'une part et

de la prédiction continue des modèles dynamiques d'autre part pour obtenir la meilleure estimation de l'état des surfaces continentales à tout instant et en tout point. L'avantage de l'assimilation de données dans un modèle dynamique par rapport à l'inversion de données satellites est le lien dynamique qui lie les variables observables avec certaines qui ne le sont pas directement. L'assimilation permet ainsi d'accéder à des variables qui ne sont pas directement observables par les seules données de télédétection telles que l'humidité dans la zone racinaire ou le flux d'évapotranspiration mais qui sont liées dynamiquement par l'intermédiaire du modèle à des variables observées comme l'humidité superficielle du sol.

Period	Time Step	Layer	N	Correlation Coefficient R With GSMDB Data (Dimensionless)		
				Satellite	Model	Assimilation
AMSR-E	Daily	sf	23	0.38 ± 0.02	0.43 ± 0.02	0.50 ± 0.02
		rz	22	-	0.40 ± 0.02	0.46 ± 0.02
AMSR-E	Monthly	sf	12	0.41 ± 0.08	0.50 ± 0.09	0.57 ± 0.08
		rz	11	-	0.42 ± 0.10	0.54 ± 0.08
SMMR	Monthly	sf	66	0.32 ± 0.03	0.36 ± 0.03	0.43 ± 0.03
		rz	33	-	0.32 ± 0.05	0.35 ± 0.05

Figure 9 : Comparaison des produits d'humidité superficielle des capteurs AMSR et SMMR et des prédictions d'un modèle de surface à un jeu de données *in situ* avant et après assimilation (Reichle et al. 2007)

La Figure 9 est un résultat très spectaculaire (malgré les apparences) tiré de Reichle et al. (2007). Ces auteurs assimilent des produits d'humidité superficielle dérivés des observations des capteurs satellitaires AMSR et SMMR dans un modèle de surface. Le tableau montre les résultats de la comparaison entre les produits d'humidité des deux satellites et les prédictions du modèle à un jeu de données *in situ* (respectivement les colonnes Satellite et Model) et la même chose pour l'utilisation conjointe des deux par assimilation de données (colonne Assimilation). L'assimilation permet d'obtenir des coefficients de corrélation avec les données *in situ* meilleurs en utilisant conjointement les produits satellitaires et le modèle que les deux pris séparément.

En géosciences, c'est la météorologie, en particulier pour la prévision du temps, suivie de l'océanographie qui ont été à l'origine de l'essor de ces méthodologies (Bennett and Thornburn 1992; Daley 1991). Si Maas (1988) avait posé les premiers jalons théoriques, il a fallu attendre les travaux de Moulin (1995) en agronomie, Beven & Binley (1992), Entekhabi et al. (1994) et Otlé & Vidal-Madjar (1994) en hydrologie pour des applications concrètes au suivi du fonctionnement des surfaces continentales. Les techniques d'assimilation de données ont toutes pour objectif d'ajuster les prédictions du modèle aux observations disponibles mais les développements pour les surfaces continentales ont suivi deux voies aux philosophies radicalement différentes mais complémentaires:

- *L'assimilation de données*: devant l'influence des échanges d'eau et d'énergie à l'interface sol-végétation-atmosphère sur les caractéristiques thermo-dynamiques de la basse atmosphère et, *in fine*, du temps et du climat (Beljaars et al. 1996; Delworth and Manabe 1989; Dirmeyer 2003), les centres météorologiques nationaux ont introduit une assimilation de données visant à corriger en temps réel, de la même manière que pour les variables atmosphériques, les variables d'état pronostiques de surface conditionnant ces échanges, en particulier l'humidité du sol (Balsamo, Bouyssel, and Noilhan 2004; Mahfouf 1991; Seuffert et al. 2003). Ce type d'approche repose sur un modèle non biaisé (Bouttier and Courtier 2002) ce qui dépend en grande partie de sa paramétrisation (i.e. la

valeur de ses paramètres). Cette approche est particulièrement adaptée pour faire du suivi en temps réel notamment dans le cas d'évènements extrêmes que les modèles reproduisent souvent avec un succès limité.

- *L'identification de paramètres* : pour cette raison et devant la complexité des modèles hydrologiques, la communauté des hydrologues s'est attachée à développer des stratégies pour étalonner les nombreux paramètres de leurs modèles (Sellers et al. 1989; McLaughlin 1995; Franks and Beven 1997; Bastidas et al. 1999; 2005-2; Demarty et al. 2005; Coudert et al. 2006). Cette approche, même si les méthodologies de mathématiques appliquées utilisées peuvent être les mêmes, diffère fortement dans sa philosophie de la précédente dans la mesure où elle impacte directement la paramétrisation voire la formulation même des équations et donc le régime du modèle. De ce fait, ces approches nécessitent des séries d'observations relativement longues (par rapport à la dimension temporelle typique du processus étudié) afin d'intégrer une large variété de situations éco-hydrologiques.

Je regroupe donc ici sous le terme assimilation de données toutes les techniques qui ont pour objectif de combiner modèles et observations (de façon optimale selon des critères de performance statistique ou non) qu'il s'agisse de la correction en temps réel des variables du modèle (l'assimilation de données au sens des météorologues et des océanographes) ou de l'identification de paramètres. Par ailleurs, je limite au maximum les développements techniques qui pourront être tirés de nombreux ouvrages de référence (Daley 1991) ou pas (Jarlan & Boulet, 2014).

Il existe plusieurs classifications possibles pour les méthodes d'assimilation de données. L'optimalité peut être un critère et les méthodes seraient ainsi classées en méthodes optimales et sub-optimales mais ce critère est un peu artificiel dans la mesure où les conditions d'optimalité sont rarement vérifiées dans un problème réel. Bouttier and Courtier (1999) introduisent en ce sens une classification plus satisfaisante en parlant d'assimilation intermittente pour laquelle l'état du système est discontinu à chaque fois qu'une analyse est effectuée et inversement, d'assimilation continue. La classification la plus classiquement utilisée distingue les méthodes séquentielles, qui corrigent l'état du système à chaque observation disponible (i.e. le Filtre de Kalman et ses variantes), des méthodes variationnelles¹³ qui consistent à ajuster les observations aux prédictions du modèle sur une fenêtre temporelle donnée (Figure 10).

Mes travaux en assimilation de données ont été principalement motivés par deux finalités distinctes : (1) l'amélioration des états de surface au sens large dans les modèles de surface des systèmes de prévision du temps et du climat ; (2) la reconstitution d'un historique de variables de surface (masse herbacée aérienne, humidité du sol) des prairies semi-arides sahéliennes et (3) l'analyse du contenu en information de plusieurs produits de télédétection pour contraindre l'évapotranspiration dans les modèles TSVA.

¹³ le terme variationnel se rapporte généralement à la technique utilisée basée sur la théorie des variations et le contrôle optimal mais il est tout à fait possible d'ajuster les prédictions aux observations sans passer par les approches variationnelles classiques.

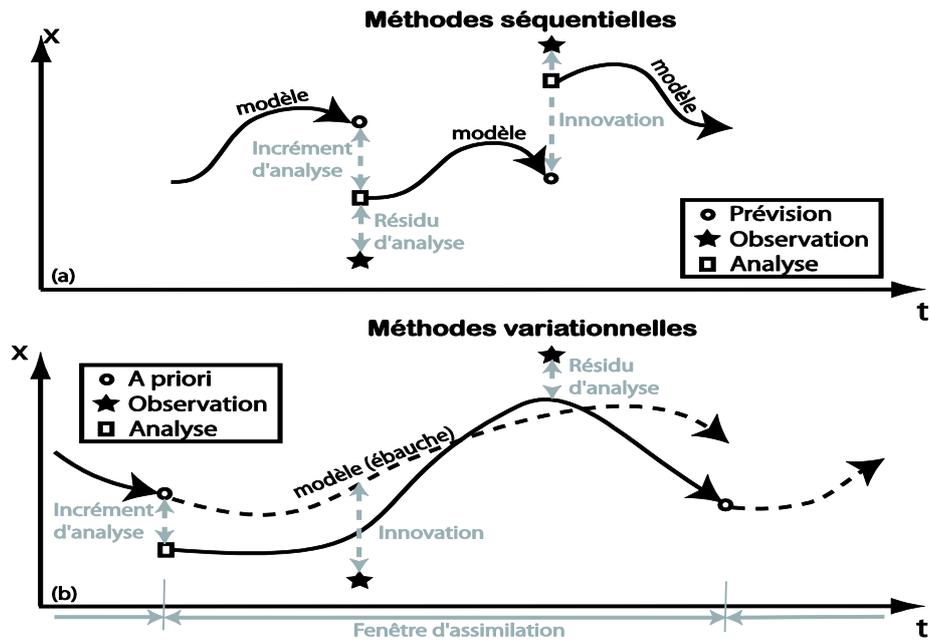


Figure 10 : Méthodes séquentielle et variationnelle et définitions de quelques diagnostics en assimilation de données. Cas où la variable observée est aussi la variable analysée (i.e. l'opérateur d'observation est la matrice identité).

NOTIONS D'OPTIMISATION MATHÉMATIQUE

Les représentations mathématiques des différents termes de puits et de sources (équation 1.1) (aussi appelée paramétrisation) sont souvent construites empiriquement. Les valeurs de la majorité des paramètres qui interviennent dans ces représentations sont souvent très spécifiques aux conditions de surface et aux sites sur lesquelles elles ont été établies. Si ces paramètres peuvent, dans certains cas, avoir un sens physique à l'échelle locale à laquelle ils ont été fixés, l'application des modèles à une échelle plus grande (la dimension typique des points de grille des modèles climatiques est de l'ordre du millier de km^2) limite ce sens physique. On parlera de paramètres « conceptuels ». Ils peuvent notamment pallier les lacunes de la modélisation en termes de processus manquants. Cela rend leur mesure sur le terrain impossible et ce d'autant plus que les surfaces modélisées sont grandes et hétérogènes. L'identification de paramètres est ainsi la seule technique capable de les renseigner. Devant la complexité des modèles hydrologiques, la communauté des hydrologues s'est attachée à développer des stratégies pour étalonner les nombreux paramètres de leurs modèles (Sellers et al. 1989; McLaughlin 1995; Franks and Beven 1997; Bastidas et al. 1999; Demarty et al. 2005; Coudert et al. 2006).

En pratique, l'inversion du modèle de transfert radiatif ou l'identification de paramètres dans un modèle de surface repose sur la minimisation d'une fonction coût (i.e. une mesure de la capacité du modèle à reproduire les variables observées pour un jeu de paramètres donné). Ce coût peut-être une mesure de la distance aux observations éventuellement augmentée d'une mesure de la distance à un *a priori* si l'on dispose d'une estimation de la valeur des variables recherchées. Plus spécifiquement, l'objectif du problème inverse est de trouver la valeur des paramètres p et/ou des variables z du modèle tel que les prédictions \hat{y} passent au plus près des observations y . Résoudre ce problème revient donc à minimiser la fonction suivante :

$$J = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\hat{y}_i - y_i\|^q \right]^{\frac{1}{q}} + \varepsilon \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \|x_k^b - x\|^q \right]^{\frac{1}{q}} \quad (1.5)$$

Où ε est un facteur de pondération qui définit l'importance relative des deux critères. Le choix de la norme (valeur de q dans l'équation 1.5) va dépendre de la qualité des observations. Si les mesures sont précises, on préférera une norme élevée qui rendra les écarts observations-prédictions élevés significatifs et inversement (cf. Menke, 1984). Suivant le critère des moindres carrés, la fonction coût est quadratique (norme L^2 , $q=2$). La norme L^2 a l'avantage de permettre l'introduction aisée d'information sur les erreurs des données, des paramètres et des variables dans l'expression du coût au travers des matrices de variance-covariance :

$$J = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)' \mathbf{R}_i^{-1} (\hat{y}_i - y_i) + (\mathbf{x}^b - \mathbf{x})' \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x}^b - \mathbf{x}) \quad (1.6)$$

Les matrices de covariance d'erreur d'observation \mathbf{R} et d'ébauche \mathbf{B} vont rassembler toutes les informations des erreurs du système. Elles vont dépendre de la représentation des processus biophysiques gouvernant le fonctionnement de la surface au sein du modèle dynamique, de l'erreur sur le forçage et de la configuration d'observation (caractéristiques des capteurs, résolution ...). Leur estimation est une phase essentielle de la mise en place d'un système d'assimilation de données car (1) elles vont déterminer le poids relatif donné aux observations et à l'ébauche ; (2) elles vont permettre de propager l'information contenu dans les observations dans l'espace et/ou dans le temps dans un domaine réduit autour de l'observation. Ce point est capital pour les régions où le réseau d'observations est épars comme les régions semi-arides par exemple; (3) elles vont aussi déterminer comment les observations seront lissées dans l'espace du modèle. Malheureusement, il n'existe pas de méthodes miracles pour l'estimation des erreurs. Cette estimation fera appel au bon sens du modélisateur. La spécification de ces erreurs reste de toute façon très sujette à approximation et elles sont de ce fait souvent fixées à des valeurs ad hoc. Le filtrage adaptatif (Desrozier et al., 2005 ; Crow and Reichle, 2008) est une voie de recherche en plein essor pour pallier à cette subjectivité.

D'un point de vue purement technique, minimiser ce coût revient à un problème d'optimisation. L'optimisation est un domaine à part entière qui sort du cadre de ce manuscrit. Les méthodes d'optimisation peuvent être classées suivant plusieurs critères. J'en distinguerai deux qui me paraissent assez exhaustifs : la nature déterministe ou stochastique de la méthode de recherche de l'optimum et le chemin emprunté pour explorer l'espace des paramètres : cet optimum peut être recherché dans le voisinage de la solution *a priori* (méthodes dites locales) ou bien sur l'ensemble du domaine de recherche (méthodes dites globales). Les premiers travaux d'inversion de données satellites sont basés sur des méthodes déterministes et locales. La méthode du simplexe (Nelder et al. 1964) a été longtemps très populaire ainsi que différentes variantes de descente de gradient. Comme toutes les méthodes locales, c'est le risque d'être piégé par un minimum local qui constitue la principale limite de ces approches. Les approches basées sur une optimisation globale de la fonction

coût minimisent ce risque et, de plus, permettent d'obtenir une esquisse de l'ensemble des solutions acceptables au problème inverse¹⁴. Enfin, les approches globales basées sur un échantillonnage stochastique plus ou moins dirigé de l'espace de recherche (comme les algorithmes génétiques ou les stratégies d'évolution) présentent également l'avantage d'être des méthodes directes qui ne nécessitent pas de calcul du gradient mais uniquement une estimation du coût. Le problème inverse qu'est l'identification de paramètre est donc résolu en mode direct (Figure 2).

Par contraste avec l'inversion d'un modèle d'observation, la fenêtre temporelle pour l'identification de paramètres d'un modèle de surface sera beaucoup plus longue car les paramètres recherchés doivent permettre au modèle de surface de reproduire le comportement observé dans une large variété de situations : périodes humides et périodes sèches pour un modèle hydrologique, plusieurs saisons de croissance pour un modèle de croissance ...etc.... Il s'agira donc de disposer de séries d'observation relativement longues pour couvrir cette large gamme de situation. Une mauvaise paramétrisation se manifeste par des erreurs systématiques (ou biais) entre les prédictions du modèle et les observations. Or, les méthodes d'assimilation de données présentées reposent pour la plupart sur un biais nul. Pour « l'assimilateur », l'identification de paramètres est une étape préliminaire à l'assimilation visant simplement à éliminer ce biais. Pour le modélisateur, l'identification de paramètre est une étape importante visant à mieux appréhender le fonctionnement de son modèle. Supposons que les paramètres soient estimés sur une saison et le modèle testé sur une autre saison avec ces paramètres. Si le modèle ne permet pas de reproduire les observations sur cette nouvelle saison, cela signifie certainement que les paramétrisations ne sont pas adaptées, qu'un processus n'est pas pris en compte ... En mettant en évidence cette défaillance, cela permet de remettre en cause son modèle et de le faire évoluer. Par ailleurs, cette modification de paramètres, par contraste avec l'assimilation de données, modifie les équations du modèle et change ainsi la relation entre forçages en entrée et variables de sorties et peut donc modifier son régime dynamique.

1.3. ANALYSE DU SIGNAL RADAR SUR LES REGIONS SAHELIENNES

La modélisation directe consiste à adapter ou développer un modèle simulant les interactions du signal satellitaire avec les constituants de la surface. Il s'agit d'une étape indispensable pour comprendre ce signal et en particulier identifier et quantifier les contributions respectives de chaque composante de la surface observée. Cette étape préliminaire à l'inversion permet notamment de distinguer les grandeurs réellement observables et donc inversibles de celles qui ne le sont pas.

La variabilité spatio-temporelle des précipitations est importante en Afrique de l'Ouest, à la fois à l'échelle interannuelle et décennale, et les impacts socio-économiques peuvent être dramatiques en cas de sécheresse. Pendant mes travaux de thèse et dans le cadre d'un postdoc financé par le CNES par la suite, je me suis intéressé au suivi de la biomasse aérienne herbacée en zone sahélienne à l'aide des données du diffusiomètre-vent des satellites ERS (capteur ESCAT).

La forte saisonnalité du coefficient de rétrodiffusion sur les zones sahéliennes (par opposition aux forêts tropicales) est reproduite à la Figure 11 pour 10 saisons de croissance. Elle résulte d'un

¹⁴ Qui passent entre les barres d'erreurs des observations

changement important des propriétés diélectriques de la surface au moment de l'arrivée de la mousson en début d'été. Après une longue saison sèche à la fin de laquelle les sols sont secs et nus, l'arrivée des pluies humidifie le sol et permet aux herbacées annuelles de se développer. Il en résulte une augmentation significative du coefficient de rétrodiffusion qui a été exploité pour estimer l'humidité superficielle du sol et la biomasse aérienne. A la fin de la saison des pluies, le coefficient de rétrodiffusion décroît avec l'assèchement du sol et la sénescence de la végétation, jusqu'à atteindre un niveau faible et constant pour le restant de la saison sèche. La forte variation d'amplitude du signal d'une année à l'autre est aussi directement reliée à la variabilité interannuelle de contenu en eau du sol et de la masse herbacée aérienne comme en témoigne les photos prises sur un même site pour 2 années contrastées (Figure 11). Par contraste, la série temporelle d'indice de végétation NDVI-AVHRR montre un signal en quasi-opposition de phase avec, notamment, une chute brutale en début de saison humide qui résulte de la couverture nuageuse accompagnant l'arrivée de la mousson.

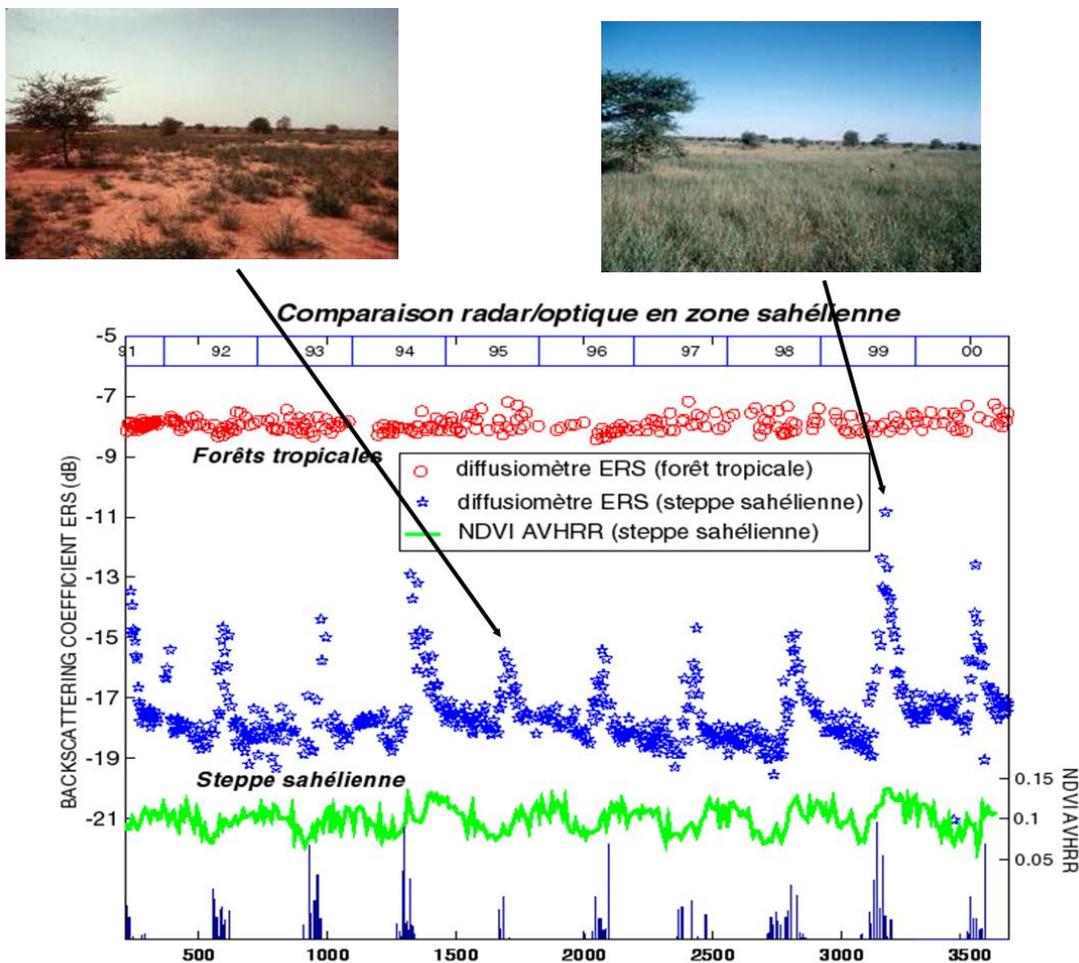


Figure 11 : série temporelle du coefficient de rétrodiffusion normalisé à 45° d'incidence du capteur ESCAT à bord des satellites ERS autour du village de Gourma-Rharous (Nord du Mali) en région sahélienne d'août 1991 à décembre 2000. A des fins de comparaison, les séries de coefficient de rétrodiffusion sur un site de forêt (même capteur) et de l'indice de végétation NDVI issu du capteur AVHRR sur le même site sahélien ont été ajoutés ainsi que les précipitations mensuelles de la station météorologique de Gourma-Rharous.

En préalable à l'estimation de la biomasse aérienne herbacée, nous avons effectué un exercice de modélisation du signal principalement pour quantifier les contributions du sol, de la strate herbacée et de la strate arbustive qui peut atteindre des fractions de recouvrement non négligeables de l'ordre de 10% sur le sud de la région sahélienne. Pour cela, le modèle de croissance des prairies sahéliennes STEP (Mougin et al. 1995), préalablement calibré sur des mesures *in situ* de masse herbacée, a été couplé au modèle de Karam (Karam et al. 1992) afin de reproduire les séries temporelles de coefficient de rétrodiffusion observées (Figure 12b) et les contributions des différentes composantes du paysage le long d'un gradient nord sud au Mali (Figure 12a).

Cet exercice a notamment permis de:

- (1) montrer que la contribution de la strate arbustive était négligeable à l'échelle de la cellule de résolution du capteur et ainsi de tirer un trait sur le potentiel de ces données pour estimer les caractéristiques de la strate arbustive au Sahel (Figure 12a)
- (2) de s'assurer que le modèle d'observation ainsi paramétré était capable de reproduire la dynamique annuelle et interannuelle du signal observé (Figure 12b) ; étape indispensable à l'inversion du signal.

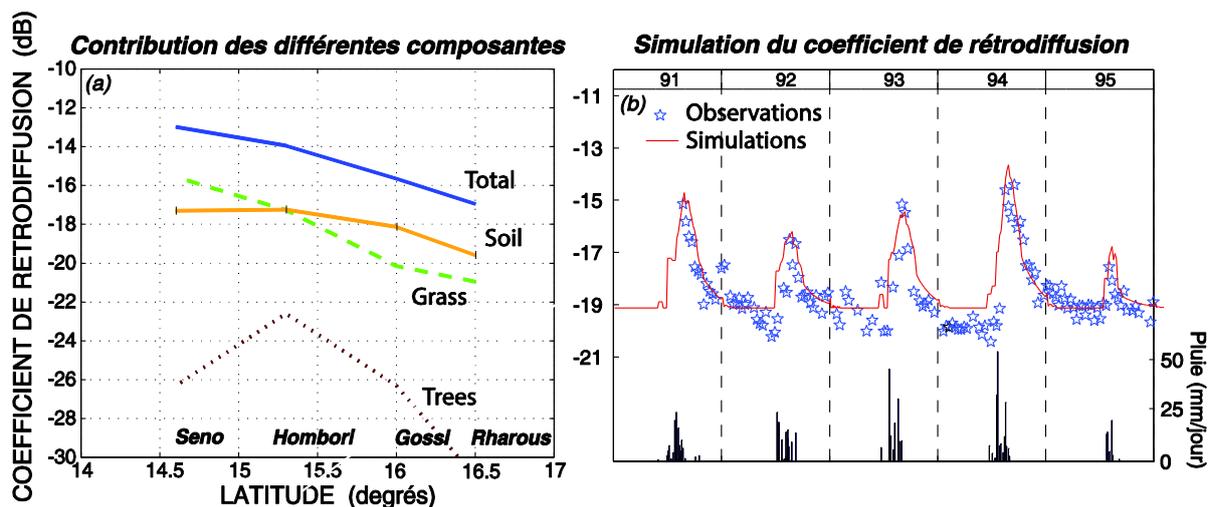


Figure 12 : Modélisation du signal du diffusiomètre ERS : (a) contributions des différentes composantes de la surface au signal observé sur 4 sites le long d'un gradient nord-sud couvrant la bande sahélienne; (b) comparaison entre les coefficients de rétrodiffusion simulés et observés pour 5 saisons de croissance pour un site en zone nord Sahel (Gourma-Rharous, Mali). D'après 2002-1.

Cette démarche a ensuite été appliquée sur les données acquises dans l'optique par le capteur VEGETATION (2008-2) à l'aide du modèle de transfert radiatif SAIL (Verhoef 1984) couplé aux modèles de propriétés optiques de sol SOILSPECT (Jacquemoud, Baret, and Hanocq 1992) et de la végétation PROSPECT (Jacquemoud and Baret 1990). Dans un premier temps, les paramètres du modèle de signature spectrale sont optimisés pour les principales espèces rencontrées sur les sites d'étude. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur une banque de signatures spectrales mesurées sur le terrain par Valérie le Dantec (MdC Université Paul Sabatier, CESBIO). Après cette étape préalable, le modèle couplé en mode direct montre de bonnes dispositions pour la simulation du NDVI jusqu'au pic de biomasse avec des contributions majoritaires du sol suivi de la végétation verte. Durant la phase de sénescence, la contribution de la végétation sénescente devient non négligeable.

La mauvaise prise en compte des changements de propriétés spectrales affectant les tissus secs et surtout l'impact du pâturage et de la dégradation de la masse herbacée après le pic mal reproduits par le modèle STEP entraîne des différences significatives entre signaux observés et simulés. Suite à ces travaux, un module de dégradation de la masse herbacée et, plus récemment, de prise en compte du pâturage a été introduit dans STEP.

1.4. SUIVI DES SURFACES SAHELIENNES

UN PROBLEME INVERSE (SOUVENT) MAL CONTRAINT ...

J'illustre ici deux cas de problème inverse mal-contraint auxquels j'ai été confronté et décrit les solutions mises en œuvre. Il s'agit de (1) l'inversion des données du diffusiomètre vent pour le suivi de la masse herbacée et (2) de l'assimilation des réflectances acquises par le capteur VEGETATION dans un modèle de croissance.

INVERSION DES DONNEES DU DIFFUSIOMETRE-VENT DES SATELLITES ERS

Nous poursuivons l'exemple précédent basé sur les données du diffusiomètre ERS par l'inversion de la masse herbacée aérienne. Il s'agissait de déterminer la série temporelle de masse herbacée sur une saison. La double sensibilité du signal radar à l'humidité du sol et à l'équivalent en eau de la végétation rend le problème mal-posé car il s'agit d'estimer pour chaque date où une observation est disponible une valeur de biomasse aérienne, une valeur de contenu en eau de la végétation et une valeur d'humidité du sol ; soit pour n observations $3n$ variables. Par cette simple observation se manifeste le problème de l'équifinalité et de possible compensation entre variables. En pratique ici, pour une valeur donnée de biomasse, il sera toujours possible de trouver une valeur d'humidité du sol ou de contenu en eau du couvert qui puisse permettre d'ajuster les prédictions aux observations. Afin de minimiser le problème, la solution est de prendre en compte toute information qui permettrait de mieux contraindre le problème inverse parmi lesquelles :

- restreindre la gamme de valeurs possibles et ainsi, l'espace de recherche (nous savons par exemple que même pour les années exceptionnelles, la biomasse dans ces régions ne peut pas excéder 3t/ha).
- ne plus chercher une valeur à chaque date où une observation est disponible mais paramétrer les séries temporelles quand c'est possible et ainsi réduire le nombre d'inconnues. Par exemple, la série temporelle de masse herbacée est paramétrée ici par une fonction logistique à 3 paramètres.

J'ai pu montrer que malgré la faible non-linéarité des modèles d'observations le risque d'être piégé par un minimum local était bien réel (2002-2). J'ai à cette occasion utilisé une méthode globale déterministe bien connue, la « force brute » qui consiste à explorer l'ensemble du domaine de recherche avec un pas suffisamment fin. Quand le nombre d'inconnues est raisonnable par rapport au temps de calcul du modèle, il s'agit de la meilleure méthode d'optimisation qui permet, bien entendu, de trouver l'optimum aux erreurs numériques mais aussi de visualiser l'espace de recherche. L'exploration de l'espace de recherche est souvent très instructive sur le problème à résoudre. Il permet de mettre en évidence d'éventuels bassins d'attraction disjoints, l'existence de

vallée (région à coût constant le long d'une ou plusieurs inconnues) dans cet espace qui témoignerait d'un manque de contrainte par rapport à une inconnue en particulier et d'identifier l'ensemble des solutions acceptables par rapport au niveau de bruit des observations : toutes les solutions passant par les barres d'erreurs des observations peuvent être considérées comme des solutions acceptables sans que l'on puisse en privilégier une parmi les autres. Les Figure 13a et b adaptées de 2002-2 montrent les domaines de solutions acceptables pour, respectivement, les 3 paramètres de la fonction logistique et la série temporelle d'humidité du sol pour la saison de croissance 1993. Ces figures sont une illustration parlante d'un problème inverse (très) mal contraint et du problème d'équifinalité. En effet, le domaine des solutions acceptables balayent l'ensemble des valeurs du paramètre « masse herbacée maximum » qui caractérise le pic de biomasse et des valeurs d'humidité qui vont de 0% à 4% (avec un maximum fixé à 5%).

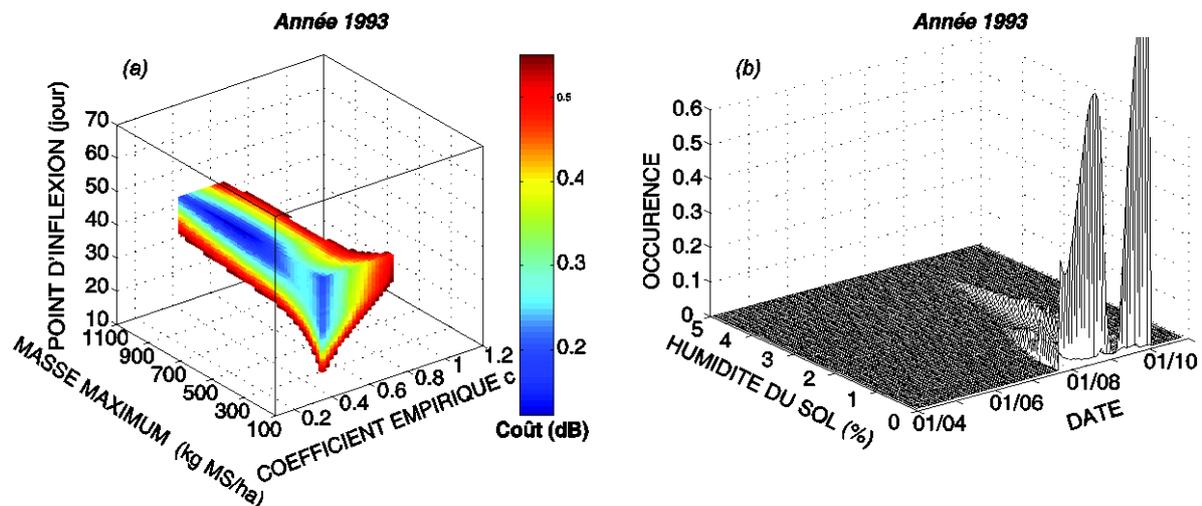


Figure 13 : Inversion de la masse herbacée aérienne à partir des données du diffusiomètre vent des satellites ERS : domaine des solutions acceptables (solutions dont le coût est inférieur au bruit des données soit 0.55dB) pour la saison de croissance 1993: (a) les 3 paramètres de la fonction logistique paramétrant l'évolution temporelle de la masse herbacée ; (b) la série temporelle d'humidité du sol.

ASSIMILATION DES REFLECTANCES VEGETATION DANS LE MODELE STEP

Je me suis ensuite attaché à évaluer l'apport des données des diffusiomètres spatiaux pour contraindre les trajectoires du modèle STEP par calibration des paramètres préalablement identifiés comme sensibles (2006-2). En l'absence d'observation d'humidité du sol et de flux d'évapotranspiration compatible avec la résolution du capteur, je me suis focalisé sur la variable pronostique « masse herbacée ». J'ai donc développé une stratégie d'identification de ces paramètres basée sur une stratégie d'évolution (un algorithme évolutionnaire proche des algorithmes génétiques dont les paramètres algorithmiques sont mis à jour au cours de la recherche) dans l'objectif d'améliorer les prédictions de masse herbacée aérienne du modèle ainsi que les humidités simulées. J'ai également pu vérifier qu'en termes de dynamique, les flux d'évapotranspiration simulé par le modèle étaient compatibles avec les ordres de grandeurs et la dynamique observés par d'autres auteurs sur des écosystèmes similaires. L'approche stochastique choisie pour effectuer cette identification a permis d'approcher l'ensemble des solutions potentielles du problème inverse traité (2005-2). J'ai ainsi pu montrer que si certaines solutions remarquables de

cet ensemble (la solution optimale et/ou la médiane) permettaient de se rapprocher des observations de masse herbacée aérienne *in situ* par rapport au modèle sans assimilation, la contrainte du seul jeu d'observation diffusiométrique restait limitée car l'ensemble de ces solutions potentielles couvraient une gamme très large. Cette conclusion majeure de l'étude m'a poussé à intégrer de nouvelles informations et notamment les indices de végétation du capteur VEGETATION. Ces travaux (2008-2) sont basés sur le modèle couplé STEP-SAIL préalablement évalué en mode direct et également sur une stratégie d'évolution. Bien que l'apport de l'indice de végétation VGT (Figure 14) aille dans le bon sens avec la solution optimale qui se rapproche des observations *in situ* de masse herbacée, la contrainte est également trop faible vu la gamme couverte par l'ensemble des solutions acceptables.

Ces travaux représentent une réelle avancée en proposant une approche adaptée pour évaluer les incertitudes sur les variables prédites. Ce travail a ensuite été poursuivi en collaboration avec Sylvain Mangiarotti qui a combiné les 2 informations en utilisant les mêmes outils (2008-3). Ces travaux ont notamment mis en évidence certaines déficiences du modèle et notamment des compensations entre paramètres, en particulier le paramètre appelé surface foliaire spécifique qui relie la biomasse à la surface foliaire.

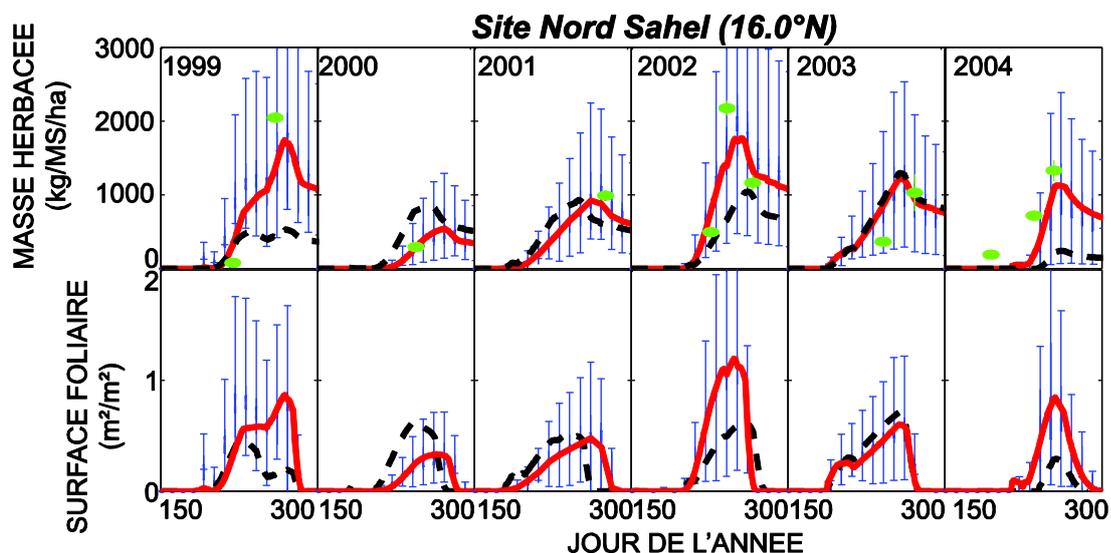


Figure 14 : Evolution de la masse herbacée aérienne (haut) et de la surface foliaire (bas) pendant la saison des pluies prédites par le modèle STEP avec et sans assimilation de 1999 à 2004 (d'après Jarlan et al., 2008).

RESTITUTION DE LA MASSE HERBACEE AERIENNE SUR LA BANDE SAHELIEENNE

Les travaux que j'ai menés par la suite ont eu pour objectif de mieux contraindre le problème inverse notamment en s'affranchissant d'une inconnue essentielle : la variable humidité du sol. En l'absence de contrainte sur son évolution temporelle, elle joue donc le rôle de tampon pour s'ajuster au plus près des observations. Afin de contourner ce problème, j'ai estimé *a priori* l'humidité du sol avec un simple modèle de bilan hydrique de type réservoir (Manabe 1969) forcé par des champs de précipitation satellitaires (2003-1). Cette série temporelle d'humidité du sol est utilisée en entrée du modèle de transfert radiatif ; la rugosité est ensuite déterminée à l'aide des observations de la saison sèche en considérant que le sol est nu et que son contenu en eau est à sa capacité résiduelle. Grâce à

cette information externe supplémentaire, l'algorithme d'inversion est focalisé sur les variables relatives à la végétation (biomasse et contenu en eau). Par ailleurs, l'humidité du sol étant considérée connue a priori, j'ai opté pour une paramétrisation plus souple de la croissance de la végétation que la logistique utilisée dans les travaux précédents. En effet, la courbe logistique ne permet qu'une croissance monotone de la masse herbacée. Si elle est adaptée dans la plupart des cas, elle ne permet pas reproduire des comportements plus complexes tels qu'une sénescence précoce intervenant à un stade phénologique clé en cas de sécheresse suivie d'une nouvelle germination en cas de retour à des conditions plus favorables. Cette situation est assez fréquente au Sahel. Dans cet objectif, j'ai donc opté pour une paramétrisation de la croissance basée sur la décomposition en série de Fourier. Pour cela, j'ai considéré un ensemble de simulations du modèle de croissance de la végétation sahélienne STEP préalablement calibré sur des mesures de terrain de biomasse (2006-2) et décomposée ces simulations. Cela m'a permis d'identifier le domaine de variation possible pour chacun des coefficients de Fourier et ainsi de borner l'espace de recherche.

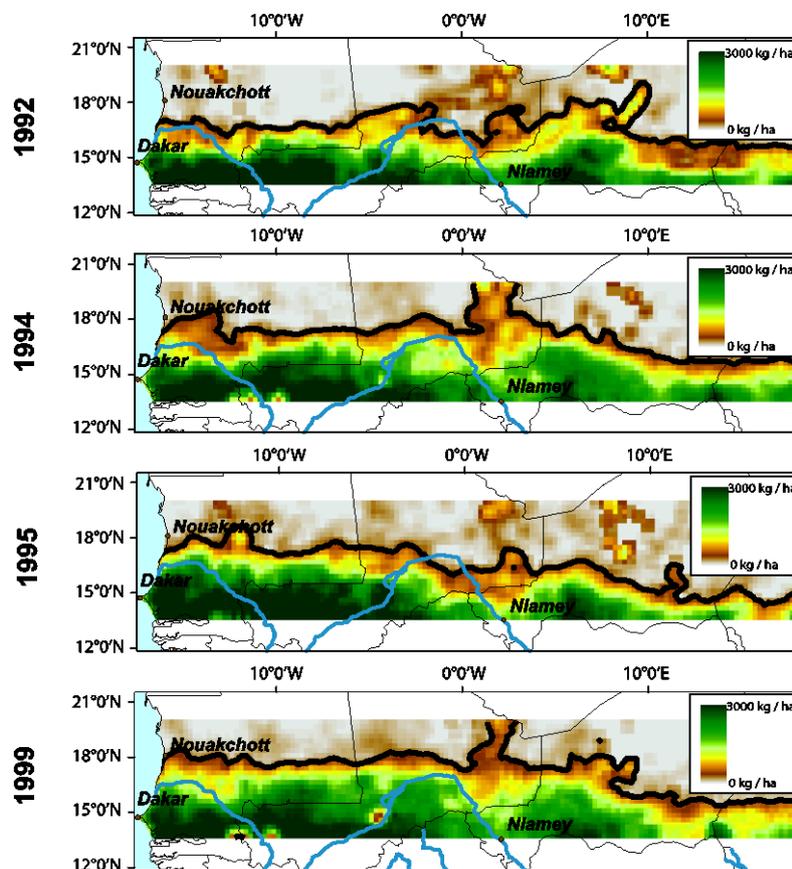


Figure 15 : Cartes de masse aérienne herbacée déduite des données du diffusiomètre vent des satellites ERS-1 sur la région sahélienne pour 4 années contrastées d'après l'approche de Jarlan et al., 2003. L'échelle de couleur va de 0 tonne / ha (beige) à 3 tonnes / ha (vert foncé).

La continuité des acquisitions des données diffusiométriques depuis 1992 avec ERS-1 et ERS-2 puis ASCAT offre une opportunité unique d'étudier les fluctuations de la limite nord du Sahel, et ainsi d'alimenter le débat actuel sur le reverdissement ou la désertification de cette région. Avec Eric Mougin (GET) et Pierre-Louis Frison (Université de Marne La Vallée), nous analysons actuellement les fluctuations et les tendances de la production herbacée sahélienne et de la frontière Sahara-Sahel

basées sur plus de 20 ans de données diffusiométriques. A titre illustratif, la Figure 15 montre des cartes de masse herbacée sur la bande sahélienne en Afrique de l'Ouest pour 4 années contrastées sur le plan climatique. Ces cartes ont été produites à partir de l'algorithme décrit ci-dessus. On distingue clairement un gradient nord-sud de masse herbacée entre le désert au nord et les savanes au Sud. Par ailleurs, la production végétale pendant les années 1994 et 1999, particulièrement arrosées, est bien supérieure à l'année 1995 qui a été très sèche, surtout à l'est de la zone. La ligne noire est associée à une production de 200 kg de matière sèche par hectare et pourrait être assimilée à la transition entre le Sahara et le Sahel.

1.5. AMELIORATION DES ETATS DE SURFACE DANS LES MODELES ATMOSPHERIQUES

Les surfaces continentales et plus encore la représentation du couvert végétal ont été pendant longtemps, et à juste titre vu leur influence de second ordre (voir les nombreux travaux d'Hervé Douville ; Douville, 1998; Douville, 2004), le parent pauvre des systèmes de prévision du temps et du climat. Sous l'impulsion, en particulier, de la commission européenne et des services GMES et COPERNICUS au milieu des années 2000, les centres météo nationaux ont été amené à enrichir leur palette de produits de nouvelles composantes et le développement des modèles de surface a été considérablement accéléré (Hurk et al. 2011; Prentice et al. 2015). L'accent a été mis sur les éléments de la surface susceptible d'impacter le plus l'atmosphère : l'humidité du sol qui était auparavant une variable tampon destinée à satisfaire la demande évaporative atmosphérique (Mahfouf 1991), sur le couvert neigeux et sur le couvert végétal afin de pouvoir prédire les flux de carbone naturels. J'ai particulièrement apprécié de pouvoir contribuer à ces nouveaux développements lors de mes passages à Météo-France et au centre européen de prévision.

ASSIMILATION DE L'HUMIDITE SURPERFICIELLE DANS LE MODEL ISBA-A-GS

A météo-France, j'ai eu l'opportunité de co-encadrer la thèse de Joaquin Muñoz-Sabater réalisée dans le cadre de la préparation à l'arrivée des nouvelles données d'humidité du sol à basse résolution (capteurs SMOS, AMSR et ASCAT). D'un point de vue méthodologique, nous avons inter-comparé plusieurs approches d'assimilation linéaire et non-linéaire sur un site expérimental situé près de Toulouse. Il s'agissait en particulier d'évaluer l'éventuelle plus-value d'une approche visant à mieux prendre en compte les non-linéarités et la non-normalité des distributions d'erreur tel que le filtre de Kalman d'ensemble par rapport à son coût supérieur aux méthodes linéaires.

Ce travail qui constituait la première partie de sa thèse a permis de mettre en évidence le bon comportement d'une approche reposant sur la linéarisation numérique de la dynamique du modèle de surface qui a ensuite été adoptée à Météo-France pour la production de produits de surface dans le cadre d'un LDAS-France. Enfin, nous avons montré que l'assimilation de l'humidité du sol superficiel dans un modèle d'échanges sol-végétation-atmosphère (modèle ISBA-A-gs) permettait notamment de reproduire le déficit d'eau dans la zone racinaire suite à la sécheresse de 2003. Pour ce faire, nous avons développé une nouvelle approche pour identifier les changements de propriétés hydrodynamiques du sol vraisemblablement affectées par la fracturation des sols en période de sécheresse et les mettre à jour (2007-1). La Figure 16 montre les résultats du modèle avec et sans assimilation pour 2 méthodes (Kalman d'ensemble et variationnel simplifié) durant 4 saisons de croissance. En étendant le vecteur des variables analysées au paramètre « point de flétrissement »,

le modèle est capable de reproduire la sécheresse de l'année 2003. Associé à la correction des surfaces foliaires par des produits observés par télédétection (2008-1), le modèle contraint reproduisait de manière satisfaisante à la fois les anomalies de croissance du couvert et de dynamique de l'eau dans le sol pour cette période de sécheresse exceptionnelle.

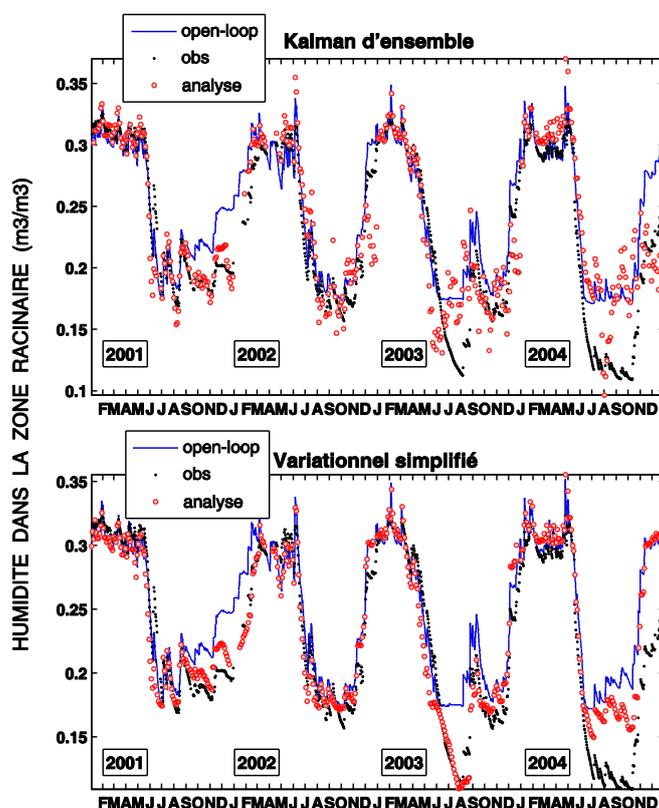


Figure 16 : Humidité de la zone racinaire prédite par le modèle ISBA force-restore à 2 couches après assimilation de l'humidité superficielle suivant 2 méthodes d'assimilation de données : (1) Kalman d'ensemble et (2) variationnel simplifié.

FLUX DE CARBONE NATUREL SUR L'AFRIQUE DE L'OUEST

Au centre européen de prévision météorologique, l'objectif était aussi d'ajouter un peu de « verdure » dans leur modèle de surface. Dans le cadre du projet GEOLAND, la paramétrisation de la résistance du couvert de type Jarvis consistant à moduler une résistance minimale par des fonctions de stress (Jarvis 1976) a été remplacé par le module A-gs (Jacobs, 1994) simulant les processus physiologiques de la photosynthèse et en particulier l'assimilation du carbone par la plante. Ce carbone assimilé est ensuite alloué aux organes de la plante et la masse aérienne est transformée en surface foliaire qui évolue ainsi dynamiquement à l'aide d'un paramètre appelé surface foliaire spécifique égal au rapport entre la surface foliaire et la masse aérienne (Calvet et al. 1998). Ces travaux ont été menés en grande partie par Sébastien Lafont (2006-10) et Marita Voogt (2005-5).

La Figure 17 montre la confrontation avec la surface foliaire prédite par C-TESEL et 2 produits satellitaires en Afrique de l'Ouest : le produit « CYCLOPES » dérivé des données du capteur VEGETATION (Baret et al. 2007) et le produits MODIS version 4. Les simulations de C-TESEL sont effectuées avec les paramètres du module A-gs qui ont été calibrés à l'échelle globale (2006-8). Si des différences d'amplitude de cycle et de valeurs minimales notamment pendant la saison sèche sur la

bande sahéenne sont nettes entre les 3 séries temporelles, les deux jeux de données satellites s'accordent en terme de phasage de la saison des pluies alors que C-TESSSEL est en retard en début de cycle et simule une sénescence plus tardive.

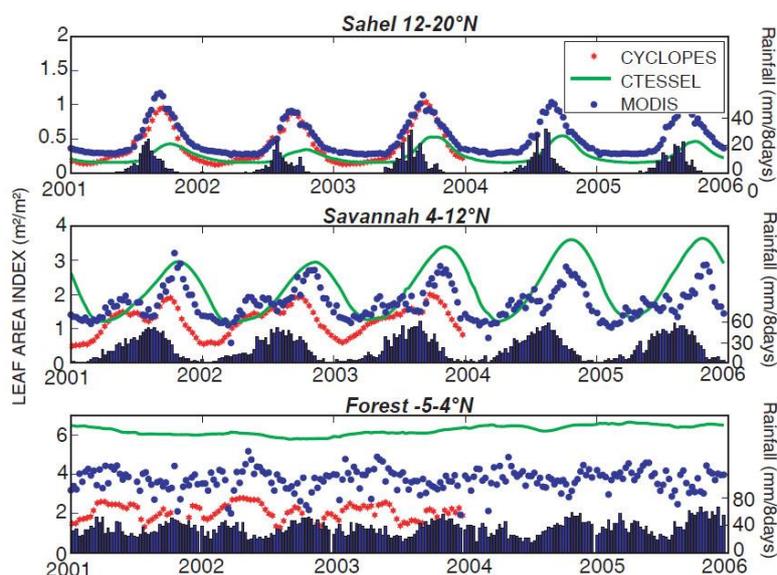


Figure 17 : Surface foliaire simulée par C-TESSSEL confrontée à 2 produits satellitaires (MODIS et CYCLOPES) par bande de latitude le long d'un gradient nord-sud en Afrique de l'Ouest.

Cela nous a conduits à proposer un système d'assimilation des produits de surface foliaire satellitaire dans C-TESSSEL pour contraindre la trajectoire du modèle que j'ai choisi d'évaluer sur l'Afrique de l'Ouest pour son climat à la saisonnalité marqué et pour la diversité de ses formations végétales (2008-4). J'ai pu de ce fait participer au programme ALMIP d'inter-comparaison de modèles sur l'Afrique de l'Ouest (2009-1). En préalable à l'assimilation des LAI satellitaires, nous avons dû réduire les biais entre les simulations de C-TESSSEL et les produits satellitaires par un simple ajustement d'histogramme ; une approche que nous avons adaptée de Reichle et al. (2007) qui l'ont initialement appliquée aux produits satellitaires d'humidité du sol. Nous étions fortement contraints par le caractère opérationnel du projet GEOLAND et la faisabilité d'une mise en œuvre à l'échelle globale (temps de calcul, accessibilité des données). De ce fait, nous avons finalement opté pour une méthode variationnelle linéaire déterministe appelé 2D-VAR simplifié et adaptée de Balsamo et al. (2004). C'est une approche similaire au filtre de Kalman étendu mais qui fait l'économie de la propagation des covariances d'erreurs. La méthode choisie a été évaluée par rapport à un filtre de Kalman d'ensemble (par opposition, non linéaire et stochastique) et j'ai montré que, malgré les hypothèses de linéarités utilisées, elle donnait des résultats satisfaisants.

Les échanges net de carbone ont ensuite été comparés à deux jeux de données de référence disponibles à l'échelle globale : CASA (Randerson et al. 1997) basé sur l'approche de Monteith forcée par des estimations de fAPAR dérivés des NDVI AVHRR et SIB (Denning et al. 1996) issu des simulations du modèle de surface SIB. Ces jeux de données sont très incertains mais il s'agissait des seuls disponibles. La Figure 18 montre la comparaison avec les prédictions de C-TESSSEL avant et après assimilation. L'apport de l'assimilation des produits LAI satellitaires est le plus significatif sur la bande sahéenne où la saisonnalité du développement du couvert végétal est la plus marquée. Elle permet

notamment de rattraper une partie du retard du cycle de CTESSSEL sur le Sahel et les savanes ouest-africaine.

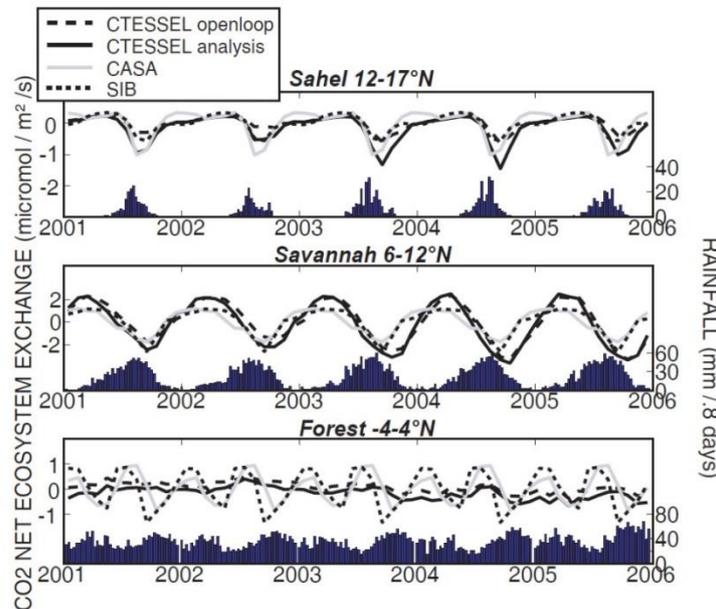


Figure 18 : Flux de carbone (NEE) simulé par CTESSSEL avec et sans assimilation (open-loop) des produits de surface foliaire sur 2001-2006 comparé à deux jeux de données globaux (CASA et SIB).

Ce système sera ensuite implémenté pour la prévision opérationnelle des flux de carbone naturels entre la surface et l'atmosphère quelques années plus tard (2013-4). Nous avons poursuivi notre collaboration et nous avons également montré l'impact positif d'une végétation interactive sur les scores de prévisions des température et humidité à 2 m. (2013-3).

2. ANALYSE DIAGNOSTIQUE DU FONCTIONNEMENT ECO-HYDROLOGIQUE DES SURFACES A L'ECHELLE REGIONALE ET RELATION AVEC LE CLIMAT GLOBAL

2.1. DEMARCHE ET OBJECTIFS

De longues séries temporelles de données satellitaires sont disponibles de nos jours. Ces longues séries d'observation représentent un témoin unique de l'évolution des ressources qui n'a été que peu exploité jusqu'à présent (Hill et al. 2008). Ces observations acquises dans différents domaines de longueur d'onde depuis plusieurs décennies (les années 80 pour les capteurs AVHRR dans le domaine optique et METEOSAT dans le domaine thermique, les années 90 pour le diffusiomètre ERS dans le domaine des hyperfréquences) sont étroitement liées à des variables (surface foliaire, humidité du sol, couverture neigeuse, évapotranspiration) régissant certains processus clés du cycle de l'eau continental. Ces données, régulièrement distribuées spatialement et temporellement, représentent donc une information essentielle pour l'étude détaillée du fonctionnement hydrologique des surfaces, en complément des mesures hydro-climatiques classiques (débits, niveau de nappe) qui reflètent leur comportement global. Mes travaux d'analyse diagnostique du fonctionnement des surfaces sont structurés autour de 3 axes de travail :

- (1) L'évaluation des données ou produits satellitaires : en préalable à l'utilisation de ces produits ou observations, je me suis attaché à les évaluer par confrontation autant que possible avec des observations de terrain ou à d'autres produits satellitaires. Outre l'évaluation des produits de surface foliaire évoquée plus haut, nous avons notamment validé le produit journalier de surface enneigé MODIS (MOD10A1) sur plusieurs stations nivales mesurant la profondeur de neige (2015-5) dans le cadre de la thèse d'Ahmed Marchane (UCAM, Maroc). Ces données n'avaient jamais été évaluées sur les massifs montagneux de la Méditerranée du Sud.
- (2) La caractérisation des principaux modes de variabilité spatio-temporel : malgré la complexité des processus liés au fonctionnement des surfaces continentales, leurs dynamiques spatiales semblent souvent dominées par un nombre relativement restreint d'unités ou briques élémentaires. Des structures cohérentes émergent et ce à plusieurs échelles spatiales. Ces systèmes sont en quelque sorte à faible dimension. Il peut être intéressant afin de faciliter l'analyse de leur variabilité spatio-temporelle d'isoler les modes principaux de variabilité.
- (3) La détermination des facteurs climatiques qui gouvernent cette variabilité : plusieurs études ont montré l'impact des pseudo-oscillations climatiques à grande échelle (El Niño Southern Oscillation –ENSO-, Oscillation Nord Atlantique –ONA- ...) sur de nombreuses composantes des écosystèmes continentaux comme la couverture végétale ou les populations animales. Dans un contexte climatique en évolution, ces influences pourraient être responsables de déstabilisation de la dynamique de ces mêmes écosystèmes. L'intérêt est donc double : (1) mieux anticiper l'évolution future des surfaces car ces indices pseudo-oscillatoires sont généralement bien mieux prédits que les champs de précipitation ou de température par les modèles de circulation générale; (2) éventuellement identifier des précurseurs à l'échelle saisonnière qui pourraient permettre de développer des outils d'alerte précoce pour la sécheresse ou pour la prévision saisonnière des rendements agricoles.

2.2. METHODOLOGIE

Les modes de Fourier ont été utilisés pour la paramétrisation de l'évolution temporelle de la masse herbacée au Sahel (2002-2). Néanmoins, le nombre de fonction de Fourier pour représenter un système dynamique montrant une forte variabilité spatio-temporelle peut être très élevé. Une méthode opérant par unités spatiales caractéristiques semble mieux adaptée pour conduire à un modèle minimal. Si cette démarche est utilisée en climatologie de l'atmosphère ou de l'océan depuis plusieurs décennies, vraisemblablement grâce à une disponibilité plus précoce de champs spatio-temporels décrivant ces objets d'étude, je pense avoir contribué à la démocratiser pour l'étude des surfaces continentales. Les méthodes de décomposition que j'ai utilisées visent à déconvoluer les composantes espace et temps. Dans cet objectif, je me suis notamment basé sur les fonctions orthogonales empiriques qui visent à décomposer un signal spatio-temporel en composantes orthogonales (decorréliées) suivant :

$$S(x, t) = \sum_{i=1}^n P^i(t) e^i(x)$$

Où $S(x, t)$ est le signal spatio temporel brut, $P^i(t)$ la composante temps ou composante principale et $e^i(x)$ la composante espace ou motif spatial. Les données sont généralement prétraitées en les normalisant par l'écart type afin de ne pas donner trop de poids aux pixels où la dynamique (le cycle saisonnier dans le cas du NDVI par exemple) est plus marquée que sur d'autres. Si l'objectif est d'analyser les fluctuations interannuelles, le cycle saisonnier est retiré. Afin de s'affranchir de cette contrainte d'orthogonalité, on peut également appliquer une rotation des motifs spatiaux qui visent à maximiser la variance locale au dépend de la variance globale sur l'ensemble de la région étudiée. En pratique, la matrice contenant les nouveaux motifs spatiaux \hat{E} après rotation s'écrit :

$$\hat{E} = RE$$

Parmi les techniques de rotation, la rotation VARIMAX (Richman 1986) est encore très utilisée. Il existe de nombreuses variantes à ces approches parmi lesquelles les fonctions orthogonales étendues qui permettent d'étudier la dynamique de ces motifs spatiaux ou d'analyser des jeux de données multi-variés dans l'objectif d'identifier des modes de variation communs; ou l'analyse en composantes indépendantes pour laquelle ce ne sont plus les moments d'ordre 2 (covariance) entre 2 composantes que l'on cherche à minimiser mais l'ensemble des statistiques d'ordre supérieur (l'information mutuelle). Nous avons testé cette approche dans le cadre du postdoctorat de Nathalie Philippon (2007-2) qui, sur notre cas d'étude, n'a pas montré de réelle plus-value par rapport à une simple décomposition en EOF assortie d'une rotation. Pour une description plus détaillée des fonctions orthogonales empiriques et de ses (nombreuses) variantes, j'invite le lecteur à se référer à Preisendorfer & Mobley (1988) et Venegas (2001).

Afin de diagnostiquer les possibles relations entre modes de variabilité et pseudo-oscillations climatiques, j'ai également utilisé des approches relativement simples telles que la corrélation linéaire avec ou sans retard ainsi que l'analyse fréquentielle afin d'identifier les oscillations basse fréquence des produits de surface communes avec les spectres connus des pseudo-oscillations climatiques. En d'autres termes, une corrélation ne suffisant pas pour prouver un lien de cause à effet, il s'agit de multiplier les preuves statistiques étayées par des hypothèses sur les processus plausibles expliquant ces liens afin de conforter son interprétation.

Ces approches sont uniquement basées sur des critères d'efficacité statistique : i.e. synthétiser un champ spatio-temporel par un nombre minimum de modes qui expliquent un pourcentage de variance du signal brut le plus élevé possible. Cela peut avoir un intérêt pour par exemple isoler un signal physique ou biologique d'un bruit. J'ai par exemple utilisé cette approche au centre européen pour reconstruire un jeu de données de surface foliaire initialement très bruité (2008-4). Néanmoins, cela ne signifie pas que cette décomposition facilitera l'interprétation physique ou biologique du champ spatio-temporel étudié. Par exemple, le premier mode de la décomposition en EOF d'un champ de NDVI sur une région où la saison de végétation est marquée comme au Sahel ouest-africain explique à lui seul autour de 80% de variance. Les motifs spatiaux sont assez uniformes et la composante principale témoigne du cycle annuel. Cela tient au fondement de la méthode qui cherche à maximiser la variance entre modes décorrélés. Or, il est peu vraisemblable que les processus soient complètement décorrélés. Dans l'exemple précédent, un des intérêts de la méthode serait d'être capable d'identifier des modes liés aux grands types fonctionnels ou sous l'influence de régimes climatiques contrastés. La rotation peut aider dans cet objectif. Il n'existe pas non plus de

méthode établie pour choisir le nombre de modes à conserver pour analyse ou pour trancher entre appliquer une rotation ou non par exemple. C'est le thématicien et sa connaissance du fonctionnement de la surface qui va permettre d'identifier les modes de variabilité qui ont sens physique ou biologique.

2.3. VARIABILITE ET PREVISIBILITE DU COUVERT VEGETAL SUR LE MAROC

Les conditions météorologiques et d'insolation influencent directement la dynamique des écosystèmes et, par voie de conséquence, les services qu'ils sont capables de rendre. Pour une croissance optimale, les plantes, notamment, ont des besoins thermiques, hydriques et en terme d'insolation. Si les conditions de croissance s'écartent de la plage optimale, elle subit un stress qui impacte le développement de nouveaux tissus (sa production) et qui peut aussi conduire, en fonction de son intensité, à la sénescence si l'entretien des tissus existants ne peut être assuré. J'ai beaucoup travaillé sur la caractérisation de la variabilité du couvert végétal en Afrique de l'Ouest (2005-1 ; 2005-3 ; 2007-2), en Amérique du Sud (2008-5) et sur l'Afrique de Nord. Les modes de variabilité sont ensuite interprétés en termes d'influences climatiques, de pratiques agricoles et de grands types fonctionnels. Les travaux sur le Maroc sont décrits ci-dessous car ils ont permis de déboucher sur un système de prévision précoce des rendements agricoles (toujours en cours de développement).

VARIABILITE DU COUVERT VEGETAL AU MAROC ET LIEN AVEC LE CLIMAT REGIONAL

Le climat au Sud de la Méditerranéenne est majoritairement semi-aride et présente une forte variabilité spatio-temporelle qui a un impact direct sur ses ressources en eaux et son agriculture (Bolle 2002). Sur l'Afrique du Nord et au Maroc en particulier où l'agriculture pluviale domine les surfaces cultivées (Bzoui 2005), la production agricole qui emploie 40% de la population active est étroitement liée à l'activité du couvert végétal (Balaghi et al. 2008; Brown, de Beurs, and Vrieling 2010). Les indices de végétation tels que le NDVI représentent une information unique pour suivre l'activité de la végétation dans cette région où le réseau de stations météorologiques est très éparé et les champs de précipitation issus de ré-analyses ou satellitaires sont très incertains (Brown and de Beurs 2008).

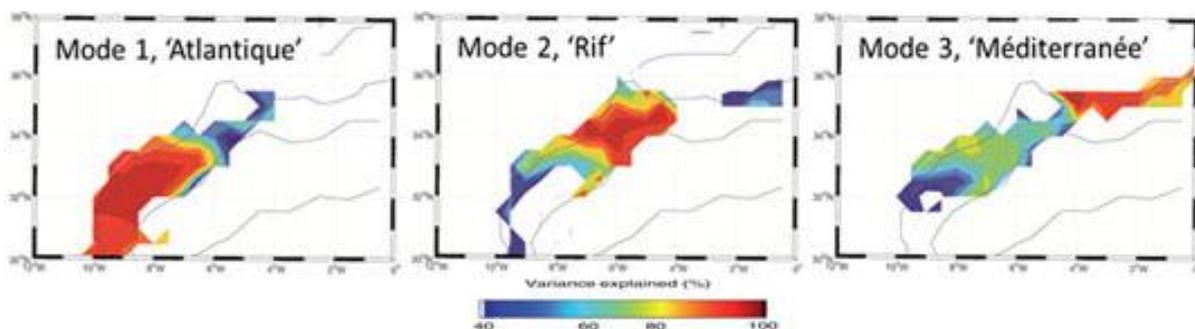


Figure 19 : Les trois principaux modes de variabilité du couvert végétal issus de la décomposition en fonctions empiriques orthogonales étendues de la série de NDVI AVHRR (1982-2008).

Sur la base des séries temporelles d'indice de végétation NDVI du capteur AVHRR, nous avons isolé les trois principaux motifs de variabilité spatio-temporelle du couvert végétal sur le Maroc qui couvre la région la plus arrosée du pays le long de la côte atlantique. Si de nombreuses cartes éco-

climatiques existent déjà, elles sont toutes principalement basées sur les pluies mesurées par le réseau de stations synoptiques. Le recours à une information, même indirecte, sur le couvert végétal, permet de mettre en évidence certaines particularités associant climat et grands types fonctionnels. En particulier, si la région du nord-ouest du Maroc, connue pour être sous l'influence atlantique ne fait qu'une seule et même région sur une carte climatique (Knippertz, Christoph, and Speth 2003), elle est scindée en deux sur la carte de végétation à cause d'une zone sud principalement composée de cultures annuelles pluviales et de jachères (mode 'Atlantique ') et une zone nord où la présence d'arbres est plus importante (Mode 'Riff'). Cela a des conséquences fortes sur les relations indirectes entre végétation et climat car si les annuelles pluviales sont directement impactées par l'historique de pluie saisonnier, les arbres ayant la possibilité de puiser l'eau plus profondément dans le sol, le sont moins.

Cette régionalisation a permis ensuite d'étudier le lien entre les principaux modes de variabilité atmosphérique et océanique influençant le climat du Maroc et les trois modes de variabilité du couvert végétal. Parmi les pseudo-oscillations climatiques, l'oscillation Nord Atlantique est bien connue pour influencer les précipitations et les températures au Maroc. La NAO est une variation naturelle du climat qui se caractérise par un dipôle de pression entre la dépression d'Islande et l'anticyclone des Açores. Sa phase positive correspond à un renforcement des deux centres d'action, avec un anticyclone plus marqué et une dépression plus creusée. Il en résulte une intensification des vents d'ouest des moyennes latitudes et des alizés de l'Atlantique subtropical. Le décalage vers le nord du courant-jet d'altitude favorise une course plus septentrionale des dépressions des moyennes latitudes, qui advectent un air océanique chargé en humidité sur le nord de l'Europe. On observe alors des températures plus douces et plus de précipitations sur l'Europe du Nord, la Scandinavie et jusqu'en Sibérie. A l'inverse, on observe des conditions plus sèches sur la région méditerranéenne. En phase négative, l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande sont affaiblis (Figure 10), produisant un décalage des dépressions des moyennes latitudes vers le sud et des conditions météorologiques inversées.

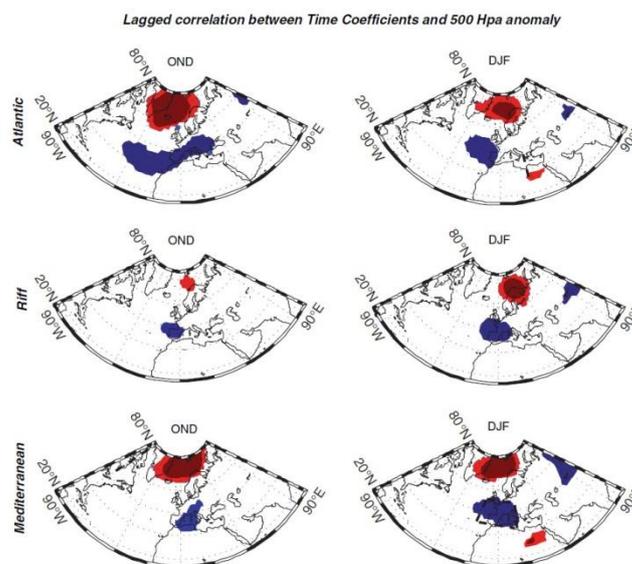


Figure 20 : Corrélation entre les composantes principales EEOF du NDVI (1982-2008) et les géopotentiels à 500 hPa. Les corrélations positives (négatives) sont en rouge (bleu).

Lamb & Pepler (1987) et Knippertz et al. (2003) montrent la forte corrélation entre l'indice témoignant de l'Oscillation Nord Atlantique (Hurrell and Loon 1997; Hurrell 1995) et les précipitations hivernales au Maroc. Cette influence de la NAO sur les précipitations hivernales s'étend d'ailleurs, de manière plus ou moins marquée, sur l'ensemble du bassin Méditerranéen (Gonza 2004; Xoplaki 2002). La Figure 20 montre les corrélations entre la composante principale et les champs de géopotentiels à 500 hPa (ré-analyse NCEP) pour chacun des 3 modes sur 1982-2008. Le dipôle plus ou moins marqué démontre l'influence de la NAO sur chacun des trois modes pendant les mois d'automne et d'hiver. J'ai ensuite étudié la relation avec les températures de surface des océans selon la même approche et j'ai notamment montré une influence forte du principal mode de variabilité de l'océan équatorial appelé « El Niño Atlantique » très tôt dans la saison (Septembre-Octobre-Novembre) sur les modes de variabilité du couvert végétal « Atlantique » et, dans une moindre mesure, « Méditerranéen ». Cette influence de l'Atlantique équatorial sur les précipitations au Maroc et, *in fine*, sur le développement du couvert est intéressante car elle a lieu sous la forme de téléconnection. Cassou et al. (2004) et Czaja & Frankignoul (1999) ont notamment montré qu'un océan équatorial plus chaud (plus froid) à l'automne entraîne une prédominance des phases négatives (positives) de la NAO durant l'hiver suivant au travers de l'impact sur la circulation de Hadley. Cette influence du phénomène El Niño Atlantique sur la variabilité temporelle du couvert végétal se retrouve également sur le spectre des composantes principales comme en témoigne le pic à 4.4 années sur le mode Atlantique (Figure 21), signature typique du phénomène (Tourre, Rajagopalan, and Kushnir 1999). J'ai ensuite considéré l'ensemble de ces prédictors potentiels pour construire des modèles empiriques de prévision précoce des composantes principales basés sur la régression linéaire multiple. Les performances de ces modèles sont excellentes pour le mode atlantique sous l'influence directe des grands jets d'ouest atlantique chargé d'humidité et caractérisé par une végétation annuelle dont le développement est très étroitement relié aux variations interannuelles des précipitations. Elles sont un peu moins bonnes pour le mode « Rif » dominé par des ligneux et pour le mode « Méditerranée » plus à l'intérieur des terres et influencé par des conditions locales notamment l'orographie. Suite à cette première étude, je me suis intéressé ensuite à la prévision des rendements en céréales.

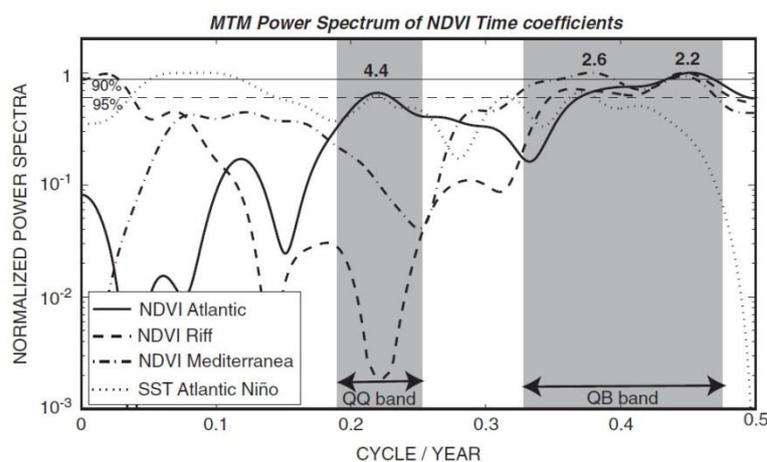


Figure 21 : Spectre de puissance des composantes principales du NDVI sur le Maroc pour les 3 modes ainsi que du mode El Niño Atlantique. Les bandes regroupant les fréquences quasi-quadrannales et quasi-biennales sont grisées (d'après 2014-4).

Afin de régulariser le marché des céréales, il est important d'anticiper l'importation dans le cas de production insuffisante pour la consommation intérieure ou pour le stockage des semences. La prévision saisonnière constitue, dans ces cas, un outil bien adapté à la prise de décision. Les développements de systèmes de prévision se sont développés en suivant deux approches: (1) des modèles empiriques liant les rendements à des indicateurs des conditions environnementales (température, précipitations, indices de végétation), (2) des modèles de cultures alimentés par la prévision climatique saisonnière (Baigorria, Jones, and O'Brien 2008; Phillips, Cane, and Rosenzweig 1998). Concernant ces derniers outils, ils souffrent néanmoins (1) de la forte demande en données d'entrée des modèles (Brisson et al. 2009), (2) des incertitudes sur les prévisions climatiques saisonnières (Hansen et al. 1999) et (3) de la disparité des échelles spatiale et temporelle entre les prévisions climatiques et les entrées des modèles de croissance (Hansen 2004). Les limitations évoquées ci-dessus conduisent la grande majorité des pays à adopter l'approche empirique. Sur le Maroc en particulier, Balaghi, Tychon, Eerens, & Jlibene (2008) ont démontré que des rendements prévisionnels de bonne qualité peuvent être obtenus environ 1 mois avant la récolte.

La plupart de ces études reposent sur la régression linéaire multiple tandis que les liens entre les rendements et les prédicteurs identifiés sont susceptibles d'être non linéaires. Les machines à vecteurs de support ou MVS (Kecman 2001) pourrait constituer une alternative intéressante pour la régression non-linéaire. La MVS est une méthode d'apprentissage automatique basée sur la théorie de la minimisation du risque structurel de Vapnik (1989). Les MVS pour la régression (- Support Vector Regression- SVR; Cortes and Vapnik, 1995) ont récemment été appliquées à la désagrégation de scénarii climatiques (Ghosh and Mujumdar 2009) et la prévision des débits (Kalra and Ahmad 2009). A notre connaissance, cette approche n'a jamais été appliquée à la prévision précoce des rendements céréaliers.

Par ailleurs, ces études reposent sur une série de prédicteurs locaux comme les températures, les précipitations et, pour certaines, une information sur l'activité du couvert au travers des indices de végétation mesurés depuis l'espace. C'est notamment le cas des travaux de Balaghi et al. (2008) déjà évoqués. Les liens indirects entre croissance des cultures et pseudo-oscillations climatiques à grande échelle, marqueurs indirects de conditions météorologiques locales, ne sont généralement pas concomitants à cause de l'éloignement de ces phénomènes qui influencent ces conditions par des télé-connexions et en raison de la réponse de la végétation aux précipitations qui est décalée et intégrée sur la saison de croissance. Certaines études récentes ont démontré que les rendements pouvaient être prédits plusieurs mois à l'avance en utilisant des informations climatiques à grande échelle (Letson et al. 2002; Martinez, Baigorria, and Jones 2009). Néanmoins, peu d'études ont exploité l'information prédictive contenue dans les indices et les variables climatiques pour la prévision précoce des rendements agricoles en dehors des zones sensibles à l'ENSO (Hansen 2004). En Méditerranée du Sud, la raison principale est que les effets de ce phénomène sont probablement noyés dans la forte variabilité de la dynamique climatique des latitudes moyennes (Bolle 2002).

L'objectif de ce travail était: (1) de caractériser les liens entre ces signaux climatiques et les rendements agricoles sur les provinces les plus productives au Maroc (2) de proposer des modèles statistiques pour les prédictions précoces de rendements en blé à l'échelle de ces provinces, en comparant la méthode de régression multi-linéaire classique avec des machines à vecteurs de support.

Dans un premier temps, nous avons analysé les corrélations entre d'une part les rendements et d'autre part les conditions météorologiques locales (précipitations, température), le NDVI et les indices climatiques témoignant des modes principaux de variabilité océanique et atmosphérique. Nous avons travaillé sur les 11 provinces les plus productives au Maroc que nous avons agrégées par groupe témoignant d'une variabilité inter-annuelle similaire (2014-3). Nous illustrerons les résultats ici sur une seule province (la province de Settat située sur la côte Atlantique).

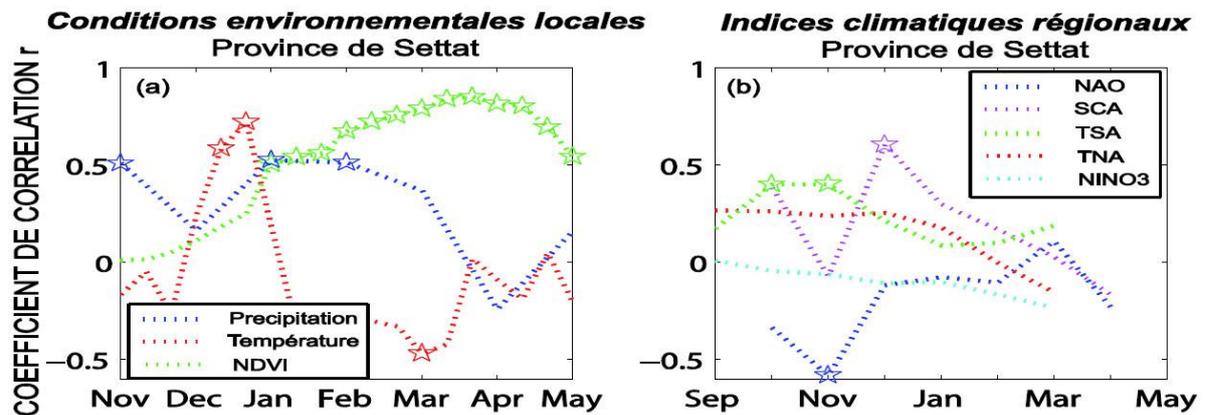


Figure 22 : Corrélation retardée entre les rendements en blé tendre et (a) les conditions météorologiques locales et de développement des plantes (température, précipitation et NDVI) et (b) les indices climatiques témoignant de la dynamique atmosphérique (ONA et scandinavian pattern –SCA-) et océanique (dans l'Atlantique tropical TNA et TSA et dans le pacifique équatorial NINO3). Les étoiles correspondent aux valeurs significatives à 95% (test de student).

Conditions locales : le développement phénologique du blé tendre est lié aux conditions météorologiques locales parmi lesquelles la disponibilité en eau et la température sont les plus importantes. La Figure 22a montre que des températures douces durant le début de l'hiver sont favorables aux rendements (corrélations positives fin décembre). Des températures anormalement basses durant cette période impactent l'émergence et le tallage en réduisant le nombre de pieds et, *in fine*, le rendement. Inversement, des températures trop élevées au printemps (corrélations négatives en mars) pénalisent les rendements car cette période correspond à la phase de remplissage des grains. De même, la corrélation significative du mois de novembre entre les rendements et les précipitations est à relier avec la phase de germination favorisée par des pluies précoces et régulières. Des pluies précoces favorisent également un semis précoce bien connu pour être favorable aux rendements. Enfin, les corrélations significatives avec les précipitations plus tard dans la saison s'expliquent par la nécessité d'éviter le stress hydrique durant la phase de croissance du blé qui suit le tallage pour obtenir des rendements importants. Enfin, les anomalies de NDVI se trouvent être significativement corrélées aux rendements plus tard dans la saison pendant toute la phase de développement à partir de janvier jusqu'à la sénescence, début avril. Cette corrélation positive est liée à la forte corrélation entre surface foliaire et masse aérienne et également au fait qu'une grande surface foliaire et le nombre de timons associés limitent la perte d'eau par évaporation du sol et ainsi améliorent l'efficacité d'utilisation de l'eau par les plantes (Cooper et al. 1987). Les liens mis en évidence entre les rendements d'une part et les conditions météorologiques du début de saison (température et précipitation) sont particulièrement intéressants dans une perspective de prévision précoce.

Climat régional et global : La Figure 22b montre le coefficient de corrélation décalé entre les rendements et les indices climatiques. ONA et le scandinavian pattern (SCA) sont 2 des principaux

modes de variabilité de l'atmosphère de l'hémisphère nord. Ils reflètent la circulation atmosphérique qui peut avoir un impact concomitant sur la température et les précipitations locales, alors que les indices TSA/TNA et NINO3 représentent, respectivement, les conditions de température de surface dans l'océan Atlantique et dans l'océan Pacifique qui peuvent être reliées au climat local par téléconnection. Aucun lien n'a été mis en évidence ici avec l'indice NINO3 liée à ENSO mais des travaux antérieurs tentant de mettre en évidence un lien entre les précipitations sur la zone euro-méditerranéenne et l'ENSO ont également été peu concluants. Par contre, la valeur de l'ONA en décembre est corrélée négativement au rendement du blé, probablement à travers l'influence de la température et du stress hydrique sur les premières phases du cycle du blé (germination, tallage) déjà discutée ci-dessus. En effet, la phase positive de l'ONA (l'intensification de la dépression d'Islande et le renforcement de l'anticyclone des Açores) est associée à un déficit de précipitations au-dessus de l'Europe du Sud et du bassin méditerranéen à travers une orientation des flux d'Ouest qui transportent les systèmes synoptiques loin du Nord de l'Afrique. Au cours de la phase négative, les effets sont inversés et cela entraîne des précipitations excédentaires sur l'Afrique du Nord et l'Europe du Sud par le biais de flux d'ouest affaiblis et une direction des flux plus zonale. Sur le Maroc, l'influence de l'ONA sur la côte ouest du pays où la province de Settat étudiée ici est située est forte (Knippertz et al. 2003). Le lien entre les rendements et le SCA en début de saison est également liée à la nécessité d'une bonne disponibilité en eau pendant la phase de tallage.

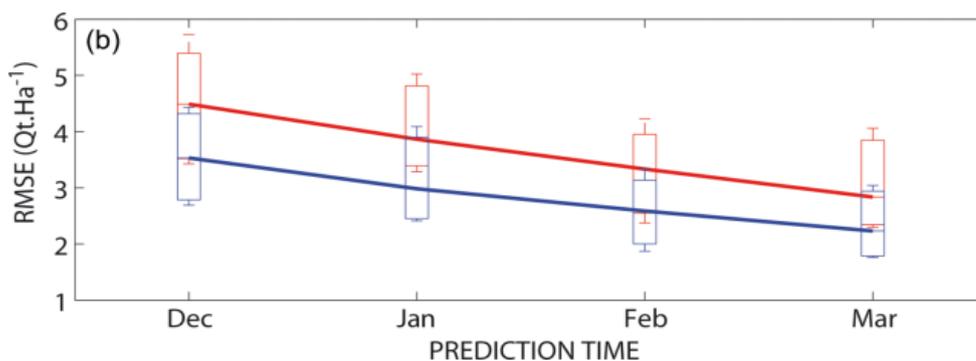


Figure 23 ; Erreur quadratique de prévision des rendements en blé pour les 11 provinces les plus productives au Maroc en fonction du mois de prévision (de Décembre à Mars soit de 5 à 2 mois avant la récolte) (rouge) régression linéaire multiple ; (bleu) Machine à vecteur de support.

Les résultats obtenus nous ont ensuite permis de construire des modèles statistiques pour la prédiction précoce des rendements céréaliers. Dans le cadre du volontariat international de Bastien Richard, nous avons identifié un certain nombre de prédicteurs potentiels parmi les précipitations, la température, le NDVI et les indices climatiques pris à différentes périodes de l'année. Les prédicteurs potentiels pour être sélectionnés devaient être corrélés à 95% avec les rendements et le lien devait avoir une explication physique réaliste. Nous avons ensuite construit tous les modèles possibles en balayant toutes les combinaisons de prédicteurs et identifié le meilleur sur la base de critères statistiques draconiens prenant en compte à la fois la proximité aux observations de rendements et la parcimonie des modèles (Critères d'information de Theil et d'Akaike). Par ailleurs, nous avons comparé la régression linéaire multiple (MLR) avec les machines à vecteur de support. La prévisibilité a été étudiée pour une prévision de Décembre à Mars (environ 5 mois à 2 mois avant la récolte) avec des critères statistiques draconiens pour la sélection du modèle afin de limiter sa complexité de modèle. La Figure 23 montre les performances des modèles obtenus pour les SVR et les MLR. Les

coefficients de corrélation ajustés et les erreurs quadratiques moyennes vont de, respectivement, 0,74 à 0,93 et de 1.3 à 2.8 qt / ha. En outre, l'approche SVR surpasse les modèles MLR pour tous les cas étudiés. Les meilleurs modèles obtenus pour une prévision en Mars passent les critères statistiques pour une mise en place opérationnelles avec des erreurs quadratiques inférieures à 2 qt / ha. Nous sommes en train de finaliser l'évaluation de la robustesse de ces modèles.

2.4. VARIABILITE DU COUVERT NEIGEUX SUR LE HAUT ATLAS MAROCAIN

Plus récemment, je me suis également intéressé à la variabilité du couvert neigeux au Maroc comme contribution essentielle aux apports de surface par la fonte des neiges. L'agriculture en aval de nombreux bassins méditerranéens est souvent possible en partie grâce au manteau neigeux dont la fonte permet de maintenir une bonne disponibilité en eau de surface au printemps et au début de l'été et contribue également à la recharge des nappes. La télédétection est le seul outil disponible pour suivre la dynamique rapide du couvert neigeux sur les massifs montagneux en région semi-aride.

CARACTERISATION DE L'ENNEIGEMENT ET TENDANCE

Nous avons, pour la première fois, caractérisé la dynamique des surfaces enneigées sur la région du Tensift à l'aide de nouveaux produits dérivés du capteur VEGETATION (2010-1). Dans le cadre de la thèse d'Ahmed Marchane (UCAM), nous avons étendu l'étude à l'ensemble de l'Atlas marocain et évalué les produits MODIS journalier de Fraction de couverture neigeuse (produits MOD10A1 ; 2015-5). En préalable, nous avons proposé un algorithme pour combler les trous dus à l'enneigement (qui peut-être persistant sur les zones montagneuses) basé sur la recherche de voisin clair dans l'espace et dans le temps. Ces produits corrigés ont ensuite été (1) validés avec des mesures *in situ* automatiques de profondeur de neige et une série de 19 images de couverture neigeuse déduites des données du capteur Formosat-2 (8-m de résolution) et (2) utilisés pour caractériser les tendances (test Man-Kendall) des surfaces enneigées pour les bassins versants marocains au fonctionnement pluvio-nival.

Pour illustrer les résultats obtenus, la Figure 24 montre la tendance de la durée d'enneigement bi-mensuelle sur Février-Mars et Avril-mai pour la période 2001-2013. En Février et Mars, la tendance à la hausse était importante sur la région (96,4% des pixels): 36,8% des pixels ont montré une tendance positive significative et la majorité de ces pixels sont situés à haute altitude. En revanche, Avril-Mai est la seule période où la tendance à la baisse a dominé sur la région avec 68,8% de la superficie (seuls 11,5% des pixels passent le test de Mann-Kendall). L'essentiel de cette baisse observée a été détectée en dessous de 2500 m d'altitude, avec 76,1% des pixels situés en dessous de cette altitude montrant une tendance à la baisse (15,1% significatif). Toujours en gardant à l'esprit le pourcentage limité de pixels avec des tendances significatives, il est intéressant de souligner que la plupart des tendances observées sont accord avec certaines études antérieures. Bormann et al. (2012), en particulier, ont observé un comportement proche dans le sud-est de l'Australie avec une tendance à la baisse de la durée de la couverture de neige principalement attribuable à une fonte précoce au printemps. Le manteau neigeux dans cette région est soumis à plusieurs cycles d'accumulation/ablation car le cycle diurne de la température passe par le point de fusion. Brown &

Robinson (2011) et Derksen & Brown (2012) ont également montré une diminution de la durée de la couverture de neige pendant les mois de printemps pour l'ensemble de l'hémisphère Nord. La baisse observée pour les basses altitudes est également compatible avec l'étude de Brown & Mote (2009) qui a expliqué que la baisse la plus significative de la durée de la couverture neigeuse était susceptible de se produire là où les températures de l'air étaient proches de 0 ° C. Dans un contexte de changement climatique, la hausse des températures pendant la phase d'ablation au printemps pourrait fortement impacter le manteau neigeux.

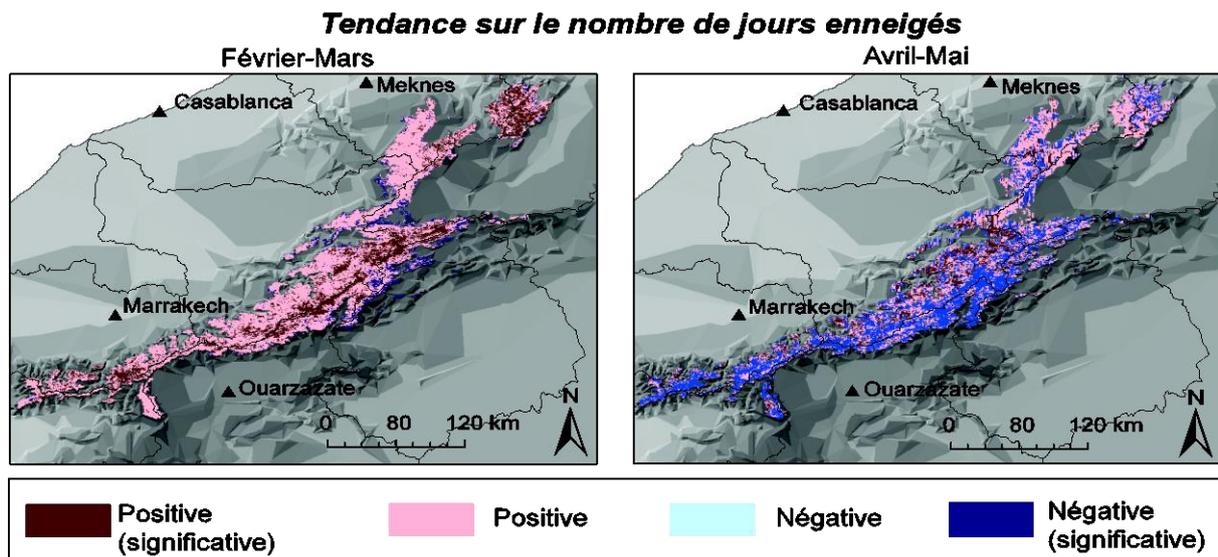


Figure 24 : Tendence de la durée d'enneigement bimensuelle dérivé des produits de fraction de surface enneigée MODIS journaliers pour février-mars (a) et mars-avril (b) sur 2001-2013 (d'après 2015-5).

IMPACT DE L'OSCILLATION NORD ATLANTIQUE

Dans un deuxième temps, nous nous sommes intéressés à l'influence complexe exercée par l'oscillation nord-atlantique sur la dynamique du couvert neigeux au Maroc (2016-3). Les résultats obtenus sont très intéressants car ils montrent notamment que ce lien est inversé par rapport aux pluies : si la phase négative de la NAO est associée à un excédent de pluie par rapport à la normale, nous avons montré qu'elle se manifestait étonnamment par une fonte plus précoce au printemps. Ce résultat étonnant est principalement lié à l'influence de la NAO sur les températures qui sont plus froides pendant les phases positives. A titre illustratif, la Figure 25 montre les résultats de la corrélation entre NAO et température. Contrairement à la corrélation avec les précipitations (non montré) qui reste cantonnée à la côte atlantique et qui disparaît dès la fin de l'hiver (février), la corrélation avec les températures pénètre à l'intérieur du pays y compris au Sud de l'Atlas et persiste tardivement dans la saison. Les températures plus fraîches associées à la phase positive de la NAO entraînent principalement une fonte plus tardive au printemps. Plusieurs études ont montré qu'un réchauffement climatique pourrait entraîner une prédominance de la phase positive de la NAO (Rind et al. 2005; Rodriguez-Puebla and Nieto 2010). Si cela aurait des conséquences négatives pour les pluies sur le Nord de l'Afrique, cela pourrait également entraîner paradoxalement un enneigement plus tardif.

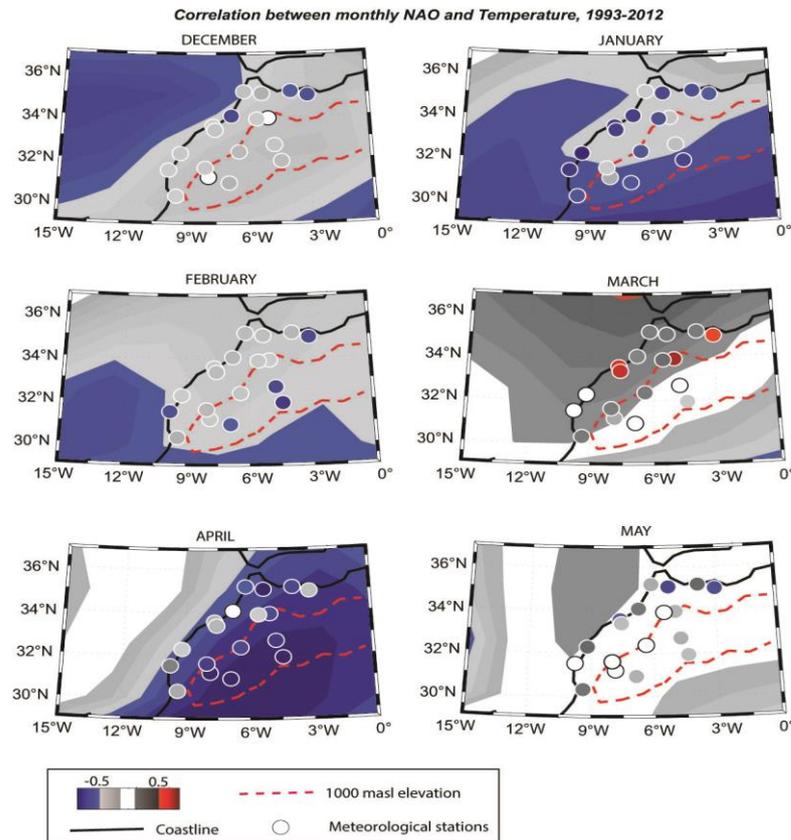


Figure 25 : corrélation simultanée entre, d'une part, les températures mensuelles mesurées par le réseau de stations synoptiques au Maroc (points) et d'autre part, l'oscillation Nord-Atlantique (1993-2013).

3. SUIVI DU BESOIN EN EAU DES CULTURES ET AIDE A LA PLANIFICATION DE L'EAU AGRICOLE

3.1. SUIVI DE L'EVAPOTRANSPIRATION DES CULTURES ANNUELLES IRRIGUEES

Dans les pays du Sud de la Méditerranée et du Moyen Orient, la part des prélèvements pour l'agriculture irriguée sur les ressources en eau conventionnelles dépasse 80% (Frenken 2005) pour à peine 20% des zones arables (Blinda and Giraud 2012). Si des efforts considérables, appuyés par des politiques publiques ambitieuses, ont été effectués pour moderniser les pratiques agricoles (conversion au goutte-à-goutte, techniques de water harvesting ...), l'eau est toujours gaspillée en grande quantité : les apports dépassent le besoin en eau des cultures de 30 à 50 % (Hamdy & Katerji 2006). Depuis mon affectation au Maroc dans le cadre du Laboratoire Mixte International TREMA (2015-4) et en réponse à une attente forte de nos partenaires académiques et gestionnaires, j'ai beaucoup investi sur le développement d'outils de suivi et sur l'analyse de la dynamique de l'évapotranspiration des cultures irriguées du Sud de la Méditerranée et de sa partition entre évaporation du sol et transpiration du couvert. Les outils développés visent à terme à une meilleure planification de l'eau d'irrigation notamment sur la base de l'eau réellement utilisée par la plante (la transpiration). Ces travaux sont menés dans le cadre de 4 thèses et s'organisent autour de 3 axes :

PARTITION DE L'EVAPOTRANSPIRATION DANS LES MODELES TSVA

Le suivi de l'évapotranspiration et de sa partition sur les couverts complexes (couverts épars, agroforesterie avec cultures intercalaires ...) de la Méditerranée semi-aride présente tout d'abord des enjeux de modélisation en terme de représentation des transferts radiatifs et turbulents. En particulier, si la représentation de la surface par un seul bilan d'énergie pour la végétation et pour le sol (et donc une température mixte) est suffisante pour prédire l'évapotranspiration dans la plupart des cas, ce n'est plus vrai pour un couvert épars face à une insolation forte où les températures d'un sol sec en surface et d'un couvert qui puise l'eau dans un compartiment racinaire potentiellement bien rempli grâce à l'irrigation sont très différentes. Dans le cadre de la thèse de Ghizlane Aouade (UCAM), nous évaluons actuellement la nouvelle version « double-source » (i.e. avec un bilan d'énergie séparé pour le sol et la végétation) du modèle ISBA appelée ISBA-MEB (pour Multiple Energy Balance) en collaboration avec Météo-France sur un couvert de blé irrigué et un couvert d'Olivier irrigué dans le cadre de l'observatoire TENSIFT. Ce travail est étendu aux couverts pluviaux dans le cadre de la thèse de Wafa Chebbi en Tunisie (INAT, Tunisie). En collaboration avec V. Le Dantec (CESBIO) et Saïd Khabba (UCAM), j'ai mis en place une expérience visant à mesurer la partition sur un site de blé pluvial grâce à des micro-capteurs de flux de sève. En parallèle, cette partition est également mesurée expérimentalement à l'aide de la technique des isotopes stables de l'oxygène (2016-4) qui fait l'objet de la première partie des travaux de thèse de Ghizlane.

A titre illustratif, la Figure 26 montre les premiers résultats obtenus avec l'ancienne et la nouvelle version du modèle ISBA-A-gs. Outre les meilleures performances obtenus avec la version double bilan d'énergie pour la prédiction de la partition, cette version améliore aussi systématiquement les autres composantes du bilan d'énergie de surface et notamment les flux de chaleur latente et sensible. Nos travaux à venir vont viser à améliorer la paramétrisation de la résistance du couvert notamment pour une meilleure reproduction des phases de stress où le modèle a tendance à sur-réagir (Figure 26).

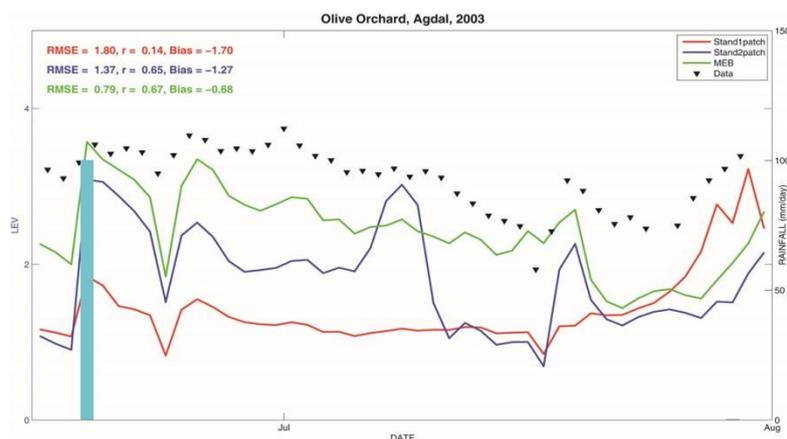


Figure 26 : Transpiration journalière (mm/jour) sur un site d'Olivier irrigué par la technique gravitaire. Comparaison entre plusieurs configurations du modèle ISBA-A-gs dont la nouvelle version à double bilan d'énergie (trait vert).

DETECTION DU STRESS HYDRIQUE INSTANTANEE PAR TELEDETECTION THERMIQUE

Si les modèles TSVAs présentent un intérêt pour la compréhension des processus, leur potentiel d'application à grande échelle en contexte opérationnel est limité à cause d'entrées trop

nombreuses et difficiles à renseigner à l'échelle de la parcelle à commencer par les apports d'eau d'irrigation. Les modèles de bilans d'énergie sont forcés par une mesure de la température de surface. La température radiative de surface est une signature indirecte des conditions hydriques de surface quand la surface est stressée. Quand une culture subit un stress, sa température augmente car la dissipation d'énergie que constitue le flux d'évapotranspiration est fortement diminuée voire stoppée en réponse à la fermeture des stomates. Ces modèles instantanés résolvent le bilan d'énergie de surface au passage du satellite. Contrairement aux modèles qui simulent explicitement l'état hydrique de la surface par la résolution d'un bilan hydrique, ces outils ne nécessitent pas de connaître les apports d'eau d'irrigation qui sont difficiles à connaître avec précision au-delà de l'échelle parcellaire.

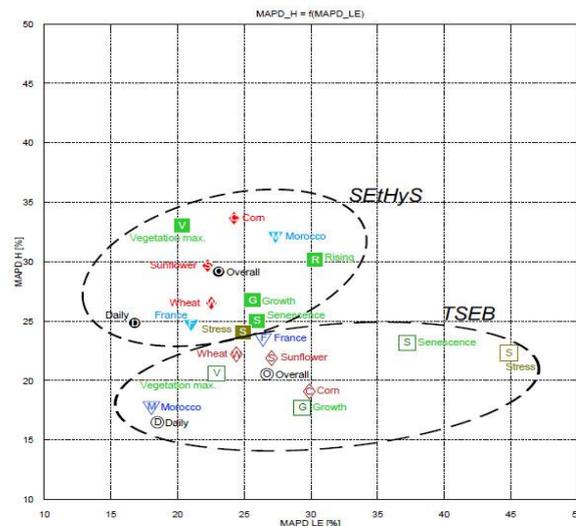


Figure 27 : performances comparées du modèle TSVA SETHYS et du modèle de bilan d'énergie TSEB pour différentes cultures et différentes phase de croissance en France et au Maroc.

Nous avons tout d'abord inter-comparé plusieurs modèles de bilan d'énergie (2014-2) sur la vallée du Yaqui au Mexique qui a fait ressortir les bonnes performances du modèle Two Source Energy Balance ou TSEB (Anderson et al. 1995). Dans le cadre de la thèse de Guillaume Bigeard, nous avons ensuite évalué les performances et le domaine de validité de TSEB (2016-6, à soumettre) par comparaison à un modèle TSVA (le modèle SETHYS ; Coudert et al., 2006) sur plusieurs sites instrumentés couvrant plusieurs cultures pluviales et irriguées en France et au Maroc. La Figure 27 montre les performances de ces outils (la MAPD est l'erreur quadratique relative en pourcent) pour simuler les flux turbulents de chaleur sensible et latent par phase de croissance et par type de culture. Tout d'abord, le nuage de points du modèle TSVA est plus concentré mettant ainsi en évidence la plus forte robustesse du modèle indépendamment du stade phénologique et de la culture considérée. Par opposition, le modèle TSEB offre de meilleures performances pour le flux de chaleur sensible mais pour le flux de chaleur latente, si les performances sont similaires pour la plupart des cas, le modèle témoigne d'une faiblesse pour les périodes de stress et en phase de sénescence. En effet, sans résoudre un bilan hydrique, le stress hydrique est détecté indirectement par la différence entre la température de surface et la température de l'air. En phase de sénescence, c'est la partition entre végétation verte et végétation sèche qui peut être mal représentée ou la variation des propriétés radiatives de la végétation sénescence (albédo, émissivité) qui n'est pas prise en compte. De manière générale, les performances de TSEB avec des valeurs de paramètres tirées de la littérature restent très

acceptables par rapport à SETHYS qui, par opposition, a été calibré à la fois par type de culture et par phase phénologique.

Dans le cadre de la thèse d'A. Diarra (UCAM/Paris VI), nous avons ensuite ciblé nos travaux sur l'évaluation de la capacité de TSEB à détecter un stress hydrique sur plusieurs cultures annuelles du Sud de la Méditerranée dans un objectif appliqué d'aide à la planification de l'irrigation. Le stress est une variable très informative pour l'évaluation de ce type d'approche car elle permet de quantifier la capacité du modèle à reproduire correctement l'écart de l'évapotranspiration réelle à l'évapotranspiration potentielle qui explique à elle seule un pourcentage de variance du signal très élevé et donc l'apport de la mesure de température de surface en tant que proxy des conditions hydriques. Nous avons ensuite comparé ses performances à une méthode de référence en agronomie, la méthode FAO-56 à double coefficient (Allen, Pereira, et al. 1998) qui simule explicitement l'état hydrique de surface mais nécessite en contre-partie de renseigner précisément les apports d'eau (2016-7, à soumettre). La Figure 28 montre l'évaluation d'un indice de stress sur plusieurs sites de blé instrumentés dans la région du Tensift par les modèles TSEB et FAO-56 à double coefficient. Même si cette dernière donne des valeurs plus réalistes pour les valeurs de stress élevées, l'approche du bilan d'énergie détecte parfaitement les stress modérés. Ces résultats ouvrent la voie à l'inversion d'un profil d'humidité racinaire et à leur utilisation pour l'aide à la planification de l'irrigation.

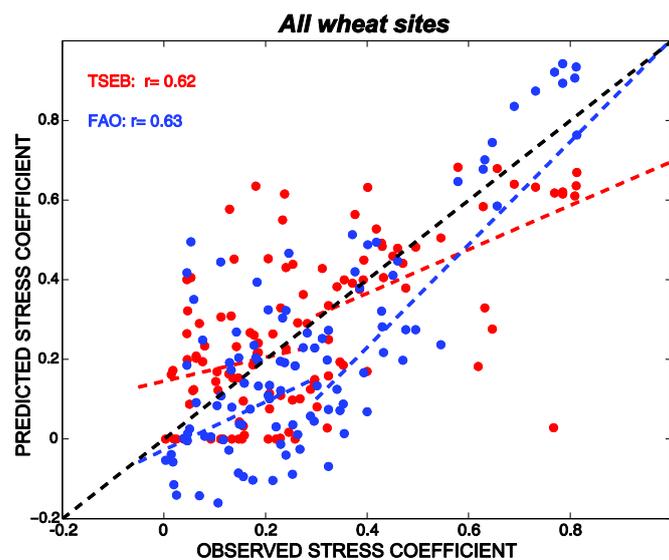


Figure 28 : Stress hydrique (1-ETR/ETP) observé et simulé par le modèle TSEB et la méthode FAO-56 sur 3 sites de blé dans la région de Marrakech (Diarra et al., 2016, à soumettre).

SUIVI EN CONTINU DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION PAR ASSIMILATION DE DONNÉES DANS LES MODELES TSVAS

Les approches basées sur une observation de la température de surface sont inopérantes en cas de couverture nuageuse persistante. Par opposition, les modèles basés sur un bilan hydrique permettent un suivi continu mais leurs prédictions doivent être corrigées notamment par assimilation de données. Fort du constat que de nombreux produits liés plus ou moins directement à l'évapotranspiration sont maintenant disponibles ou pourraient l'être dans un avenir proche (humidité du sol, température de surface ou évapotranspiration instantanée dérivé des outils décrits

ci-dessus), nous avons tenté de déterminer quel était le produit ou la combinaison de produit le(s) plus pertinent(s) pour contraindre l'évapotranspiration des couverts irrigués prédite par un modèle TSVA. Dans le cadre du VI d'Adrien (2013-16), deux techniques d'assimilation de données ont été comparées (séquentielle: le filtre de Kalman étendu et variationnelle: un 2DVAR simplifié). Dans cette étude préliminaire, nous avons construit un jeu de données synthétiques sur un site expérimental de blé situé dans la plaine du Haouz de Janvier à Mai 2003. La Figure 29 présente les résultats pour le 2DVAR. Ces résultats montrent que pour améliorer l'évapotranspiration à travers l'analyse de l'humidité du sol de la zone racinaire, l'humidité superficielle est l'observation la plus informative (amélioration d'environ 40% de l'erreur sur l'évapotranspiration prédite). Si la combinaison de l'humidité superficielle et d'une estimation instantanée de l'ETR quand elle était disponible présente le meilleur résultat, la combinaison de plusieurs produits n'améliore les résultats que de manière très marginale (quelques % d'amélioration). Par ailleurs, l'assimilation est très efficace pour de courtes fenêtres d'assimilation. Il est également montré que la propagation de la matrice d'erreur effectuée par le filtre de Kalman étendu ne représente pas une valeur ajoutée importante par rapport à la matrice constante utilisée avec le 2DVAR.

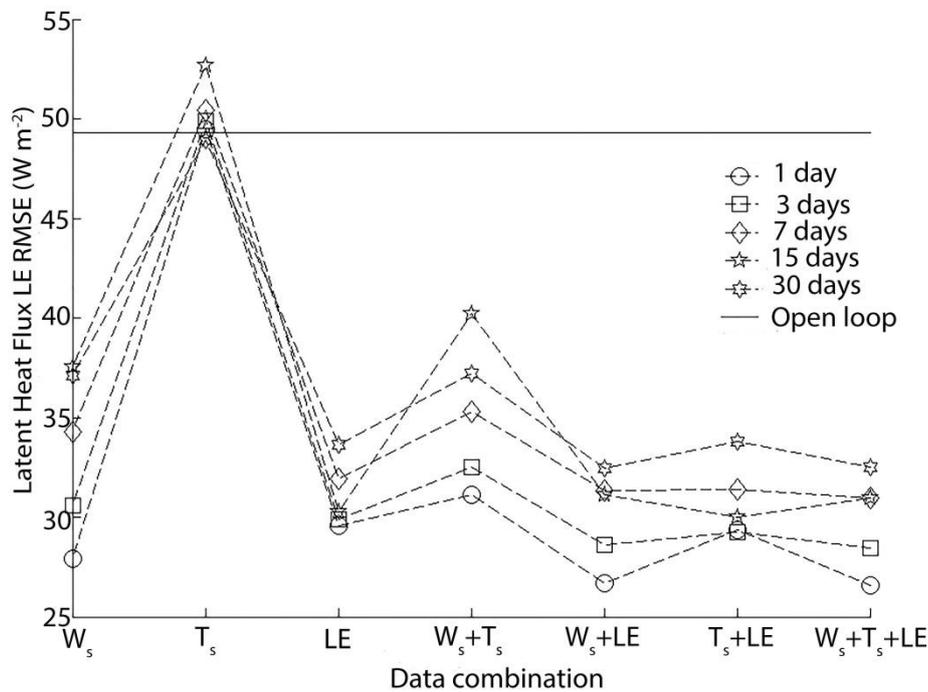


Figure 29 : Résultats de l'assimilation de différents produits de télédétection (W_s : humidité superficielle ; T_s : température de surface et LE : évapotranspiration instantanée) dans le modèle ISBA grâce à un jeu de données synthétique construit sur un site de blé instrumenté de la plaine du Haouz (Marrakech, Maroc) pour plusieurs combinaisons de produits et plusieurs temps de revisite.

Dans le cadre de la thèse de Y. Malbeteau (UPS), nous étendons ces travaux à l'estimation inverse des apports d'eaux d'irrigation qui sont très incertains à l'échelle parcellaire.

3.2. APPLICATION A L'AIDE A LA PLANIFICATION DE L'EAU AGRICOLE

Enfin, la co-direction de TREMA m'a donné l'opportunité d'évaluer ces approches dans des contextes applicatifs pour l'aide au pilotage de l'irrigation. Avec Michel Le Page (ingénieur IRD/CESBIO) et nos partenaires de l'UCAM et de l'ORMVAH, nous avons mené une expérience originale directement chez

l'agriculteur visant à tester en conditions réelles la faisabilité de planification des calendriers d'irrigation par la méthode FAO-56 à double coefficient pilotée par une série temporelle d'images satellitaires optiques (2014-5 ; voir aussi le documentaire sur les activités de TREMA : <https://youtu.be/p2ZlqBarOgk>). Les images ont été acquises par le capteur SPOT4 dans le cadre de l'expérience Take5 qui visait à fournir une série temporelle d'images à une résolution décimétrique tous les 5 jours. L'irrigation d'une parcelle de référence a été implémentée par l'agriculteur selon un calendrier d'irrigation essentiellement empirique, alors que l'irrigation de notre parcelle test est conduite par la méthode FAO-56 double coefficient. Le début de l'expérience a été particulièrement chaotique car la parcelle test n'a pas bénéficiée d'une première irrigation capitale pour limiter l'encroustement du sol entre le semis et l'émergence à cause d'une incompréhension avec l'agriculteur. Cela a fortement pénalisé la phase de tallage. Par la suite, grâce à une meilleure distribution des irrigations (et à un stress important de la parcelle de référence au moment du remplissage des grains), le développement de la parcelle test a rattrapé celui de la parcelle de référence. Les rendements en grain sont identiques et le rendement en biomasse aérienne de la parcelle de référence est supérieur de 20% à celui de la parcelle test. Néanmoins, en termes d'utilisation de l'eau, le bilan chiffré est plutôt positif avec une efficacité de production de $0.152 \text{ m}^3 / \text{kg}$ pour la parcelle de test contre $0.134 \text{ m}^3 / \text{kg}$ pour la parcelle de référence. Ce type d'expérience est particulièrement important notamment pour promouvoir une irrigation basée sur la demande de la plante auprès des agriculteurs à qui on alloue une quantité d'eau en début de saison et qui sont plutôt enclins à l'utiliser en intégralité indépendamment des besoins réels. Cette expérience a également permis de déboucher sur le développement d'un service web d'aide au pilotage de l'irrigation : l'outil SatIrr développé par M. Le Page dont le prototype est consultable à l'adresse suivante : <http://osr-cesbio.ups-tlse.fr/SatIrr/>.

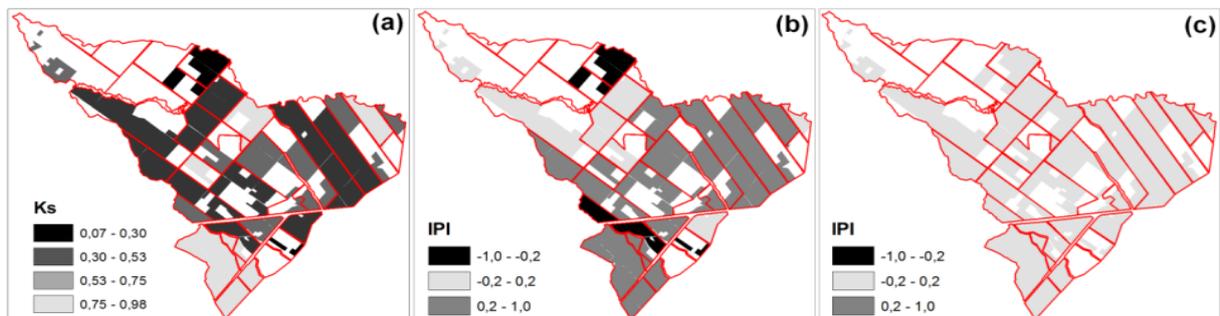


Figure 30 : Optimisation des tours d'eau d'irrigation sur le périmètre irrigué R3 (Marrakech): (a) carte du coefficient de stress hydrique K_s avant le tour d'eau; (b) Indice de priorisation de l'irrigation (IPI) avant le tour d'eau; (c) IPI après optimisation. Les valeurs négatives (positives) de l'IPI correspondent à une irrigation tardive (précoce).

Nous nous sommes ensuite intéressés à l'aide à la planification de l'irrigation au-delà de la parcelle. Nous avons pour cela ciblé les périmètres irrigués appelés « modernes » qui sont approvisionnés par les barrages. L'eau est ensuite distribuée par gravité principalement par le biais d'un réseau hiérarchique de canaux en béton avec des structures de division sophistiquées à tous les points de contrôle. Dans le cadre de la thèse de S. Belaqziz, nous avons développé un nouvel indice *ad hoc* de priorisation de l'irrigation (IPI ; 2013-2) destiné à l'évaluation spatialisée de la planification des tours d'eau d'irrigation. Cet indice prend en compte le stress hydrique (calculé à partir du contenu en eau dans la zone racinaire avec la méthode FAO-56 double coefficient) et le calendrier actuel de planification de l'irrigation par l'ORMVAH. Il varie entre -1 pour les champs fortement stressés et une

irrigation prévue trop tardivement à la fin du tour d'eau à 1 pour un champ non stressé et un arrosage trop précoce prévu au début du tour d'eau. L'étape suivante a consisté à utiliser cet indice pour optimiser le tour de l'eau d'irrigation en minimisant l'IPI (c.-à en maximisant le nombre de champs irrigués au bon moment en moyenne) avec une approche multi-critères semi-stochastique prenant en compte la plupart des contraintes de réseau du système actuel (capacité de canaux en béton, synchronisation des actions du personnel disponible, les distances géographiques et les capacités de débit des canaux). Les résultats théoriques obtenus dans un périmètre irrigué ont montré une amélioration significative des valeurs de l'IPI (Figure 30) qui est associée à une économie potentielle d'eau d'environ 25%.

Enfin, sur la base des cartes d'évapotranspiration produites, l'office qui gère l'eau d'irrigation a quantifié d'une part l'efficacité de l'utilisation de l'eau (2011-3) et d'autre part l'adéquation de la répartition par rapport à la demande réelle des cultures et l'équité de partage de l'eau entre secteurs irrigués et entre les agriculteurs d'un même secteur d'autre part (2013-1). Ces outils ont également été utilisés pour préciser la demande agricole dans un système de modélisation intégré du fonctionnement hydrologique du bassin versant du Tensift (2012-2).

BILAN ET PERSPECTIVES

Au cours de mon parcours, j'ai eu l'opportunité d'utiliser l'outil télédétection dans plusieurs contextes et d'acquérir une connaissance des techniques d'assimilation et d'inversion de données satellitaires. J'espère avoir réussi à démontrer une démarche méthodologique originale d'extraction d'information d'observations satellitaires dans différentes thématiques liées à l'étude du fonctionnement des surfaces continentales ainsi qu'une exploitation de ces informations pour répondre à des questions plus aval notamment à enjeux en terme de développement. Depuis mon recrutement à l'IRD, je me suis rapproché d'une recherche un peu plus finalisée pour l'aide à la gestion et à la planification des ressources. J'ai, en particulier, eu la chance de monter et coordonner avec mon collègue Saïd Khabba de l'UCAM le laboratoire mixte international « Télédétection et Ressources en Eau en Méditerranée semi-Aride ». Je tenais à dire quelques mots de cette activité qui a constitué ma première expérience de coordination car elle a été aussi l'occasion d'une réflexion sur le cadre et la finalité de mon métier de chercheur dont découlent naturellement les perspectives scientifiques que je décris ci-dessous.

Au niveau scientifique tout d'abord, j'ai découvert l'hydrologie des bassins versants agricoles fortement anthropisé. Les processus qui gouvernent le régime hydrologique sont très non-linéaires avec des écoulements intermittents et la présence de neige complexifie encore le système en jouant un rôle tampon sur les débits avec un fort ruissellement décalé au moment de la fonte au printemps. Néanmoins, les sources d'approvisionnement en eau pour l'agriculture sont multiples. Une part importante de l'eau agricole est notamment prélevée dans les aquifères déjà sur-exploités dans de nombreuses régions mais une partie, encore très incertaine, contribue à son tour à la recharge des nappes par retour d'irrigation. L'impact de l'agriculture sur les différents flux et réservoirs est donc encore très incertain pourtant la demande en eau agricole représente le principal levier d'économie d'eau dans le Sud de la Méditerranée. C'est d'autant plus une nécessité que la compétition entre les secteurs, la croissance démographique et les changements climatiques vont réduire la part d'eau qui lui sera affecté dans le futur. Si j'ai pu contribuer à préciser certains flux et termes du bilan hydrologique (demande en eau agricole, contribution du manteau nival) en apportant mes compétences en télédétection et en assimilation de données dans les modèles, j'ai mené l'essentiel de mes travaux un peu indépendamment pour chacun des hydrosystèmes dominants dans la région : d'un côté l'agriculture irriguée de plaine et de l'autre le manteau neigeux et l'hydrologie de montagne. Je souhaiterais maintenant m'orienter vers l'étude du fonctionnement hydrologique intégré des bassins versants semi-arides où l'agriculture occupe une place importante. Pourtant nous ne disposons pas d'outil intégré à l'heure actuelle pour à la fois quantifier l'impact de l'agriculture sur les ressources en eaux du bassin et pour établir des scénarios d'évolution de ces ressources sous l'effet des changements globaux.

En termes d'animation scientifique et de coordination ensuite, TREMA regroupe une cinquantaine de scientifiques et d'ingénieurs appartenant à plusieurs institutions scientifiques au Maroc (Université Cadi Ayyad de Marrakech, Direction de la Météorologie Nationale, Centre National de l'Énergie, des Sciences et des Techniques Nucléaires –équivalent du CEA au Maroc-) et en France (CESBIO) et aux organismes gestionnaires de l'eau de la région de Marrakech (Agence de Bassin Hydraulique du Tensift, Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Haouz). Avec Saïd, nous nous sommes attachés à ce que TREMA repose sur une réelle co-direction qui a été formalisée par une gouvernance équilibrée et impliquant une mise en commun des budgets de l'ensemble des projets du laboratoire

qui ont bénéficié de l'effet levier du LMI. Une des principales réalisations du laboratoire qui a pour vocation à mener une recherche finalisée en lien avec les politiques publiques est d'avoir atteint le niveau de maturité pour proposer des outils d'aide à la décision pour les grandes institutions en charge de la gestion de l'eau comme en témoignent les deux réalisations récentes l'outil web d'aide à décision d'irrigation SatIrr développé par mon collègue M. Le Page (<http://osr-cesbio.ups-tlse.fr/Satirr/>) et l'outil d'aide à la décision en matière de gestion intégrée des ressources en eau SAMIR-WEAP-MODFLOW (2012-2). Par contre, la promotion de ces outils dont je suis persuadé qu'ils pourraient contribuer à devenir de vraies solutions d'adaptation à la pénurie de l'eau dans la région doit être poursuivie car leur utilisation par les opérateurs et plus encore par les utilisateurs finaux tels que les agriculteurs est toujours limitée.

PERSPECTIVES : RATIONALISER L'UTILISATION DE L'EAU AGRICOLE DANS UN AVENIR INCERTAIN

Dans les pays du Sud de la Méditerranée et du Moyen Orient, la part des prélèvements sur les ressources en eau conventionnelles pour l'agriculture dépasse 80% (Frenken 2005) pour à peine 20% des zones arables (Blinda and Giraud 2012). Si des efforts considérables, appuyés par des politiques publiques ambitieuses, ont été effectués pour moderniser les pratiques agricoles (conversion au goutte-à-goutte, techniques de water harvesting ...), l'eau est toujours gaspillée en grandes quantités : les apports dépassent le besoin en eau des cultures de 30 à 50 % (2013-6; Hamdy and Katerji 2006). Une action sur la demande en eau agricole représente ainsi le principal levier d'économie d'eau dans la région. C'est d'autant plus une nécessité que la compétition entre les secteurs, la croissance démographique et les changements climatiques (Giorgi 2006) vont réduire la part d'eau affectée à l'agriculture dans le futur (Bleu 2009; Pinstруп-Andersen and Pandya-Lorch 1997). Enfin, l'agriculture irriguée contribue à la recharge des aquifères mais ces « retours » d'eau sont très incertains.

Dans ce contexte, mon projet a pour double objectif général de contribuer à (1) quantifier au présent et prévoir l'impact de l'agriculture sur les ressources en eau de surface et souterraine sous l'effet des changements globaux en Méditerranée du Sud et (2) à rationaliser l'utilisation de ces ressources dans ces régions.

Améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau par l'agriculture et prévoir les impacts sur les différents réservoirs nécessitent le développement d'outils intégrés aux échelles de la prise de décision : de la parcelle pour l'agriculteur qui planifie ses irrigations au territoire national pour l'état qui définit les politiques publiques en passant par l'échelle intermédiaire, celle du bassin pour la gestion intégrée des ressources et l'aménagement des bassins.

Cela passe tout d'abord par un diagnostic de l'efficacité réelle de l'utilisation de l'eau des cultures irriguées et pluviales et notamment des politiques publiques ambitieuses visant à économiser l'eau agricole (conversion, water harvesting). Cela constitue le premier axe de mes travaux. Le deuxième axe a pour objectif de quantifier au présent et prévoir l'impact de l'agriculture sur les ressources en eau de surface et souterraine sous l'effet des changements globaux en Méditerranée du Sud. Ces travaux, qui constituent l'axe central de mes activités, s'inscrivent dans l'effort de développement d'une plateforme numérique de modélisation-observation du fonctionnement éco-hydrologique nourrie par l'observation satellitaire et *in situ*, s'appuieront sur mes travaux menés, jusqu'à présent, sur les hydrosystèmes dominants. Enfin, le dernier axe de mes activités vise à renforcer le précédent

dans le sens où il propose d'identifier l'apport des nouvelles données disponibles, en particulier celles offertes à haute répétitivité et haute résolution par la constellation Sentinel, pour questionner et documenter la plateforme de modélisation-observation. Je décris ci-dessous les 3 axes structurants de mon projet à moyen terme et donne quelques pistes d'ouverture pour la suite.

AXE1 : ANALYSE REGIONALE DE L'EFFICACITE DE L'UTILISATION DE L'EAU

La consommation en « eau verte » des cultures est la quantité d'eau du sol utilisée par la plante provenant des précipitations par opposition à « l'eau bleu » qui est l'eau d'irrigation extraite en surface (lacs et retenues) ou du sous-sol (pompage dans la nappe). La sur-irrigation sur la quasi-totalité des cultures en Méditerranée du Sud est comprise entre 30 et 50% (Katerji, Mastrorilli, and Rana 2008). Pour les cultures pluviales, l'efficacité moyenne de la pluie est de l'ordre de 30% pour l'ensemble des cultures pluviales mais il est estimé que, dans les régions arides, seuls 10% sont utilisées pour la production agricole (Oweis and Hachum 2001), tout le reste étant perdu par évaporation du sol. Dans ces régions, l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau par l'agriculture pluviale passe donc par une meilleure gestion de l'eau verte, et en particulier par la mise en place de techniques de conservation des eaux de pluie (Rockström et al. 2009). Les indicateurs tel que l'évapotranspiration permettent de mesurer l'aptitude des agro-écosystèmes à stocker les pluies d'hiver et à transpirer cette eau « verte » plutôt que la perdre par ruissellement et évaporation.

Nous proposons donc de caractériser l'efficacité des cultures pluviales et irriguées en se focalisant sur les céréales qui dominent la production au Maghreb. Pour cela, nous capitaliserons sur les outils de suivi de l'évapotranspiration (ETR) par télédétection thermique et radar (axe 3). La continuité des acquisitions dans le domaine thermique notamment est assurée depuis le début des années 2000 avec le capteur MODIS et le lancement récent de Sentinel-3 (avril 2016). Nous produirons de longues séries temporelles d'évapotranspiration sur la base du modèle SPARSE développé avec mon collègue Gilles Boulet (2015-7) sur l'ensemble de la Méditerranée. La production agricole sera évaluée dans un premier temps par les statistiques agricoles (grain) dont nous disposons déjà au Maroc et/ou par des indicateurs empiriques de la biomasse aérienne basé sur l'indice de végétation (masse aérienne). L'efficacité de l'utilisation de l'eau par les cultures sera calculée en distinguant évapotranspiration totale (incluant l'évaporation du sol) et la transpiration seule ce qui nous permettra de distinguer les facteurs physiologiques liés à la plante et les facteurs édaphiques. Ces nouveaux indicateurs seront évalués sur la base de données acquises par le CESBIO et ses partenaires sur les cultures irriguées ainsi que sur la nouvelle expérience que j'ai mise en place sur un site de blé pluvial au Maroc. Ce site est notamment équipé d'instruments de mesure de la transpiration (micro-capteurs de flux de sève).

Nous interpréterons ensuite les tendances et la variabilité spatio-temporelle de différents indicateurs liés à l'utilisation de l'eau. Les différences observées seront interprétées (1) en terme de pratiques agricoles. Dans le Sud de la Tunisie notamment, 400000 ha dédiés à la culture des oliviers ont été aménagés pour la récupération des eaux pluviales. Ce site sera comparé à une région de culture pluviale où aucune technique de conservation n'est appliquée. Cette méthodologie pourra également être testée sur les terres de parcours en comparant les zones exploitées avec celles de zones voisines protégées (cas du no man's land entre l'Algérie et le Maroc ou parcs naturels protégés comme Sidi Toui en Tunisie) ; (2) en terme de climat local (précipitations, températures tirées de ré-analyses) et régional (i.e. les principaux modes de variabilité de l'atmosphère de l'hémisphère nord ainsi que les températures de surface des océans voisins). Au-delà de la simple corrélation avec

retard, je souhaiterais également évaluer l'apport de nouvelles approches a priori plus adaptées. En particulier, nous évaluerons les liens de causalité déterministes en se basant sur les liens de causalité de Granger (1969) ainsi que sur l'information mutuelle qui peut permettre d'identifier des liens non-linéaires par contraste avec les statistiques linéaires traditionnellement utilisées dans ce contexte. La détection de la tendance estimée et la dé-saisonnalisation par décomposition du signal census-X11 (Shiskin, Young, and Musgrave 1967) sera également considérée. Cette partie fera l'objet d'une demande de financement auprès du programme EC2CO ou PNTS à l'automne prochain.

Collaborations : CESBIO (S. Mangiarotti) ; CNRM (J.C. Calvet) ; DMN (J. Abaoui) ; INAT Tunis (Z. Lili) ; INRA Maroc (R. Ballaghi) ; INRA Avignon (S. Garrigues) ; LSCE (C. Otlé) ; UCAM (S. Khabba) ; ORMVAH (H. Kharrou) ;

AXE2 : MODELISATION INTEGREE DU FONCTIONNEMENT ECO-HYDROLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS SEMI-ARIDES

Ces travaux, qui constitueront le cœur de mes activités dans les années à venir, s'inscrivent dans l'effort de développement d'une plateforme numérique de modélisation-observation du fonctionnement éco-hydrologique des bassins versants semi-arides. Une telle plateforme outre son intérêt pour établir des scénarios réalistes d'évolution des ressources et évaluer l'efficacité de mesures d'adaptation constituerait également un formidable outil pour analyser le contenu en information de nouveaux produits satellites (axe 3) par assimilation de données ainsi que pour contribuer à définir à la fois de nouvelles missions spatiales et les stratégies d'échantillonnage sur le terrain (notamment basée sur les réseaux de capteurs à bas coût auxquels nous commençons à nous intéresser au laboratoire). La stratégie de modélisation déjà quelque peu évoquée que nous avons mise en place dans le cadre du LMI TREMA et de l'ANR AMETHYST est de comparer deux approches de modélisation :

- un modèle conceptuel développé avec nos partenaires gestionnaires destinés à l'aide à la planification de l'aménagement des bassins (chaîne SAMIR-WEAP-MODFLOW ; 2012-2). Il permet de relier les termes sources et puits du bilan hydrique de façon simple en tenant compte des pertes dues aux transferts. Cet outil offre la possibilité de représenter facilement les aménagements (barrages, périmètres irrigués).
- un modèle mécaniste qui représente les principaux processus régissant la dynamique des eaux de surfaces et souterraines : La chaîne de prévision hydrométéorologique SAFRAN-ISBA-RAPID-MODCOU ou SIM (Habets et al., 2008) est composée du système de ré-analyse SAFRAN qui fournit un forçage spatialisé sur un maillage régulier (voir encart ci-dessous), du modèle TSSVA simulant les échanges verticaux ; RAPID assure le routage de l'eau vers les rivières et MODCOU représente la dynamique des eaux souterraines. Il s'agit d'un outil a priori plus adapté pour l'établissement de scénario d'évolution des ressources sous l'effet des forçages climatiques. Cette approche à base physique pour certains processus (comme la dynamique de l'eau dans le sol ou la dynamique du manteau neigeux) peut également contribuer à améliorer les paramétrisations très empiriques des outils conceptuels comme la recharge des aquifères qui est souvent considérée égale à un certain pourcentage des apports (pluie et/ou irrigation) dans les approches conceptuelles.

Mise en place de la ré-analyse SAFRAN sur le bassin versant du Tensift

En préalable aux travaux de modélisation spatialisée, nous avons déjà travaillé sur la spatialisation du forçage climatique à l'échelle du BV du Tensift (et non plus seulement des BVs atlasiques) avec Amina Saaïdi de la direction de la météorologie nationale (DMN). Cette spatialisation est assurée par l'algorithme de régionalisation

SAFRAN. Nous avons en particulier adapté et évalué SAFRAN sur la période 2004-2014: cet outil de ré-analyse est très tributaire de la disponibilité des données météorologiques (principalement la densité des stations, leur répartition géographique et leur qualité). Un gros travail, pas très visible, de récupération, de traitement et d'évaluation des données météorologiques disponibles auprès de différents acteurs de la région a été effectué. Les résultats de cette étude ont montré : (1) une ré-analyse satisfaisante des principaux paramètres météorologiques, précipitations y compris, dans les régions (principalement en plaine, Sud-Ouest du bassin) où la densité des stations est forte ; (2) plus de difficulté en montagne, bien entendu à cause de la faible densité des observations mais aussi du au maillage trop grossier (8 km) pour représenter la forte variabilité spatiale. Afin de pallier cette limitation, nous avons mis en place un maillage variable allant de 1 km sur les régions accidentées à 8 km en plaine. Sur les régions faiblement pourvues en stations météorologiques, je propose notamment d'évaluer l'apport des méthodologies proposées à l'axe 3 pour améliorer (analyser) les précipitations sur la base de l'assimilation de produits d'humidité du sol à haute résolution dérivés de Sentinel-1 dont le développement est prévu dans le cadre du projet REC (H2020 RISE ; co-pi O. Merlin).

Si des résultats significatifs ont été obtenus sur le développement de l'outil conceptuel d'aide à la planification (qu'il s'agit maintenant d'exploiter en co-construisant des scénarios d'aménagement avec nos partenaires gestionnaires), nous butons encore sur la représentation des activités anthropiques et en particulier de l'irrigation pour la plateforme mécaniste. Les premières simulations réalisées dans le cadre du postdoc de C. Szczypta (ANR AMETHYST) avec la chaîne SAFRAN-ISBA-RAPID (sans prise en compte des eaux souterraines) sur un sous bassin versant de montagne proche de Marrakech ont conduit à des résultats plutôt mitigés (Figure 31).

Ces travaux sont très fédérateurs puisqu'ils se nourriront des nombreuses expériences en cours sur nos chantiers au Sud visant à quantifier certains processus intermédiaires encore très incertains afin de limiter les problèmes d'équifinalité (partition fonte/sublimation pour le manteau neigeux, partition évaporation/transpiration pour l'agriculture, quantification de la recharge le long des oueds et par retour d'eau d'irrigation, partition infiltration/évapotranspiration en montagne, quantification des prélèvements le long des oueds ...). Je propose d'y contribuer plus spécifiquement suivant trois volets :

- La représentation de l'irrigation dans les modèles mécanistes : une des raisons des écarts entre débits observés et simulés (Figure 31) pourraient être liée aux prélèvements agricoles sur les zones traditionnelles (les « séguias ») le long des oueds de montagne. Je propose de me focaliser sur la prise en compte de l'anthropisation en mettant l'accent sur l'irrigation qui n'est actuellement tout simplement pas représentée. Dans un premier temps, je propose de considérer des modèles simples d'irrigation basés sur la disponibilité en eau dans la zone racinaire contraints par des scénarios d'irrigation typiques pour les principales cultures de la région (blé, olivier, agrumes). Il s'agira ensuite de les calibrer sur les apports d'eau que nos partenaires gestionnaires de l'eau agricole nous fournissent avec une précision acceptable à l'échelle mensuelle et sur les estimations de ces apports à l'aide des méthodologies mises en place à l'axe 3. L'objectif étant de déboucher sur un outil autonome de représentation de l'irrigation pouvant être utilisé en mode scénario. Ce travail pourra être réalisé dans le cadre d'un travail de thèse (UCAM, Maroc) en co-encadrement avec le CNRM.
- La représentation de la résistance stomatique et celle du couvert : une bonne représentation de la réponse des plantes au stress hydrique et une bonne réponse aux sécheresses est cruciale en région semi-aride étant donné l'impact sur le flux d'évapotranspiration. Plusieurs paramétrisations coexistent actuellement dans les modèles de surface (Medlyn et al. 2011). Avec V. Le Dantec, (écophysiologiste au CESBIO), nous répondrons cet automne à l'A.O. EC2CO en proposant de

comparer les différentes approches existantes, les évaluer et les calibrer sur nos chantiers au Sud de la Méditerranée.

- L'assimilation de données multi-longueur d'onde et multi-fréquences : Je poursuivrai également les développements méthodologiques engagés en assimilation de données observées pour mieux quantifier les différents compartiments hydrologiques et pour analyser le contenu en information pour contraindre indirectement certains des processus intermédiaires. D'un point de vue méthodologique, je souhaiterais développer les travaux autour d'une nouvelle approche d'assimilation de données que nous avons testée dans le cadre du stage de master 2 d'A. El Moutamanni. Au lieu de considérer l'ensemble des observations disponibles qui au mieux, peuvent fournir des informations inutiles et au pire, contradictoires (données bruitées ou problèmes d'échelles spatiales), cette approche appelée « sélective » sélectionne les observations les plus pertinentes sur la base des états du couvert (stress/non stress, sol nu/couvert développé ...). Par ailleurs, la philosophie générale de ces travaux est toujours d'échantillonner stochastiquement l'espace de recherche afin d'identifier plusieurs jeux de solutions possibles pour, dans un second temps, générer des ensembles de scénarios sur une base objective et quantifier leurs incertitudes.

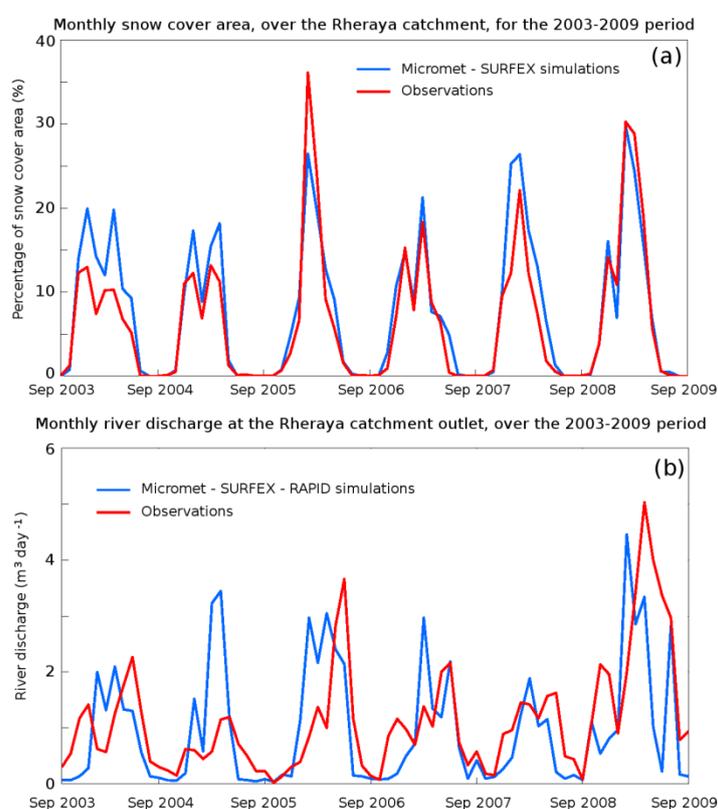


Figure 31 : Prédiction des surfaces enneigées (a) et des débits (b) sur le bassin versant de la Rheraya avec la chaîne de prévision SAFRAN-ISBA-RAPID de 2003 à 2009 au pas de temps mensuel. Les observations de surfaces enneigées proviennent des produits journaliers MOD10A1 (2015-7, 2015-10).

Enfin, l'aspect fédérateur et multi-disciplinaire de ces travaux se rencontre aussi au niveau de la représentation de la consommation en eau agricole qui doit faire appel aux sciences économiques et sociales. En effet, afin de pouvoir utiliser ces outils en mode scénario, il faudra, a minima être capable de représenter le comportement des agriculteurs, notamment en réponse à une sécheresse

par exemple (explosion du nombre de forages ?) et prendre en compte la typologie des exploitations (agriculture intensive versus extensive familiale dont les moyens pour l'accès à l'eau souterraine diffèrent). Dans le cadre du projet AMETHYST, nous avons identifié des interlocuteurs traitant de ces questions socio-économiques avec une approche quantitative, notamment à G-EAU, mais des actions concrètes sur ces travaux sont tributaires de financements qui restent à obtenir. Nous utiliserons ensuite ces outils sur la base de scénarios réalistes de type what-if (conversion au goutte-à-goutte, aménagement du bassin –barrage et sites de recharge artificielle-) conçus avec nos partenaires gestionnaires et de changements climatiques sur la base des sorties à haute résolution sur la Méditerranée issues de l'initiative MEDCORDEX. Plus que l'évolution moyenne du climat, nous chercherons notamment à évaluer l'impact d'évènements extrêmes tels que des sécheresses prolongées. Enfin, nous utiliserons des approches ensemblistes comme déjà évoqué.

Collaborations : CESBIO (V. Le Dantec ; O. Merlin ; G. Boulet) ; CNRM (C. Albergel, A. Boone, J.C. Calvet) ; DMN (A. Saaidi) ; EAUDYSSEE (F. Habets) ; G-EAU (F. Molle, M. Montginoul) ; HSM (Y. Tramblay, D. Ruelland) ; UCAM (L. Hanich, Y. Fakir)

AXE3 : NOUVEAUX PRODUITS SATELLITAIRES POUR LE SUIVI DES RESSOURCES EN EAU

Nous poursuivons les développements méthodologiques pour le suivi de l'évapotranspiration et du stress hydrique des couverts par télédétection et sur l'évaluation des meilleures stratégies de modélisation pour les couverts agricoles méditerranéens. En parallèle, les données sentinel-1 sont maintenant disponibles et permettent d'accéder à de nouvelles informations telles que l'humidité du sol (de nombreux travaux sont en cours au CESBIO dans le cadre du LMI TREMA, des projets REC et AMETHYST dans lesquels je suis impliqué) ou, de manière plus prospective, le stress hydrique des couverts à l'échelle de la parcelle (cf. ci-dessous). Bien que moins nouvelles, certaines observations (GRACE, altimétrie avec notamment le capteur SWOT à venir) n'ont pas fait l'objet du même intérêt que les observations satellitaires plus conventionnelles. L'objectif général de cet axe est de mettre en place un système d'observation satellite des ressources en eau des bassins versants semi-arides et d'évaluer leur pertinence pour la simulation du fonctionnement intégrée du bassin (axe2). Voici à titre indicatif, les 2 actions que je propose de développer à moyen terme :

Détection du stress hydrique des couverts arborés à l'aide de sentinel 1

Les approches développées pour la détection du stress hydrique basée sur la température de surface (1) n'est pas applicable à l'échelle parcellaire avec les capteurs actuellement en orbite (et ne le sera pas dans un avenir proche) et (2) est inopérante en présence de nuage. Nous nous attacherons à proposer des alternatives. Le coefficient de rétrodiffusion radar, insensible à la couverture nuageuse, est lié à la masse du couvert en eau. Une méthode basée sur la télédétection radar offrirait de plus à terme l'opportunité d'une planification de l'irrigation plus réactive car basée sur la réponse de la plante et non sur la disponibilité en eau dans le sol. Sur les forêts soudaniennes et avec des données à très basse résolution spatiale (~40 km), des travaux préliminaires (Steele-Dunne, Friesen, and Van De Giesen 2012) ont montré que les valeurs de rétrodiffusion acquises le matin (orbite descendante) étaient systématiquement supérieures à celles du soir (orbite montante). Cet écart est, de plus, minimal en fin de saison sèche quand les arbres sont stressés et maximal en fin de saison des pluies quand le compartiment racinaire est bien rempli. L'hypothèse est que cette différence est liée au déstockage hydrique journalier des couverts arborés. Le lancement récent du capteur C-SAR à bord

de Sentinel-1 ouvre la voie à un suivi par radar des couverts agricoles à l'échelle parcellaire avec un temps de revisite élevé (6 jours).

Nous exploiterons le contraste entre les coefficients de rétrodiffusion radar acquis par C-SAR le matin et le soir pour détecter le stress des couverts arborés. Ces travaux exploratoires s'accompagneront de l'instrumentation d'un site arboré équipé de capteurs de flux de sève (déjà acquis) et, éventuellement de capteurs dendrométrique par micro-déplacement. Nous nous orienterons vers un site irrigué en gravitaire pendant la période estivale où la forte demande évaporative (associée aux congés pas toujours bien géré des ouvriers en charge de l'irrigation) a toutes les chances de conduire à une période de stress hydrique. Il s'agit d'une application prometteuse pour la détection du stress hydrique des plantes et, de manière plus prospective, pour estimer le contenu en eau de la zone racinaire à partir du contenu en eau de la végétation. En réponse à une attente de nos partenaires au Maroc, nous pourrions également envisager des débouchés pour la cartographie des risques d'incendie; l'équivalent en eau de la végétation étant une variable clé dans ce contexte. J. Ezzahar (UCAM) qui a obtenu une bourse d'échange financée par l'IRD (2016-2018) pour se former à la télédétection radar participera activement à ces travaux.

Modélisation inverse des apports d'eaux (précipitation et irrigation)

Les outils pronostiques d'estimation de la consommation en eau des couverts sont souvent pénalisés par une mauvaise connaissance des apports d'eau d'irrigation à l'échelle de la parcelle. Les champs spatio-temporels d'humidité du sol désagrégés (capteur SMOS, Sentinel-1) dont la résolution spatiale est en constante amélioration (bientôt 100 m avec les développements en cours au sein de l'équipe : projet H2020 REC RISE, PI O. Merlin) offrent une opportunité unique pour suivre les apports d'eau. Les premiers résultats théoriques obtenus par A. Tavernier (VI Marrakech) sur un site de blé par assimilation de données d'humidité du sol dans un modèle SVAT ont montré que le timing des irrigations pouvait être estimé par modélisation inverse à 1 jour près mais que le biais sur les quantités pouvait atteindre 30%. A cause d'un maillage épars du réseau de stations météorologiques et du caractère souvent convectif des événements pluvieux, les champs de précipitations issues d'observations krigées ou de ré-analyses sont entachés d'une forte incertitude en Méditerranée du Sud. Nous nous intéressons à la correction des champs de précipitations sur le même principe dans le cadre de la thèse de Y. Malbeteau. Je propose de développer ces premières études préliminaires. Un contrat post-doctoral sera financé par le projet "SAGESSE" (CNRST Marocain) à Marrakech en 2017 et je me suis engagé à le co-encadrer.

Collaborations : CESBIO (M. Zribi O. Merlin, G. Boulet; V. Le Dantec) ; ECMWF (G. Balsamo) ; DMN (A. Saaïdi) ; UCAM (J. Ezzahar, S. Khabba, XX à recruter)

OUVERTURES

Au-delà de ces perspectives plutôt balisées (qui, je pense ont déjà de quoi m'occuper quelques temps), je souhaitais également évoquer quelques autres pistes qui à ce stade ne constituent guère plus que des envies. Ces pistes se concrétiseront (ou pas) aux grés des opportunités et elles ont des portées assez hétérogènes:

- tout d'abord, je ne désespère pas de trouver un peu de temps pour rassembler l'ensemble des outils d'analyse statistique des données satellitaires que j'ai développés pour des applications climatologiques au sein d'une toolbox matlab ou d'un package R à soumettre au

Comprehensive R Active Network (CRAN ; <https://cran.r-project.org/>) afin de pouvoir les diffuser à la communauté. Un étudiant de master en informatique devrait certainement être capable de faire ça mieux que moi.

- après avoir passé ces dernières années à tenter de caractériser le rôle du climat sur le fonctionnement hydrologique des cultures irriguées, je suis très tenté par la réciproque : plusieurs travaux ont montré que le fait d'altérer le bilan hydrique de surface par l'irrigation impactait la formation des nuages et le climat. Au CESBIO, nous avons notamment initié des contacts avec une équipe de l'UNAM (Universidad Nacional Autonoma de Mexico) qui s'intéresse à l'impact des zones irriguées sur la dynamique atmosphérique. Un outil couplé surface-atmosphère nous permettrait également de disposer d'un forçage météorologique distribué notamment pour nos outils de détection du stress pour lesquels la température de l'air est une variable d'entrée clé. Après une action bilatérale pour concrétiser la collaboration, ce partenariat nous donnerait l'opportunité de monter un projet tri-partite France-Maroc-Mexique avec le CNRM (Météo-France), nos partenaires au Maroc et, en particulier la DMN (Maroc) qui s'intéresse à cette question et qui possède les compétences et depuis récemment les outils pour y répondre (modèle de prévision AROME opérationnel à 2 km de résolution sur le Maroc).
- Si j'ai évoqué quelques nouvelles approches méthodologiques que je souhaiterais mettre en place dans le cadre de mon projet, je n'ai pas parlé de nouvelles stratégies de modélisation. La modélisation globale (2012-1) est une approche nouvelle développée Gouesbet and Letellier (1994) et appliquée à des dynamiques environnementales mon collègue S. Mangiarotti. Les premiers travaux qu'il a mené sur des séries temporelles de surface enneigée ou de NDVI satellite (Mangiarotti, Drapeau, and Letellier 2014) ont déjà conduit à des résultats très prometteurs. Basée sur la théorie des systèmes dynamiques non-linéaires (ou théorie du chaos), elle vise à reconstituer la dynamique d'un (hydro. en ce qui me concerne) système sur la base de l'observation d'une seule de ses variables. Elle peut donc être classée dans les approches descendantes car basée sur la donnée (cf. « stratégie de modélisation »). En pratique, la série temporelle est projetée dans un espace particulier : l'espace des phases. L'analyse de sa trajectoire dans cet espace renseigne sur la dynamique du système. Une dynamique simple (souvent sans intérêt), se traduit par une trajectoire simple : un cycle limite pour les phénomènes périodiques par exemple ; une dynamique complexe, beaucoup plus probable pour un système environnemental réel par une trajectoire complexe qui peut éventuellement être de nature chaotique. La modélisation globale vise à traduire cette trajectoire en un système d'équations les plus parcimonieuses possibles. Cette approche, si elle n'a pas le caractère explicatif des approches mécanistes, a pour objectif de saisir la dynamique du système. En d'autres termes, plutôt que de se contenter de vérifier que les simulations passent au plus près des observations disponibles sur une durée limitée - ce qui ne fournit pas de garanti quant à la validité globale du modèle – un bon modèle sera celui qui présentera une bonne proximité dans l'espace des phases et dont la topologie (l'organisation des trajectoires) sera conservée. Cela signifie théoriquement que si nous avons trouvé la bonne structure du modèle global, il doit être capable de reproduire tous les régimes dynamiques possibles d'un hydro-système donné même ceux qui n'ont pas été observés à cause de la durée limitée des séries temporelles à notre disposition. Cela reste encore très prospectif (et théorique : est-ce que les modèles

sont vraiment capables de reproduire la diversité des dynamiques avec le peu de données, qui plus est bruitées, dont nous disposons ?), mais je pense qu'une finalité de cette approche est d'étudier la diversité des régimes dynamiques d'un hydro-système donné par perturbation de ses paramètres dans le voisinage proche des valeurs observées et d'interpréter les basculements de régimes dynamiques en termes de vulnérabilité (i.e. tracer le diagramme de bifurcation). Par exemple, cette approche pourrait être utilisée il me semble pour répondre à des questions du type : dans le contexte d'un réchauffement probable du climat, est-ce que le régime hydrologique des oueds de montagnes du Sud de la Méditerranée est en phase de transition d'un régime pluvio-nival vers un régime exclusivement pluvial ? Les enjeux associés à ce type de question en termes de gestion notamment (stockage) sont cruciaux.

BIBLIOGRAPHIE

- Allen, Richard G., Pereira L., Raes D., and Smith M. 1998. *FAO Irrigation and Drainage n°56: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO.
- Allen, Richard G., Luis S. Pereira, Dirk Raes, and Martin Smith. 1998. "Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements." *FAO Irrigation and Drainage Paper* (56):326 p.
- Anderson, M. C., J. M. Norman, G. R. Diak, and J. R. Mecikalski. 1995. "A Two-Source Time-Integrated Model for Estimating Surface Fluxes Using Thermal Infrared Remote Sensing." *Time* 257(1993).
- Anyamba, A., and C. J. Tucker. 2005. "Analysis of Sahelian Vegetation Dynamics Using NOAA-AVHRR NDVI Data from 1981-2003." Pp. 596–614 in *Journal of Arid Environments*, vol. 63.
- Arora, Vivek. 2002. "Modeling Vegetation as a Dynamic Component in Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer Schemes and Hydrological Models." *Reviews of Geophysics* 40(2):1006. Retrieved March 8, 2016 (<http://doi.wiley.com/10.1029/2001RG000103>).
- Baigorria, Guillermo a., James W. Jones, and James J. O'Brien. 2008. "Potential Predictability of Crop Yield Using an Ensemble Climate Forecast by a Regional Circulation Model." *Agricultural and Forest Meteorology* 148(8-9):1353–61. Retrieved March 29, 2012 (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192308001020>).
- Balaghi, Riad, Bernard Tychon, Herman Eerens, and Mohammed Jlibene. 2008. "Empirical Regression Models Using NDVI, Rainfall and Temperature Data for the Early Prediction of Wheat Grain Yields in Morocco." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 10(4):438–52. Retrieved March 29, 2012 (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0303243406000614>).
- Balsamo, G., F. Bouyssel, and J. Noilhan. 2004. "A Simplified Bi-Dimensional Variational Analysis of Soil Moisture from Screen-Level Observations in a Mesoscale Numerical Weather Prediction Model." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 895–915.
- Baret, Frédéric et al. 2007. "LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES Global Products Derived from VEGETATION. Part 1: Principles of the Algorithm." *Remote Sensing of Environment* 110(3):275–86.
- Bastidas, L. A., H. V Gupta, S. Sorooshian, W. J. Shuttleworth, and Z. L. Yang. 1999. "Sensitivity Analysis of a Land Surface Scheme Using Multicriteria Methods." *Journal of Geophysical Research* 104:481–90.
- Beljaars, ACM, P. Viterbo, MJ Miller, and AK Betts. 1996. "The Anomalous Rainfall over the United States during July 1993: Sensitivity to Land Surface Parameterization and Soil Moisture." *MONTHLY WEATHER REVIEW* 124(3):362–83. Retrieved June 10, 2015 (http://apps.webofknowledge.com.biblioplanets.gate.inist.fr/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=25&SID=S1vsHqZJEOaEWEUsPkb&page=1&doc=2).
- Bennett, A., and M. Thornburn. 1992. "The Generalized Inverse of a Non-Linear Quasi-Geostrophic Ocean Circulation Model." *Journal of Physical Oceanography* 3:213–30.
- Beven, K., and A. Binley. 1992. "The Future of Distributed Models: Model Calibration and Uncertainty Prediction." *Hydrological Processes* 6:279–98.
- Bleu, Plan. 2009. "L'agriculture Méditerranéenne En Recherche D'adaptation Climatique." *Les notes du plan bleu* 12:5.
- Blinda, Mohammed, and Jean-pierre Giraud. 2012. "Vers Une Meilleure Efficience de L'utilisation de L'eau En Méditerranée." *LES CAHIERS DU PLAN BLEU N°14*, 44.
- Bolle, H. J. 2002. *Mediterranean Climate: Variability and Trends*. Springer-V.
- Bonan, Gordon B. 2008. "Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests." *Science* 320(5882):1444–49. Retrieved (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18556546>).
- Bormann, Kathryn J., Matthew F. McCabe, and Jason P. Evans. 2012. "Satellite Based Observations for Seasonal Snow Cover Detection and Characterisation in Australia." *Remote Sensing of Environment* 123:57–71. Retrieved October 3, 2013 (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425712001228>).
- Boulet, Gilles. 2010. "Modélisation, Spatialisation et Assimilation Des Données de La Télédétection Pour La Gestion de L'eau Des Milieux Semi-Arides." Paul Sabatier University.
- Boussetta, Souhail, Gianpaolo Balsamo, Anton Beljaars, Tomas Kral, and Lionel Jarlan. 2013. "Impact of a Satellite-Derived Leaf Area Index Monthly Climatology in a Global Numerical Weather Prediction Model." *International Journal of Remote Sensing* 34(9-10):3520–42. Retrieved December 14, 2015 (http://apps.webofknowledge.com.biblioplanets.gate.inist.fr/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=6&SID=Z1f5IS9f125iXiVzbTm&page=2&doc=16&cacheurlFromRightClick=no).
- Bouttier, F., and P. Courtier. 2002. "Data Assimilation Concepts and Methods March 1999." *Training* (March 1999).
- Brisson, Nadine, Marie Launay, Bruno Mary, and Nicolas Beaudoin. 2009. *Conceptual Basis , Formalisations and Parameterization of the SticS Crop Model*. Quae. edited by Collection: Update Sciences and Technologies.
- Brown, Molly E., Kirsten de Beurs, and Anton Vrieling. 2010. "The Response of African Land Surface Phenology to Large Scale Climate Oscillations." *Remote Sensing of Environment* 114(10):2286–96. Retrieved March 16, 2012 (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425710001458>).
- Brown, Molly E., and Kirsten M. de Beurs. 2008. "Evaluation of Multi-Sensor Semi-Arid Crop Season Parameters Based on NDVI and Rainfall." *Remote Sensing of Environment* 112(5):2261–71. Retrieved January 9, 2015 (http://apps.webofknowledge.com.biblioplanets.gate.inist.fr/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch

- earch&qid=3&SID=Y2Scmdjxxet5qeO9bm4&page=2&doc=13).
- Brown, R. D., and D. a. Robinson. 2011. "Northern Hemisphere Spring Snow Cover Variability and Change over 1922–2010 Including an Assessment of Uncertainty." *The Cryosphere* 5(1):219–29. Retrieved January 9, 2014 (<http://www.the-cryosphere.net/5/219/2011/>).
- Brown, Ross D., and Philip W. Mote. 2009. "The Response of Northern Hemisphere Snow Cover to a Changing Climate*." *Journal of Climate* 22(8):2124–45. Retrieved January 7, 2014 (<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2008JCLI2665.1>).
- Bzoui, M. 2005. *Rapport Sous-Régional Sur La Mise En Valeur Des Ressources En Eau En Afrique Du Nord*.
- C.J.M. Jacobs. 1994. "Direct Impact of Atmospheric CO₂ Enrichment on Regional Transpiration." Wageningen University.
- Calvet, Jean Christophe et al. 1998. "An Interactive Vegetation SVAT Model Tested against Data from Six Contrasting Sites." *Agricultural and Forest Meteorology* 92(2):73–95.
- Cassou, Christophe, Laurent Terray, James W. Hurrell, and Clara Deser. 2004. "North Atlantic Winter Climate Regimes: Spatial Asymmetry, Stationarity with Time, and Oceanic Forcing." *Journal of Climate* 17(5):1055–68.
- Chehbouni, a. et al. 2008. "An Integrated Modelling and Remote Sensing Approach for Hydrological Study in Arid and Semi-arid Regions: The SUDMED Programme." *International Journal of Remote Sensing* 29(17-18):5161–81. Retrieved March 29, 2012 (<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160802036417>).
- Cooper, P. J. M., P. J. Gregory, D. Tuly, and H. C. Harric. 1987. "Improving Water Use Efficiency of Annual Crops in the Rainfed Farming Systems of West Asia and North Africa." *Exper. Agriculture* 23:113–58.
- Cortes, C., and V. N. Vapnik. 1995. "Support-Vector Networks." *Machine learning* 20(3):273–97.
- Coudert, Benoit, Catherine Ottlé, Brice Boudevillain, Pierre C. Guillevic, and Jerome Demarty. 2006. "Contribution of Thermal Infrared Remote Sensing Data in Multiobjective Calibration of a Dual Source SVAT Model." *Journal of Hydrometeorology* 7(3):404–20.
- Czaja, Arnaud, and Claude Frankignoul. 1999. "Influence of the North Atlantic." *October* 26(19):2969–72.
- Daley, R. 1991. *Atmospheric Data Analysis*. Cambridge . edited by Cambridge University Press.
- Dardel, C. et al. 2014. "Re-Greening Sahel: 30 Years of Remote Sensing Data and Field Observations (Mali, Niger)." *Remote Sensing of Environment* 140:350–64.
- Delworth, T., and S. Manabe. 1989. "The Influence of Soil Wetness on Near-Surface Atmospheric Variability." *Journal of Climate* 2:1447–1762.
- Demarty, Jerome et al. 2005. "Constraining a Physically Based Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer Model with Surface Water Content and Thermal Infrared Brightness Temperature Measurements Using a Multiobjective Approach." *Water Resources Research* 41(1):W01011.
- Denning, A. S. et al. 1996. "Simulations of Terrestrial Carbon Metabolism and Atmospheric CO₂ in a General Circulation Model. Part 1: Surface Carbon Fluxes." *Tellus B* 48:543–67.
- Derksen, C., and R. Brown. 2012. "Spring Snow Cover Extent Reductions in the 2008-2012 Period Exceeding Climate Model Projections." *Geophysical Research Letters* 39(19):n/a – n/a. Retrieved January 13, 2014 (<http://doi.wiley.com/10.1029/2012GL053387>).
- Dickinson, Robert E. 1995. "Land Processes in Climate Models." *Remote Sensing of Environment* 51(1):27–38.
- Dirmeyer, P. A. 2003. "The Role of the Land Surface Background State in Climate Predictability." *Journal of Hydrometeorology* 4:599–610.
- Douville, H. 1998. "Validation and Sensitivity of the Global Hydrologic Budget in Stand-Alone Simulations with the ISBA Land-Surface Scheme." *Climate Dynamics* 14(3):151–72.
- Douville, H. 2004. "Relevance of Soil Moisture for Seasonal Atmospheric Predictions: Is It an Initial Value Problem?" *Climate Dynamics* 22(4):429–46.
- Entekhabi, D., H. Nakamura, and E. G. Njoku. 1994. "Solving the Inverse Problem for Soil Moisture and Temperature Profiles by Sequential Assimilation of Multifrequency Remotely Sensed Observations." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 32:438–48.
- Franks, S. W., and K. J. Beven. 1997. "Bayesian Estimation of Uncertainty in Land-Surface-Atmosphere for Flux Predictions." *Journal of Geophysical Research* 102:991–99.
- Frenken, Karen. 2005. *L' Irrigation En Afrique En Chiffres*. FAO.
- Frison, P. L., and E. Mougin. 1996. "Use of ERS-1 Wind Scatterometer Data over Land Surfaces." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 34(2):550–60. Retrieved June 9, 2015 (<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=485131>).
- Ghosh, Subimal, and P. P. Mujumdar. 2009. "Climate Change Impact Assessment: Uncertainty Modeling with Imprecise Probability." *Journal of Geophysical Research* 114(D18). Retrieved March 29, 2012 (<http://www.agu.org/pubs/crossref/2009/2008JD011648.shtml>).
- Giorgi, F. 2006. "Climate Change Hot-Spots." *Geophysical Research Letters* 33(8):1–4. Retrieved March 2, 2012 (<http://www.agu.org/pubs/crossref/2006/2006GL025734.shtml>).
- Giorgi, Filippo, and Piero Lionello. 2008. "Climate Change Projections for the Mediterranean Region." *Global and Planetary Change* 63(2-3):90–104. Retrieved March 22, 2012 (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921818107001750>).
- Gonza, E. Xoplaki Æ. J. F. 2004. "Wet Season Mediterranean Precipitation Variability : Influence of Large-Scale Dynamics and

- Trends." *Climate Dynamics* 63–78.
- Gouesbet, G., and C. Letellier. 1994. "Global Vector-Field Reconstruction by Using Multivariate Polynomial L2 Approximation on Nets." *Physical Review E* 49:4955–72.
- Gutman, Garik G. 1999. "On the Use of Long-Term Global Data of Land Reflectances and Vegetation Indices Derived from the Advanced Very High Resolution Radiometer." *Journal of Geophysical Research* 104(D6):6241–55. Retrieved (<http://www.agu.org/pubs/crossref/1999/1998JD200106.shtml>).
- Habets, F. et al. 2008. "The SAFRAN-ISBA-MODCOU Hydrometeorological Model Applied over France." *Journal of Geophysical Research* 113(D6):D06113. Retrieved October 27, 2014 (<http://doi.wiley.com/10.1029/2007JD008548>).
- Hagolle, O. et al. 2013. "SPOT4 (Take5) : Simulation of Sentinel-2 Time Series on 45 Large Sites." in *Proceedings of ESA's Living Planet Symposium*. Edinburg.
- Hamdy, A., and N. Katerji. 2006. "Water Crisis in the Arab World. Analysis and Solutions." P. 60 p. in *IAM-Bari Editor*.
- Hansen, J. 2004. "Linking Dynamic Seasonal Climate Forecasts with Crop Simulation for Maize Yield Prediction in Semi-Arid Kenya." *Agricultural and Forest Meteorology* 125(1-2):143–57. Retrieved March 16, 2012 (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192304000450>).
- Hansen, James W., James W. Jones, Clyde F. Kiker, and Alan W. Hodges. 1999. "El Niño– Southern Oscillation Impacts on Winter Vegetable Production in Florida." *Journal of Climate* 12:92–102.
- Hastings, D. A., and J. E. William. 1992. "The Advanced Very Resolution Radiometer (AVHRR): A Brief Reference Guide." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 58(8):1183–88.
- Henricksen, B. L., and J. W. Durkin. 1986. "Growing Period and Drought Early Warning in Africa Using Satellite Data." *International Journal of Remote Sensing* 7(11):1583–1608. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1080/01431168608948955>).
- Hill, J., M. Stellmes, Th. Udelhoven, a. Röder, and S. Sommer. 2008. "Mediterranean Desertification and Land Degradation." *Global and Planetary Change* 64(3-4):146–57. Retrieved March 11, 2012 (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921818108001252>).
- Hurk, B. Van den et al. 2011. "Acceleration of Land Surface Model Development over a Decade of GLASS." *American Meteorological Society* December:1593–1600.
- Hurrell, J. 1995. "Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperature and Precipitation." *Science* 269:676–79.
- Hurrell, James W., and Harry Van Loon. 1997. "Decadal Variations in Climate Associated with the North Atlantic Oscillation." *Climatic Change* 36:301–26.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge . edited by T.F. Stocker et al. Cambridge, United Kingdom and New-York, USA.
- Jacquemoud, S., and F. Baret. 1990. "PROSPECT: A Model of Leaf Optical Properties Spectra." *Remote Sensing of Environment* 34(2):75–91.
- Jacquemoud, S., F. Baret, and J. F. Hanocq. 1992. "Modeling Spectral and Bidirectional Soil Reflectance." *Remote Sensing of Environment* 41(2-3):123–32.
- Jarlan, L. et al. 2015. "Remote Sensing of Water Resources in Semi-Arid Mediterranean Areas: The Joint International Laboratory TREMA." *International Journal of Remote Sensing* 36(19-20):4879–4917. Retrieved December 14, 2015 (http://apps.webofknowledge.com.biblioplanets.gate.inist.fr/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=6&SID=Z1f5IS9f125iXivzbTm&page=1&doc=1&cacheurlFromRightClick=no).
- Jarlan, L., and G. Boulet. 2014. "Data Assimilation for the Monitoring of Continental Surfaces." P. 389 in *Remote Sensing Imagery*, edited by F. Tupin, J. Inglada, and J.M. Nicolas. Hoboken USA: John Wiley & Sons.
- 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. Series B, Biological Sciences*. 273(927):593–610. Retrieved (<http://rstb.royalsocietypublishing.org/royptb/273/927/593.full.pdf><http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/royptb/273/927/593.full.pdf>).
- Jasechko, Scott et al. 2013. "Terrestrial Water Fluxes Dominated by Transpiration." *Nature* 2–6.
- Justice, C. O., and P. H. Y. Hiernaux. 1986. "Monitoring the Grasslands of the Sahel Using NOAA AVHRR Data: Niger 1983." *International Journal of Remote Sensing* 7(11):1475–97.
- Kalra, Ajay, and Sajjad Ahmad. 2009. "Using Oceanic-Atmospheric Oscillations for Long Lead Time Streamflow Forecasting." *Water Resources Research* 45(3):1–18. Retrieved March 29, 2012 (<http://www.agu.org/pubs/crossref/2009/2008WR006855.shtml>).
- Karam, M. A., A. K. Fung, R. H. Lang, and N. S. Chauhan. 1992. "A Microwave Scattering Model for Layered Vegetation." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30(4):767–84. Retrieved June 9, 2015 (http://apps.webofknowledge.com.biblioplanets.gate.inist.fr/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=23&SID=X2zHQMbY3VKr7z8noeE&page=1&doc=1).
- Katerji, Nader, Marcello Mastrorilli, and Gianfranco Rana. 2008. "Water Use Efficiency of Crops Cultivated in the Mediterranean Region: Review and Analysis." *European Journal of Agronomy* 28(4):493–507.
- Kecman, V. 2001. *Learning and Soft Computing: Support Vector Machines, Neural Network and Soft Computing*. A Bradford.

- Cambridge Massachussets: the MIT Press.
- Kennett, Rosemary G., and Fuk K. Li. 1989. "Seasat over-Land Scatterometer Data - II: Selection of Extended Area Land-Target Sites for the Calibration of Spaceborne Scatterometers." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 27(6):779–88.
- Knippertz, P., M. Christoph, and P. Speth. 2003. "Long-Term Precipitation Variability in Morocco and the Link to the Large-Scale Circulation in Recent and Future Climates." *Meteorology and Atmospheric Physics* 83(1-2):67–88. Retrieved March 26, 2012 (<http://www.springerlink.com/Index/10.1007/s00703-002-0561-y>).
- Koster, Randal D. et al. 2004. "Regions of Strong Coupling between Soil Moisture and Precipitation." *Science (New York, N.Y.)* 305(5687):1138–40. Retrieved March 5, 2016 (<http://science.sciencemag.org/content/305/5687/1138.abstract>).
- Kutzbach, J. E., G. Bonan, J. Foley, and S. Harrison. 1996. "Vegetation and Soil Feedbacks and African Monsoon Response to Orbital Forcing in the Holocene." *Nature* 384(6610):623–26.
- Lamb, Peter J., and Randy A. Pepler. 1987. "North Atlantic Oscillation: Concept and an Application." *Bulletin of the American Meteorological Society* 68(10):1218–25.
- Lamprey, H. F. 1975. *Report on the Desert Encroachment Reconnaissance in Northern Sudan*.
- Letson, David et al. 2002. "Use of ENSO-Related Climate Information in Agricultural Decision Making in Argentina : A Pilot Experience." *Agricultural Systems* 74:371–92.
- Maas, S. J. 1988. "Use of Remotely Sensed Information in Agricultural Crop Growth Models." *Ecological Modelling* 41:247–68.
- Mahfouf, J. F. 1991. "Analysis of Soil Moisture from near-Surface Parameters. A Feasibility Study." *Journal of Applied Meteorology* 17:506–26.
- Manabe, S. 1969. "Climate and the Ocean Circulation 1. The Atmospheric Circulation and the Hydrology of the Earths Surface." *Monthly Weather Review* 97(1):739–74. Retrieved ([http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493\(1969\)097<0739:CATOC>2.3.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493(1969)097<0739:CATOC>2.3.CO;2)).
- Mangiarotti, S., L. Drapeau, and C. Letellier. 2014. "Two Chaotic Models for Cereal Crops Cycles Observed from Satellite in Northern Morocco." *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Non linear Science* 24:023130.
- Martinez, Christopher J., Guillermo A. Baigorria, and James W. Jones. 2009. "Use of Climate Indices to Predict Corn Yields in Southeast." *International Journal of Climatology* 1691(December 2008):1680–91.
- Mazzega, Pierre. 2002. "Petites Enquêtes Sur Une Relation Difficile: Modèles <-> Données." Université Paul Sabatier.
- McLaughlin, D. 1995. "Recent Developments in Hydrologic Data Assimilation." *Review of Geophysics* 33:977–84.
- Medlyn, Belinda E. et al. 2011. "Reconciling the Optimal and Empirical Approaches to Modelling Stomatal Conductance." *Global Change Biology* 17(6):2134–44.
- Menke, W. 1984. *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory (2nd Edition 1989)*. Academic P. New York.
- Mougin, E., A. Lopes, PL Frison, and C. Proisy. 1995. "PRELIMINARY-ANALYSIS OF ERS-1 WIND SCATTEROMETER DATA OVER LAND SURFACES." *International Journal of Remote Sensing* 16(2):391–98. Retrieved June 12, 2015 (http://apps.webofknowledge.com.biblioplanets.gate.inist.fr/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=1&SID=W1iBRVcs5x4sVkHz8b8&page=1&doc=1).
- Mougin, E., D. Lo Seen, S. Rambal, A. Gaston, and P. H. Hiernaux. 1995. "A Regional Sahelian Grassland Model To Be Coupled with Multispectral Satellite Data. I: Model Description and Validation." *Remote Sensing of Environment* 52:181–93.
- Moulin, S. 1995. "Assimilation D'observations Satellitaires Courtes Longueurs D'onde Dans Un Modèle de Fonctionnement de Culture." Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Myneni, RB B., CD D. Keeling, CJ J. Tucker, G. Asrar, and R. R. Nemani. 1997. "Increased Plant Growth in the Northern High Latitudes from 1981 to 1991." *Nature* 386(6626):698–702. Retrieved (http://ecocast.arc.nasa.gov/pubs/pdfs/1997/Myneni_Nature.pdf \n<Go to ISI>://A1997WU38700051).
- Nelder, J. A., R. Mead, By J. a Nelder, and R. Mead. 1964. "A Simplex Method for Function Minimization." *Computer Journal* 7:308–13. Retrieved (http://apps.isiknowledge.com.gate6.inist.fr/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=2&SID=R1L1cN2N12FbagJN87d&page=1&doc=2).
- Nicholson, S. E., C. J. Tucker, and M. B. Ba. 1998. "Desertification, Drought, and Surface Vegetation: An Example from the West African Sahel." *Bulletin of the American Meteorological Society* 79(5):815–29.
- Nicholson, Sharon E., Michael L. Davenport, and Ada R. Malo. 1990. "A Comparison of the Vegetation Response to Rainfall in the Sahel and East Africa, Using Normalized Difference Vegetation Index from NOAA AVHRR." *Climatic Change* 17(2-3):209–41.
- Noilhan, J., and J. F. Mahfouf. 1996. "The ISBA Land Surface Parameterization Scheme." *Global and Planetary Change* 13:145–59.
- Noilhan, J., and S. Planton. 1989. "A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models." *Monthly Weather Review* 117:536–49.
- Norman, J. M., W. P. Kustas, and K. S. Humes. 1995. "Source Approach for Estimating Soil and Vegetation Energy Fluxes in Observations of Directional Radiometric Surface Temperature." *Agricultural and Forest Meteorology* 77(3-4):263–93. Retrieved (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/016819239502265Y>).

- Ottlé, C., and D. Vidal-Madjar. 1994. "Assimilation of Soil Moisture Inferred from Infrared Remote Sensing in a Hydrological Model over the HAPEX-MOBILHY Region." *Journal of Hydrology* 158(3-4):241–64.
- Oweis, Theib, and Ahmed Hachum. 2001. "Reducing Peak Supplemental Irrigation Demand by Extending Sowing Dates." *Agricultural Water Management* 50(2):109–23.
- Phillips, J. ..., M. ... Cane, and C. Rosenzweig. 1998. "ENSO, Seasonal Rainfall Patterns and Simulated Maize Yield Variability in Zimbabwe." *Agricultural and Forest Meteorology* 90(1-2):39–50. Retrieved (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192397000956>).
- Pinstrup-Andersen, Per, and Rajul Pandya-Lorch. 1997. "World Food Needs toward 2020." *American Journal of Agricultural Economics* 79(5):1465.
- Preisendorfer, R. W., and C. D. Mobley. 1988. *Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography*.
- Prentice, I. C., X. Liang, B. E. Medlyn, and Y. P. Wang. 2015. "Reliable, Robust and Realistic: The Three R's of next-Generation Land-Surface Modelling." *Atmospheric Chemistry and Physics* 15(10):5987–6005.
- Prince, S. D. 1991. "Satellite Remote Sensing of Primary Production: Comparison of Results for Sahelian Grasslands 1981–1988." *International Journal of Remote Sensing* 12(6):1301–11.
- Prince, S. D., E. Brown De Colstoun, and L. L. Kravitz. 1998. "Evidence from Rain-Use Efficiencies Does Not Indicate Extensive Sahelian Desertification." *Global Change Biology* 4:359–74. Retrieved (<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0031821988&partnerID=tZ0tx3y1>).
- Prince, Stephen D., Konrad J. Wessels, Compton J. Tucker, and Sharon E. Nicholson. 2007. "Desertification in the Sahel: A Reinterpretation of a Reinterpretation." *Global Change Biology* 13(7):1308–13.
- Randerson, J. T., M. V. Thompson, T. J. Conway, I. Y. Fung, and C. B. Field. 1997. "The Contribution of Terrestrial Sources and Sinks to Trends in the Seasonal Cycle of Atmospheric Carbon Dioxide." *Global Biogeochemical Cycles* 11:535–60.
- Reichle, Rolf H. et al. 2007. "Comparison and Assimilation of Global Soil Moisture Retrievals from the Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E) and the Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR)." *Journal of Geophysical Research* 112:1–14.
- Richman, Michael B. 1986. "Rotation of Principal Components." *Journal of Climatology* 6(3):293–335. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1002/joc.3370060305>).
- Rind, D., J. Perlwitz, P. Lonergan, and J. Lerner. 2005. "AO/NAO Response to Climate Change: 2. Relative Importance of Low and High Latitude Temperature Changes." *Journal of Geophysical Research* 110(D12108).
- Rockström, Johan et al. 2009. "Future Water Availability for Global Food Production: The Potential of Green Water for Increasing Resilience to Global Change." *Water Resources Research* 45:1–16. Retrieved March 7, 2012 (<http://www.agu.org/pubs/crossref/2009/2007WR006767.shtml>).
- Rodriguez-Iturbe, I. 2000. "Ecohydrology: A Hydrologic Perspective of Climate-Soil-Vegetation Dynamics." *Water Resources Research* 36(1):3–9. Retrieved April 15, 2016 (<http://doi.wiley.com/10.1029/1999WR900210>).
- Rodriguez-Puebla, C., and S. Nieto. 2010. "Trends of Precipitation over the Iberian Peninsula and the North Atlantic Oscillation under Climate Change Conditions." *International Journal of Climatology* 30:1807–15.
- Sellers, P. J., W. J. Shuttleworth, J. L. Dorman, A. Dalcher, and J. M. Roberts. 1989. "Calibrating the Simple Biosphere Model (SiB) for Amazonian Tropical Forest Using Field and Remote Sensing Data: Average Calibration with Field Data." *Journal of Applied Meteorology* 28:728–56.
- Seuffert, G., H. Wilker, P. Viterbo, M. Drusch, and J. Mahfouf. 2003. "No On the Usage of Screen Level Parameters and Microwave Brightness Temperature for Soil Moisture Analysis." *Journal of Hydrometeorology* 5:516–31.
- Shiskin, J., A. H. Young, and J. C. Musgrave. 1967. *The X-11 Variant of the Census Method Seasonal Adjustment*.
- Shukla, J., and Y. Mintz. 1982. "Influence of Land-Surface Evapotranspiration on the Earth Climate." *Science* 215(7).
- Steele-Dunne, Susan C., Jan Friesen, and Nick Van De Giesen. 2012. "Using Diurnal Variation in Backscatter to Detect Vegetation Water Stress." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 50(7 PART1):2618–29.
- Tourre, Yves M., Balaji Rajagopalan, and Yochanan Kushnir. 1999. "Dominant Patterns of Climate Variability in the Atlantic Ocean during the Last 136 Years." *Journal of Climate* 12(8 PART 1):2285–99.
- Tucker, Compton et al. 2005. "An Extended AVHRR 8-Km NDVI Dataset Compatible with MODIS and SPOT Vegetation NDVI Data." *International Journal of Remote Sensing* 26(20):4485–98.
- Vapnik, V. N. 1989. *Statistical Learning Theory*. Wiley-Interscience.
- Venegas, Silvia A. 2001. *Statistical Methods for Signal Detection in Climate*. Copenhagen. Retrieved (http://alumnus.caltech.edu/~yongsheng.xu/vertical_coupling/files/statistic_method_for_signal_detection.pdf).
- Verhoef, W. 1984. "Light Scattering by Leaf Layers with Application to Canopy Reflectance Modeling: The SAIL Model." *Remote Sensing of Environment* 16(2):125–41.
- Wagner, W., J. Noll, M. Borgeaud, and H. Rott. 1999. "Monitoring Soil Moisture over the Canadian Prairies with the ERS Scatterometer." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 37(1):206–16. Retrieved June 1, 2015 (http://apps.webofknowledge.com.biblioplanets.gate.inist.fr/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=6&SID=X2zHQMbY3VKr7z8noeE&page=1&doc=5&cacheurlFromRightClick=no).
- Wismann, V. 2000. "Monitoring of Seasonal Thawing in Siberia with ERS Scatterometer Data." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38(4):1804–9. Retrieved June 9, 2015 (http://apps.webofknowledge.com.biblioplanets.gate.inist.fr/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=6&SID=P2yyFJli58B7Yk3GZME&page=36&doc=359&cacheurlFromRightClick=no).

Xoplaki, Eleni. 2002. "Climate Variability over the Mediterranean." University of Bern.

Souigné : Etudiants (co-) encadrés

PUBLICATIONS A COMITE DE LECTURE (RANG A)

- 2000-1-Frison P.L., Mougin E., **Jarlan L.**, Karam M.A., Hiernaux P., 2000, Comparison of ERS wind-scatterometer and SSM/I data for sahelian vegetation monitoring , IEEE Trans. Geosci. Remote Sens , vol 38, n° 4, p 1794-1803.
- 2002-1- **Jarlan L.**, Mougin E., Frison P.L, Mazzega P., Hiernaux P., 2002, Analysis of ERS Wind Scatterometer time series over Sahel (Mali) . Remote Sensing of Environnement, 81, 404-415.
- 2002-2- **Jarlan L.**, Mazzega P., Mougin E., 2002, Retrieval of land surface parameters from ERS scatterometer data: A brute-force method. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens, vol. 40, n°9, 2056-2062.
- 2003-1- **Jarlan L.**, Mazzega P., Mougin E., Lavenu F., Marty G., Frison P.L., Hiernaux P., 2003, Mapping of Sahelian Vegetation parameters from ERS Scatterometer data with an evolution strategie algorithm , Remote Sensing of Environment, vol 87:1, p. 72-84.
- 2005-1- **Jarlan L.**, Tourre Y., Mougin E., Philippon N., Mazzega P., 2005, Dominant patterns of AVHRR NDVI interannual variability over the Sahel and linkages with key climate signals, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 32:L04701, doi:10.1029/2004GL021841.
- 2005-2- **Jarlan L.**, Mougin E., Mazzega P., Schoenauer M., Tracol Y., Hiernaux P., 2005, Using coarse remote sensing radar observations to control the trajectory of a simple sahelian land surface model, REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, vol 94:2, p. 269-285.
- 2005-3- Philippon N., Mougin E., **Jarlan L.**, Frison P.L., 2005, Analysis of the linkages between rainfall and land surface conditions in the West African monsoon through CMAP, ERS-WSC and NOAA-AVHRR data, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-ATMOSPHERE, vol 110, D24115, doi:10.1029/2005JD006394.
- 2005-4- Zine S., **Jarlan L.**, Frison P.L., Mougin E., Hiernaux P., Rudant J.P., 2005, Land Surface Parameter monitoring with ERS Scatterometer data over the Sahel : A comparison between agro-pastoral and pastoral areas, REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 96:3-4, p. 438-452.
- 2006-1- Gibelin A.L., Calvet J.C., Roujean J.L., **Jarlan L.**, Los S., 2006, Ability of the land surface model ISBA-A-gs to simulate leaf area index at the global scale: Comparison with satellites products, J. Geophys. Res., Vol. 111, D18102, doi:10.1029/2005JD006691, 2006.
- 2006-2- Tracol Y., Mougin E., **Jarlan L.**, Hiernaux P., 2006, Testing a Sahelian Grassland Functioning model against herbage mass measurements, ECOLOGICAL MODELLING, 193, 437-446 .
- 2006-3- Rogel P., Tourre Y.M., Benoit V., **Jarlan L.**, 2006, Tropical Atlantic moisture availability and precipitation over West Africa: application to DEMETER hindcasts, GEOPHYS. RES. LETT., 33, L217711, doi: 10.1029/2006GL027178.
- 2007-1- Munoz-Sabater J., **Jarlan L.**, Calvet J.C., Bouyssel F., De Rosnay P., 2007, From near surface to root zone soil moisture using different assimilation techniques, J. Hydrometeorol., 8(2),194—206.
- 2007-2- Philippon N., **Jarlan L.**, Camberlin P., Martiny N., Mougin E., 2007, Characterization of the interannual and intraseasonal variability of West African vegetation between 1982-2002 from NOAA-AVHRR NDVI data, J. CLIMATE, 20, 1202-1218.
- 2008-1- Muñoz Sabater J., Rüdiger C., Calvet J.C, Fritz N., **Jarlan L.**, Kerr Y.H., 2008, Joint assimilation of surface soil moisture and LAI into a land surface model, Agricultural and Forest Meteorology, 148: 8-9, pp. 1362-1373.
- 2008-2- **Jarlan L.**, Mangiarotti S., Mougin E., Mazzega P., Hiernaux P., 2008, Assimilation of VEGETATION NDVI data into a Sahelian Grassland Model, REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 112: 4, pp. 1381-1394.
- 2008-3- Mangiarotti S., Mazzega P., **Jarlan L.**, Mougin E., Baup F. and Demarty J., 2008, Evolutionary bi-objective optimization of a semi-arid vegetation dynamics model with NDVI and sigma0 satellite data, REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 112: 4, pp. 1365-1380.
- 2008-4- **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.
- 2008-5- Tourre, Y.M., **Jarlan L.**, Lacaux, J.-P., Rotela, C.H., Lafaye, M., 2008. Spatio-temporal variability of NDVI–precipitation over southernmost South America: possible linkages between climate signals and epidemics. Environ. Res. Lett. 3, 044008.
- 2009-1- Boone, A., Decharme, B., Guichard, F., de Rosnay, P., Balsamo, G., Beljaars, A., Chopin, F., Orgeval, T., Polcher, J., Delire, C., Ducharne, A., Gascoin, S., Grippa, M., **Jarlan L.**, Kergoat, L., Mougin, E., Gusev, Y., Nasonova, O., Harris, P., Taylor, C., Norgaard, A., Sandholt, I., Ottlé, C., Pocard-Leclercq, I., Saux-Picart, S., Xue, Y., 2009. The AMMA Land Surface Model Intercomparison Project (ALMIP). Bull. Am. Meteorol. Soc. 90, 1865–1880.19.
- 2009-2- Brut, A., Ruediger, C., Lafont, S., Roujean, J.-L., Calvet, J.-C., **Jarlan L.**, Gibelin, A.-L., Albergel, C., Le Moigne, P., Soussana, J.-F., Klumpp, K., Guyon, D., Wigneron, J.-P., Ceschia, E., 2009. Modelling LAI at a regional scale with ISBA-A-gs: comparison with satellite-derived LAI over southwestern France. BIOGEOSCIENCES 6:8, 1389–1404.
- 2009-3- Mougin, E., Hiernaux, P., Kergoat, L., Grippa, M., de Rosnay, P., Timouk, F., Le Dantec, V., Demarez, V., Lavenu, F., Arjounin, M., Lebel, T., Soumaguel, N., Ceschia, E., Mougénot, B., Baup, F., Frappart, F., Frison, P.L., Gardelle, J., Gruhier,

- C., **Jarlan, L.**, Mangiarotti, S., Sanou, B., Tracol, Y., Guichard, F., Trichon, V., Diarra, L., Soumaré, A., Koité, M., Dembélé, F., Lloyd, C., Hanan, N.P., Damesin, C., Delon, C., Serça, D., Galy-Lacaux, C., Seghieri, J., Becerra, S., Dia, H., Gangneron, F., Mazzege, P., 2009. The AMMA-CATCH Gourma observatory site in Mali: Relating climatic variations to changes in vegetation, surface hydrology, fluxes and natural resources. *J. Hydrol.* 375, 14–33.
- 2010-1- Boudhar, a., Duchemin, B., Hanich, L., **Jarlan, L.**, Chaponnière, a., Maisongrande, P., Boulet, G., Chehbouni, a., 2010. Long-term analysis of snow-covered area in the Moroccan High-Atlas through remote sensing. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 12, S109–S115.
- 2010-2- Er-Raki, S., Chehbouni, A., Khabba, S., Simonneaux, V., **Jarlan, L.**, Ouldbba, A., Rodriguez, J.C., Allen, R., 2010. Assessment of reference evapotranspiration methods in semi-arid regions: Can weather forecast data be used as alternate of ground meteorological parameters? *J. Arid Environ.* 74, 1587–1596.
- 2010-3- Hadria, R., Duchemin, B., **Jarlan, L.**, Dedieu, G., Baup, F., Khabba, S., Olioso, A., Le Toan, T., 2010. Potentiality of optical and radar satellite data at high spatio-temporal resolutions for the monitoring of irrigated wheat crops in Morocco. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 12, S32–S37.
- 2011-1- Tourre, Y., Rousseau, D., **Jarlan, L.**, Le Roy Ladurie, E., Daux, V., 2011. Western European climate, and Pinot noir grape harvest dates in Burgundy, France, since the 17th century. *Clim. Res.* 46, 243–253.
- 2011-2- 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. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 1117–1129.
- 2012-1- Mangiarotti, S., Coudret, R., Drapeau, L., **Jarlan, L.**, 2012. Polynomial search and global modeling: Two algorithms for modeling chaos. *Phys. Rev. E* 86, 046205.
- 2012-2- Le Page, M., Berjamy, B., Fakir, Y., Bourgin, F., **Jarlan, L.**, Abourida, A., Benrhanem, M., Jacob, G., Huber, M., Sghrer, F., Simonneaux, V., Chehbouni, G., 2012. An Integrated DSS for Groundwater Management Based on Remote Sensing. The Case of a Semi-arid Aquifer in Morocco. *Water Resour. Manag.* 26, 3209–3230.
- 2013-1- Kharrou, M.H., Le Page, M., Chehbouni, A., Simonneaux, V., Er-Raki, S., **Jarlan, L.**, Ouzine, L., Khabba, S., Chehbouni, G., 2013. Assessment of Equity and Adequacy of Water Delivery in Irrigation Systems Using Remote Sensing-Based Indicators in Semi-Arid Region, Morocco. *Water Resour. Manag.* 27, 4697–4714.
- 2013-2- Belaiz, S., Khabba, S., Er-Raki, S., **Jarlan, L.**, Le Page, M., Kharrou, M.H., Adnani, M. El, Chehbouni, A., 2013. A new irrigation priority index based on remote sensing data for assessing the networks irrigation scheduling. *Agric. Water Manag.* 119, 1–9.
- 2013-3- Boussetta, S., Balsamo, G., Beljaars, A., Kral, T., **Jarlan, L.**, 2013. Impact of a satellite-derived leaf area index monthly climatology in a global numerical weather prediction model. *Int. J. Remote Sens.* 34, 3520–3542.
- 2013-4- Boussetta, S., Balsamo, G., Beljaars, A., Panareda, A.-A., Calvet, J.-C., Jacobs, C., van den Hurk, B., Viterbo, P., Lafont, S., Dutra, E., **Jarlan, L.**, Balzarolo, M., Papale, D., van der Werf, G., 2013b. Natural land carbon dioxide exchanges in the ECMWF integrated forecasting system: Implementation and offline validation. *J. Geophys. Res. Atmos.* 118, 5923–5946.
- 2014-1- Belaiz, S., Mangiarotti S., Le Page M., Khabba S., Er-Raki S., Agouti T., Drapeau L., Kharrou H., El Adnani M., **Jarlan L.**, Irrigation scheduling of a classical gravity network based on the Covariance Matrix Adaptation-Evolutionary Strategy algorithm, *Computer and Electronics in Agriculture*, 102, p. 64-72.
- 2014-2- Chirouze, J., Boulet, G., **Jarlan, L.**, Fieuzal, R., Rodriguez, J.C., Ezzahar, J., Er-Raki, S., Bigeard, G., Merlin, O., Garatuza-Payan, J., Watts, C., Chehbouni, G., 2014. Intercomparison of four remote-sensing-based energy balance methods to retrieve surface evapotranspiration and water stress of irrigated fields in semi-arid climate. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 1165–1188.
- 2014-3- **Jarlan, L.**, Abaoui, J., Duchemin, B., Ouldbba, A., Tourre, Y.M., Khabba, S., Le Page, M., Balaghi, R., Mokssit, A., Chehbouni, G., 2014a. Linkages between common wheat yields and climate in Morocco (1982-2008). *Int. J. Biometeorol.* 58, 1489–502.
- 2014-4- **Jarlan, L.**, Driouech, F., Tourre, Y., Duchemin, B., Bouyssié, M., 2014b. Spatio-temporal variability of vegetation cover over Morocco (1982 – 2008): linkages with large scale climate. *Int. J. Climatol.* 1261, 1245–1261.
- 2014-5- Le Page, M., Toumi, J., Khabba, S., Hagolle, O., Tavernier, A., Kharrou, M., Er-Raki, S., Huc, M., Kasbani, M., Moutamanni, A., Yousfi, M., **Jarlan, L.**, 2014. A Life-Size and Near Real-Time Test of Irrigation Scheduling with a Sentinel-2 Like Time Series (SPOT4-Take5) in Morocco. *Remote Sens.* 6, 11182–11203.
- 2014-6- Merlin, O., Chirouze, J., Olioso, A., **Jarlan, L.**, Chehbouni, G., Boulet, G., 2014. An image-based four-source surface energy balance model to estimate crop evapotranspiration from solar reflectance/thermal emission data (SEB-4S). *Agric. For. Meteorol.* 184, 188–203.
- 2015-1- Duchemin, B., Fieuzal, R., Rivera, M., Ezzahar, J., **Jarlan, L.**, Rodriguez, J., 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 Sens.* 7, 5951–5979.
- 2015-2- Fatras, C., Frappart, F., Mougou, E., Frison, P.-L., Faye, G., Borderies, P., **Jarlan, L.**, 2015. Spaceborne altimetry and scatterometry backscattering signatures at C- and Ku-bands over West Africa. *Remote Sens. Environ.* 159, 117–133.
- 2015-3- Gascoin, S., Hagolle, O., Huc, M., **Jarlan, L.**, Dejoux, J.-F., Szczypta, C., Marti, R., Sánchez, R., 2015. A snow cover climatology for the Pyrenees from MODIS snow products. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 2337–2351.
- 2015-4- **Jarlan, L.**, Khabba, S., Er-Raki, S., Le Page, M., Hanich, L., Fakir, Y., Merlin, O., Mangiarotti, S., Gascoin, S., Ezzahar, J., Kharrou, M.H., Berjamy, B., Saaïdi, A., Boudhar, A., Benkaddour, A., Laftouhi, N., Abaoui, J., Tavernier, A., Boulet, G.,

- Simonneaux, V., Driouech, F., El Adnani, M., El Fazziki, A., Amenzou, N., Raibi, F., El Mandour, A., Ibouh, H., Le Dantec, V., Habets, F., Trambly, Y., Mougenot, B., Leblanc, M., El Faiz, M., Drapeau, L., Coudert, B., Hagolle, O., Filali, N., Belaqqiz, S., Marchane, A., Szczypta, C., Toumi, J., Diarra, A., Aouade, G., Hajhouji, Y., Nassah, H., Bigéard, G., Chirouze, J., Boukhari, K., Abourida, A., Richard, B., Fanise, P., Kasbani, M., Chakir, A., Zribi, M., Marah, H., Naimi, A., Mokssit, A., Kerr, Y., Escadafal, R., 2015. Remote Sensing of Water Resources in Semi-Arid Mediterranean Areas: the joint international laboratory TREMA. *Int. J. Remote Sens.* 36, 4879–4917.
- 2015-5- Marchane, A., Jarlan, L., Hanich, L., Boudhar, A., Gascoin, S., Tavernier, A., Filali, N., Le Page, M., Hagolle, O., Berjamy, B., 2015. Assessment of daily MODIS snow cover products to monitor snow cover dynamics over the Moroccan Atlas mountain range. *Remote Sens. Environ.* 160, 72–86.
- 2015-6- Merlin, O., Malbêteau, Y., Notfi, Y., Bacon, S., Khabba, S., **Jarlan, L.**, 2015. Performance Metrics for Soil Moisture Downscaling Methods: Application to DISPATCH Data in Central Morocco. *Remote Sens.* 7, 3783–3807.
- 2015-7 Boulet G., Mougenot B., Lhomme J.P., Fanise P., Lili-Chabaane Z., Oliosio A., Bahir M., Rivalland V., **Jarlan L.**, Merlin O., Coudert B., Er-Raki S. and Lagouarde J.P., 2015, The Sparse Model for the prediction of water stress and evaporatranspiration components from thermal infra-red data and its evaluation over irrigated and rainfed wheat, *Hydr. Earth Syst. Sci.*, 19, 4653-4672.
- 2016-1- Toumi, J., Er-Raki, S., Ezzahar, J., Khabba, S., **Jarlan, L.**, Chehbouni, A., 2016. Calibration and Validation of the Aquacrop model for estimating evapotranspiration and grain yields of winter wheat in semi-arid region of Tensift Al-Haouz (Marrakech, Morocco): application to manage water irrigation. *Agric. Water Manag.*, 163, 219-235.
- 2016-2 Ahmed Marchane, Yves Trambly, Lahoucine Hanich, Denis Ruelland, **Lionel Jarlan**, 2016, Climate change impacts on surface water resources in the Rheraya catchment (High-Atlas, Morocco), *Hydrological Sciences Journal*, accepted for publication.
- 2016-3 Marchane A., Jarlan L., Boudhar A., Trambly Y., Hanich L., 2016, Linkages between Snow Cover, temperature and rainfall and the North Atlantic Oscillation over Morocco, *Climate Research*, accepted for publication.
- 2016-4 Aouade G., Ezzahar J., Amenzou N., Er-Raki S., Benkaddour A., Khabba S., **Jarlan L.**, 2016, Combining Stable isotopes and micrometeorological measurements for partitioning evapotranspiration of winter wheat into soil evaporation and plant transpiration in a semi-arid regions, *Agricultural Water Management*, accepted for publication.

PUBLICATIONS EN COURS

- 2016-5 Malbeteau Y., O. Merlin, S. Gascoin, J.P. Gastellu, C. Mattar, L. Olivera-Guerra, S. Khabba, **L. Jarlan**, 2016, Correcting land surface temperature data for elevation and illumination effects in mountainous areas: a case study using ASTER data over a steep-sided valley in Morocco, *Remote Sensing of Environment*, revisions majeures.
- 2016-6 G. Bigéard, B. Coudert, J. Chirouze, S. Er-Raki, G. Boulet, **L. Jarlan**, 2016, Estimating evapotranspiration with thermal infrared data over agricultural landscape: comparison of a simple energy budget model and a SVAT model, à soumettre à Hydrological and Earth System Sciences.
- 2016-7 Diarra A., Jarlan L., Er-Raki S., Le Page M., Aouade G., Boulet G., Ezzahar J., Merlin O., Khabba S., 2016, Comparison of two simple tools to retrieve evapotranspiration of irrigated agriculture in semi-arid areas. Case of the Tensift catchment in Morocco, à soumettre à Agricultural Water Management.

PUBLICATIONS A COMITE DE LECTURE (RANG B)

- 2011-3- Kharrou, M., Er-Raki, S., Chehbouni, A., Duchemin, B., Simonneaux, V., Le Page, M., Ouzine, L. and **Jarlan, L.** (2011) "Water use efficiency and yield of winter wheat under different irrigation regimes in a semi-arid region", *Agricultural Sciences*, vol. 2 n°. 3, 273-282. DOI: 10.4236/as.2011.23036.
- 2012-3- Er-Raki, S., Khabba, S., Er-raji, T., A., Ezzahar, J., **Jarlan, L.**, Hanich, L., Chehbouni, G., 2012. Evaluation of the sap flow measurements determined with Heat Balance Method for citrus orchards in semi-arid region. *Acta Horticulturae*, 951: 259-268.
- 2013-5 **Jarlan, L.**, Abaoui, J., Duchemin, B., Turre, Y., Ouldbba, A., Mangiarotti, S., Kharrou, H., Khabba, S., Ballaghi, R., Page, M. Le, Chehbouni, A., 2013. Déterminants climatiques de la variabilité interannuelle des rendements en céréales et prévision précoce. Application à la province de Settat (Maroc). *Rev. Française Photogrammétrie Télédétection* 204, 5–12.
- 2013-6- Khabba, S., **Jarlan, L.**, Er-Raki, S., Le Page, M., Ezzahar, J., Boulet, G., Simonneaux, V., Kharrou, M. H., Hanich, L., and Chehbouni, G., 2013, The SudMed Program and the Joint International Laboratory TREMA: A Decade of Water Transfer Study in the Soil-plant-atmosphere System over Irrigated Crops in Semi-arid Area, *Procedia Environmental Sciences*, 19, 524-533.
- 2013-7- Diarra, A., Jarlan, L., Er-Raki, S., Le Page, M., Khabba, S., Bigéard G., Tavernier, A., Chirouze, J., Fanise, P., Moutammani, A., Ezzahar, J., Kharrou, M.H., Chehbouni, G. 2013. Characterization of evapotranspiration over irrigated crops in a semi-arid area (Marrakech, Morocco) using an energy budget model. *Procedia Environmental Sciences*, 19, 504-513.
- 2013-8- Belaqqiz, S., El Fazziki, A., Mangiarotti, S., Le Page, M., Khabba, S., Er-Raki, S., El Adnani, M., **Jarlan, L.** 2013. An agent based modeling for the gravity irrigation management. *Procedia Environmental Sciences*, 19, 804-813.

- 2013-9- Marchane A., **Jarlan L.**, Hanich L., Boudhar A., 2013, Caractérisation de l'enneigement sur l'Atlas marocain par le capteur MODIS et relation avec le climat (période 2000-2011), *Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection*, 204, 1-14.
- 2013-10- Amenzou, N., Marah, H., Raibi, F., Ezzahar, J., Khabba, S., **Jarlan L.**, Ismaili, M., 2013, Estimation of soil evaporation and infiltration losses using stable isotopes, Fluxmeter and Eddy-Covariance system for citrus orchards in a semi-arid region (Morocco); *Academia Journal of Environmental Sciences*, 1 (1): 001-008.
- 2013-11- Abdelghani Boudhar, Lahoucine Hanich, Ahmed Marchane, **Lionel Jarlan**, Abdelghani Chehbouni (2013)- Apport des données FORMOSAT2 à la modélisation du contenu en eau du manteau neigeux du Haut Atlas Marocain. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 204: 5-12.

CHAPITRES D'OUVRAGE

- 2016-8 Frison P.-L, **Jarlan L.**, Mougouin E. 2016: Principe et applications des diffusiomètres pour le suivi des paramètres de surface. Chapitre de l'ouvrage « Techniques de télédétection pour l'observation des surfaces continentales », sous la direction de M. Zribi et N. Baghdadi. Editions ISTE, sous presse.
- 2016-9 **Jarlan L.**, Khabba S., Szczypta C., Lili-Chabaane Z., Driouech F., Le Page M., Hanich L., Fakir Y., Boone A., Boulet G., 2016, Chapitre "Water resources in southern Mediterranean catchments : assessing climatic drivers and impacts" au sein du livre "Changements climatiques en Méditerranée (COP22)" à l'initiative de l'AllEnvi, éditions IRD, 5 pages.
- 2014-7- **Jarlan L.** and Boulet G., 2014, Data assimilation for the monitoring of continental surfaces, "Remote sensing imagery", F. Tupin, J.M. Nicolas, J. Inglada Eds, ISTE/Wiley, ISBN: 978-1-84821-508-5, 368 p; <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-1848215088.html>.
- 2014-8- **Jarlan L.** and Boulet G., 2014, chapitre « Assimilation de données pour le suivi des surfaces continentales » dans *Imagerie de télédétection ; Traité IC2, série Signal et image*, edited by: Hermes, Lavoisier, 369 pp, 2014.
- 2012-4- Er-Raki, S., Ezzahar, J., Khabba, S., **Jarlan, L.**, Chehbouni, G., 2012. Micrometeorology tools for measuring evapotranspiration from the leaf to the region. In: *Evapotranspiration: Processes, Sources and Environmental Implications*. Nova Science Publishers, Inc. 1-23. ISBN:978-1-62417-138-3.
- 2012-5- Ezzahar J., Er-Raki, S., Bouarifi W., **Jarlan L.**, Marah H., Khabba S., Ed Dabdouby M., Chehbouni G., 2012. Estimation of the evapotranspiration over sparse and tall vegetation using the Large Aperture Scintillometer. In: *Evapotranspiration: Processes, Sources and Environmental Implications*. Nova Science Publishers, Inc., 167-181. ISBN: 978-1-62417-138-3.1

LISTE DES CONFERENCES, SEMINAIRES ET COMMUNICATIONS ORALES OU PAR AFFICHE

CONFERENCES AVEC PROCEEDING

- 2016-4- Malbêteau Y., O. Merlin, L. Jarlan, S. Khabba, M.J. Escorihuela, B. Molero, Y. Kerr. Towards a soil moisture product at high-spatio-temporal resolution: time interpolation of spatially-disaggregated SMOS data based on high-frequency precipitation data (2016) ESA Living planet Symposium, Prague, Czech Republic, communication orale.
- 2014-9- Merlin O., Y. Malbêteau, V. Stefan, S. Er-Raki, M. J. Escorihuela, S. Gascoin, S. Khabba, V. Le Dantec, C. Mattar, B. Molero, C. Rüdiger, **L. Jarlan**. Thermal Infrared: key integrator of multi-spectral/multi-resolution data for surface energy-water balance studies in semi-arid regions (2014) 4th International Symposium Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, Torrent (Valencia), Spain, communication orale.
- 2014-10- Bahir M., Boulet G., Chirouze J., Olioso A., Rivalland V., Gallego-Elvira B., Mira. M., Merlin O., **Jarlan L.**, Lagouarde J.P., 2014. Validation of evapotranspiration maps from 100-m to the 1-km scale over a semi-arid irrigated agricultural area. RAQRS'IV, Valencia, Spain, poster.
- 2014-11- Boulet G., Mougouin B., Lili-Chabaane Z, Fanise P., Olioso A., Bahir, M., Rivalland V., **Jarlan L.**; Coudert B. and Lagouarde, J.-P., 2014. Total and component evapotranspiration retrieval performances of a single-pixel energy balance model over agricultural crops RAQRS'IV, Valencia, Spain, communication orale.
- 2014-12- **L. Jarlan**, S. Khabba, M. Le Page, S. Er-Raki, L. Hanich, Y. Fakir, S. Mangiarotti, J. Ezzahar, M.H. Kharrou, B. Berjamy, O. Merlin, A. Saaïdi, S. Gascoin, A. Boudhar, M. Leblanc, G. Boulet, A. Benkaddour, J. Abaoui, V. Simonneaux, F. Driouech, S. Belaqqiz, G. Bigeard, G. Boulet, F. Raibi, J. Chirouze, B. Coudert, L. Drapeau, M. El Adnani, A. El Fazziki, O. Hagolle, N. Laftouhi, A. El Mandour, A. Marchane, A. Diarra, G. Aouade, J. Toumi, Y. Hajhouji, P. Fanise, H. Ibouh, N. Filali, B. Mougouin, H. Marah, A. Mokssit, Y. Kerr, G. Chehbouni. 2014. Remote Sensing of Water Resources in the semi-arid Mediterranean areas: The Joint International Laboratory TREMA. 4th International Symposium Recent Advances in Quantitative Remote Sensing Torrent (Valencia), Spain, 22-26 September 2014, communication orale.
- 2014-13- Khabba, S., Er-Raki, S., Le Page, M., Hamaoui, A., **Jarlan, L.** 2014. Evapotranspiration of an orange orchard in the semi-arid conditions: Calibration and validation of the Penman-Monteith Model. 7th International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications, May 6-8, 2014, Marrakesh-Morocco, communication orale.
- 2014-14- Diarra, A., **Jarlan, L.**, Er-Raki, S., Khabba, S., Le Page, M. 2014. Using the Two Source Energy Balance (TSEB) approach for estimating latent heat flux of irrigated crops in semi-arid area of Marrakech (Morocco). 7th International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications, May 6-8, 2014, Marrakesh-Morocco, communication orale.

- 2014-15- Toumi, J., Le Page, M., Er-Raki, S., Khabba, S., Ezzahar, J., Tavernier, A., El Moutamanni, A., Kharrou, M.H., Hagolle, O., **Jarlan, L.**, 2014, Simulations of water and energy fluxes of Winter Wheat into Soil-Plant-Atmosphere in semi-arid region: test of SAMIR software in the context of the SPOT4-Take5 experiment. 7th International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications, May 6-8, 2014, Marrakesh-Morocco, poster.
- 2014-16- Er-Raki, S., Khabba, S., Ezzahar, J., **Jarlan, L.**, Chehbouni, G. 2014. Using the Heat Balance Method to measure sap flow (Transpiration) of olives and Citrus Orchards in Semi-Arid Region of Morocco. 7th International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications, May 6-8, 2014, Marrakesh-Morocco, communication orale.
- 2014-17- A. G. Chehbouni, L. Jarlan, O. Merlin, G. Boulet, R. Escadafal, S. Khabba, S. Erraki, L. Hanich, C. Watts, D. Goodrich, Y. Kerr, S. Sorooshian, 2014, Remote Sensing and Surface-atmosphere interactions in Drylands : Lessons learned, current status and future challenges, 4th International Symposium Recent Advances in Quantitative Remote Sensing Torrent (Valencia), Spain, 22-26 September 2014, communication orale.
- 2014-18- G. Bigeard, B. Coudert, L. Jarlan, S. Er-Raki, 2014, Evapotranspiration estimation from Surface Energy Balance and SVAT Models with thermal infrared monitoring over agricultural landscapes, 4th International Symposium Recent Advances in Quantitative Remote Sensing Torrent (Valencia), Spain, 22-26 September 2014, poster.
- 2013-12- Merlin O., V. Stefan, Y. Malbêteau, M.-J. Escorihuela, C. Rüdiger, **L. Jarlan** (2013), Data disaggregation and evapotranspiration modeling: a synergism between multi-spectral/multi-resolution remote sensing data, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, communication orale.
- 2013-13- Khabba S., **Jarlan L.**, Er-Raki S., Le Page M, Ezzahar J., Boulet G., Simonneaux V., Kharrou M.H., Hanich L., Chehbouni G., 2013, The SudMed program and the Joint International Laboratory TREMA: A decade of water transfer study in the Soil-Plant- Atmosphere system over irrigated crops in semi-arid area. International Conference on Monitoring and Modeling Soil-Plant-Atmosphere Processes. Naples (Italy), 19-20 June 2013, communication orale.
- 2013-14- Belaqziza, S., El Fazziki, A., Mangiarotti, S., Le Page, M., Khabba, S., Er-Raki, S., El Adnani, M., **Jarlan, L.**, 2013, An agent based modeling for the gravity irrigation management. International Conference on Monitoring and Modeling Soil-Plant-Atmosphere Processes. Naples (Italy), 19-20 June 2013, poster.
- 2013-15- Diarra, A., **Jarlan, L.**, Er-Raki, S., Le Page, M., Khabba, S., Bigeard, G., Tavernier, A., Chirouze, J., Fanise, P., Moutamanni, A., Ezzahar, J., Kharrou, M.H., Chehbouni, G., 2013, Characterization of Evapotranspiration over Irrigated Crops in a Semi-arid Area (Marrakech, Morocco) Using an Energy Budget Model. International Conference on Monitoring and Modeling Soil-Plant-Atmosphere Processes. Naples (Italy), 19-20 June 2013, communication orale.
- 2013-16- Tavernier A., **Jarlan L.**, Er-Raki S., Bigeard G., Khabba S., Saaidi A., Le Page M., Chirouze J., Boulet G. 2013. Data assimilation of surface soil moisture, temperature and evapotranspiration estimates in a SVAT model over irrigated agriculture in semi-arid areas: what is best to constraint evapotranspiration predictions? SPIE Remote sensing conference, 23-26 September, Dresden, Germany, communication orale.
- 2012-6- Er-Raki, S., Diarra, A., **Jarlan, L.**, Le Page, M., Khabba, S., Belaqziz, S., Tavernier, A., Kharrou, M.H., Chehbouni, AG., 2012. Utilisation de la télédétection et SIG pour l'estimation de l'évapotranspiration du blé et de la betterave dans une région semi-arides du Maroc. The 9th International Conference of African Association of Remote Sensing of the Environment (AARSE), 29 octobre – 02 novembre, El Jadida, Maroc, communication orale.
- 2012-7- Belaqziz, S., Khabba, S., Er-Raki, S., **Jarlan, L.**, Le Page, M., El Adnani, M., Chehbouni, AG., 2012. Caractérisation de la distribution des irrigations par l'utilisation de la télédétection pour les réseaux d'irrigation gravitaire. The 9th International Conference of African Association of Remote Sensing of the Environment (AARSE), 29 octobre – 02 novembre, El Jadida, Maroc, communication orale.
- 2012-8- **Jarlan, L.**, Abaoui, J., Duchemin, B., Tourre, Y., Ouldbba, A., Mangiarotti, S., Kharrou, M.H., Khabba, S., Ballaghi, R., Le Page, M., Mokssit, A., Chehbouni, AG., 2012. Déterminants climatiques de la variabilité interannuelle des rendements en cereales et prevision precoce. Application a la province de Settat (Maroc). The 9th International Conference of African Association of Remote Sensing of the Environment (AARSE), 29 octobre – 02 novembre, El Jadida, Maroc, communication orale.
- 2012-9- Belaqziz, S., El Fazziki, A., El Adnani, M., Le Page, M., **Jarlan, L.**, Khabba, S., 2012. Gravity irrigation system: a business process and an agent-based modeling. 1st International IEEE Conference on Logistics Operations Management, ISEL, 17-19 October, Le Havre, France., poster.
- 2011-4- Belaqziz S., El Adnani M., Le Page M., Khabba S., Agouti T., Kharrou M.H., Er Raki S., **Jarlan L.**, 2011. Cost function and constraints of irrigation scheduling in open canal irrigation networks with remote sensing water balance. WATer and Environment International Conference WATEIC, Marrakech, Octobre 2011, communication orale.
- 2011-5- **Jarlan, L.** Khabba, S., Chehbouni. A., et al., 2011. The SudMed program and the Joint International Laboratory TREMA Dealing with "remote sensing of water resources in the semi-arid mediterranean area". WATer and Environment International Conference WATEIC, Marrakech, Octobre 2011, **conférence invitée.**
- 2011-6- Mangiarotti S., L. Drapeau, R. Coudret & **Jarlan L.**, Modelisation par approche globale de la dynamique du ble pluvial observee par teledetection spatiale en zone semi-aride, 14e Rencontre du Non Lineaire, Universite Pierre et Marie Curie, Paris, France, 2011, communication orale.
- 2011-7- Er-Raki, S., Khabba, S., Er-raji, T., A., Ezzahar, J., **Jarlan, L.**, Hanich, L., Chehbouni, A., 2011 Evaluation of the sap flow measurements determined with Heat Balance Method for citrus orchards in semi-arid region. 8th International Workshop on Sap Flow, Volterra, Italie, 8-12 mai 2011, communication orale.

- 2011-8- LE PAGE Michel, Berjamy B., Fakir Y., Bourgin F., Jacob, G., **Jarlan L.**, Abourida A., Huber M., Wolfer J. , Tilborg H., "Implementation of a Weap-Modflow model based on water demand derived by Remote Sensing in a semi-arid climate. The case of the Haouz Mejjate plain in Morocco", WATEIC, Marrakech, Oct 2011, communication orale
- 2011-9- Mangiarotti S., L. Drapeau, R. Coudret & **Jarlan L.**, 2011, Modélisation par approche globale de la dynamique du blé pluvial observée par télédétection spatiale en zone semi-aride, 14e Rencontre du Non Linéaire, 14, 103-108, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, ISBN 978-2-9538596-0-7, communication orale.
- 2010-4- J. Chirouze, G. Boulet, P. Béziat, **L. Jarlan**, R. Fieuzal, J. Garatuza-Payan, C. Watts, J.C. Rodríguez, J. Ezzahar, S. Er-raki and G. Chehbouni, 2013, Performance assessment of four surface energy budget models, forced with in-situ and ASTER surface temperature, against eddycovariance and scintillometer data in temperate and semi-arid regions, Recent Advances in Quantitative Remote Sensing (RAQRS) , 27 septembre-1 octobre 2010, Valencia, Spain, poster.
- 2010-5- L. Jarlan, F. Driouech, Y. M. Tourre, B. Duchemin, J. Abaoui, M. Le Page, H. Kharrou, A. Ouldbba, A. Mokssit and G. Chehbouni, 2010, Interannual vegetation dynamics over Morocco through the NDVI/AVHRR from 1982 to 2008: linkages with climate signals and potential for seasonal prediction, Recent Advances in Quantitative Remote Sensing (RAQRS) , 27 septembre-1 octobre 2010, Valencia, Spain, communication orale.
- 2008-6- Calvet, J.-C., C. Rüdiger, **J. M. Sabater**, N. Fritz, J.-F. Mahfouf, A.-L. Gibelin, E. Martin, G. Balsamo, P. de Rosnay, **L. Jarlan**, A. Brut, Y. Kerr, and J.-P. Wigneron, "Assimilation of EO data in land surface models: interactions between water and carbon cycles," in: J. Walker, R. Pipunic, and C. Draper (Eds.), Proceedings of the 3rd international CAHMDA workshop on: Hydrologic Prediction – Modelling, Observation, and Data Assimilation, Melbourne, Australia, 9-11 January, 2008, 4pp, communication orale.
- 2008-7- **Sabater, J.M.**, C. Rüdiger, J.-C. Calvet, **L. Jarlan**, and S. Massart, "Joint assimilation of surface soil moisture and LAI observations with a simplified 1D-VAR assimilation scheme," in: J. Walker, R. Pipunic, and C. Draper (Eds.), Proceedings of the 3rd international CAHMDA workshop on: Hydrologic Prediction Modelling, Observation, and Data Assimilation, Melbourne, Australia, 9-11 January, 2008, 4pp, poster
- 2008-8- Simonneaux, V., Abourida, A., Boudhar, A., Cheggour, A., Chaponniere, A., Berjamy, B., Boulet, G., Chehbouni, A., Drapeau, L., Duchemin, B., Erraki, S., Ezzahar, J., Escadafal, R., Guemouria, N., Hanich, L., **Jarlan, L.**, Kharrou, H., Khabba, S., Le Page, M., Mangiarotti, S., Merlin, O., Mougénot, B., Mokssit, A., Ouldbba, A. and Chehbouni, A., 2008, Integrated modelling of the water cycle in semi arid watersheds based on ground and satellite data: the SudMed project. In: C.M.U. Neale and A. Maltese (Editors), Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology Xii. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, communication orale.
- 2007-3- Martin Eric, Patrick Le Moigne, Valéry Masson, Aaron Boone, Andrey Bogatchev, Aurore Brut, François Bouyssel, Jean-Christophe Calvet, Jean-Louis Champeaux, Katia Chancibault, Bertrand Decharme, Sylvie Donier, Hervé Douville, Adam Dziedzic, Dominique Giard, Stéphanie Faroux, Claude Fischer, Anne-Lauree Gibelin, Florence Habets, Gwenaëlle Hello, **Lionel Jarlan**, Mohamed Jidane, Luksa Kraljevic, Laszlo Kullmann, Christine Lac, Pierre Lacarrère, Cindy Lebeau-pin, Jean-François Mahfouf, Sylvie Malardel, Isabelle Mallet, Pascal Marquet, Valéry Masson, Mohamed Mokthari, Jeanine Payart, Joël Noilhan, Père Quintana Seguí, Yann Seity, Pierre Tulet, Béatrice Vincendon, Rashyd Zaaboul, Ingeborg Zuurendonk (2007) :Le code de surface externalisé SurfEx de Météo-France. Atelier de modélisation de l'atmosphère, Toulouse, 16-17 janvier 2007, communication orale.
- 2007-4- Rüdiger, C., J.-C. Calvet, J.-F. Mahfouf, **L. Jarlan**, G. Balsamo, and J. M. Sabater, "Assimilation of Land Surface Variables for Model Initialisation at Météo-France," in: L. Oxley and D. Kulasiri (Eds.), Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM). Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Inc., Christchurch, New Zealand, 10-13 December, 2007, 1716-1722, communication orale.
- 2006-4- Mangiarotti S., **Jarlan L.**, Mougén E., Mazzega P., Baup F., 2006, Assimilation of optical and RADAR data in a simple land surface model over Sahel with a multi-criterion evolution strategies algorithm. Recent Advances in quantitative remote sensing, Valence, September 25-29, poster.
- 2006-5- Mangiarotti S., **Jarlan L.** et al., 2006. Assimilation de données Optique et Radar dans un modèle simple de fonctionnement régional de la végétation au Sahel par stratégies d'évolution multicritère, Colloque National Assimilation de données, météo-France, Toulouse, 2006, communication orale.
- 2006-6- Mangiarotti S., **Jarlan L.** et al., Assimilation of VEGETATION/SPOT4 NDVI data in a simple land surface model to monitor vegetation over the AMMA meso-scale site (Mali), 1st international AMMA conference, Dakar, Senegal, 2006, communication orale.
- 2006-7- Calvet, J.-C., A. L. Gibelin, J. Muñoz-Sabater, C. Rüdiger, A. Brut, A. Beljaars, S. Lafont, **L. Jarlan**, A. Friend, B. van den Hurk, E. J. Moors : Towards near-operational global and regional monitoring of carbon fluxes over land using EO data, Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, Valencia, septembre 2006, communication orale.
- 2006-8- Gibelin, A. L., J. C. Calvet, J. L. Roujean, **L. Jarlan**, S. Los : Validation of Global leaf area index simulated by the ISBA-A-gs model through comparison with satellite products, Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, Valencia, septembre 2006, poster.
- 2006-9- **Jarlan, L.**, J. C. Calvet, P. Lemoigne, S. Lafont, G. Balsamo, A. Beljaars, A. L. Gibelin, A. Brut, J. Muñoz, F. Bouyssel : A simplified 2DVAR assimilation scheme to analyse above-ground biomass from satellite LAI products into the ISBA-A-GS model. Application to the southwestern France, Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, Valencia, septembre 2006, poster.

- 2006-10- Lafont, S., A. Beljaars, M. Voogt, **L. Jarlan**, P. Viterbo, B. van Hurk, J. C. Calvet : Comparison of CTESSEL CO2 fluxes with satellite-derived CO2 fluxes, Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, Valencia, septembre 2006, poster.
- 2006-11- Munoz-Sabater J., **L. Jarlan**, JC Calvet : Assimilation of remote sensing data in a SVAT model with a simplified 1DVAR Scheme, Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, Valencia, septembre 2006, poster.
- 2005-5 Voogt M., **Jarlan L.**, Van den Hurk B., Model comparison of carbon fluxes and LAI evolution in the ECMWF Land Surface, poster présenté à Boulder, Etats-Unis, September 2005, communication orale.
- 2005-6 **Jarlan L.**, Calvet J.C., Viterbo P., Lafont S., Friend A., Demarty J., Van Den Hurk B., Voogt M., Moors E., Kaptein A., Leroy M., Assimilation d'observations satellitaires pour le suivi du cycle du carbone continental : l'observatoire "Carbone" du projet GEOLAND, Talk, "Atelier de modélisation de l'atmosphère", Toulouse, November 29-30, 2004, 4 pages, communication orale.
- 2004-1- S. Zine, P.-L. Frison, **L. Jarlan**, E. Mougin, P. Hiernaux, J.-P. Rudant; 2004, "Suivi d'un site agro-pastoral sahélien par les diffusiomètres d'ERS", Xèmes Journées Scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUF, Ottawa, Canada, May 24-29, 2004, communication orale.
- 2004-2- S. Zine, P.-L. Frison, **L. Jarlan**, E. Mougin, P. Hiernaux, J.-P. Rudant; "Analysis of ERS SAR and Wind Scatterometer data complementarity over an agro-pastoral Sahelian area", ERS & ENVISAT Symposium, Salzburg, Austria, 6-10 September 2004, proceeding on CDROM, communication orale.
- 2003-2- Zine S., Frison P.L., **Jarlan L.**, Mougin E., Hiernaux P., Girard B., 2003, Comparison between SAR and Wind Scatterometer Data for Surface Parameters Monitoring over a Sahelian Agro-pastoral Area, Talk, IGARSS'03, Toulouse, 20-25 juillet, communication orale.
- 2003-3- **Jarlan L.**, Mougin E., Mazzega P., Hiernaux P., Contrôle d'un modèle de fonctionnement de la végétation sahélienne par observations satellitaires multi-spectrales. Application au projet AMMA., "Atelier de modélisation de l'atmosphère", Toulouse, December 3-5, 2003, 4 pages, communication orale.
- 2003-4- Tracol Y., De Rosnay P., **Jarlan L.**, Kergoat L., Lavenu F., Le Dantec V., Mougenot B., Mougin E. et Seghieri J. 2003, Performance et Perspectives d'utilisation d'un modèle de fonctionnement de la végétation en zone sahélienne dans le cadre du projet AMMA,"Atelier de modélisation de l'atmosphère", Toulouse, December 3-5, 2003, 4 pages, communication orale.
- 2002-3- **Jarlan L.**, Mazzega P., Mougin E., Duchemin B., Frison P.L., Hiernaux P., 2002, Retrieving Vegetation Characteristics From ERS Wind Scatterometer Data Using an Evolutionary strategy algorithm Application to the African Sahel, poster, « Recent Advances in Quantitative Remote Sensing », Valencia, September 16-20, 8 pages, poster.
- 2001-1- **Jarlan L.**, Mazzega P., Mougin E., Frison P.L., 2001, Retrieving land surface parameters over Sahel from ERS scatterometer data : a comparison of inversion methods, « Physical measurements and signatures in remote sensing », Aussois, January 8-12, 2001, p. 597-602., poster.
- 2001-2- **Jarlan L.**, Mougin E., Frison P.L., Mazzega P., Hiernaux P., 2001, Interpretation of ERS WSC time series over Sahel during the period 1991-1999. "ERS-ENVISAT", Göteborg, 16-20 octobre (proceedings on CDROM), communication orale.
- 2000-2- **Jarlan L.**, Mazzega P., Mougin E., Inversion des données du diffusiomètre vent ERS pour le suivi des paramètres de surface en zone sahélienne. « Atelier de Modélisation de l'Atmosphère », Toulouse, November 29-30, 2000, p. 65-68., communication orale
- 2000-3- **Jarlan L.**, Mazzega P., Mougin E., Frison P.L., 2000, Retrieving land surface parameters over Sahel from ERS scatterometer data. Talk, Symposium EUROPTO-SPIE., Barcelone, September 25-27, vol 4171:15, p. 137-148, communication orale.
- 1999-1- Courel M-F., Bicheron P., Mougin E., **Jarlan L.**, 1999, Contribution de la télédétection à l'étude de la désertification : exemples choisis en Afrique de l'Ouest. La télédétection en Francophonie : analyse, critique et perspective. poster, Lausanne, November 22-25, 1999, p. 113-118, communication.

CONFERENCES SANS PROCEEDING

- 2016-9- **Jarlan L.**, Zribi M., Le Page M., Khabba S., Merlin O., Lili Chahbane Z., Le Dantec V., Al Bitar A., Simonneaux V., Er-Raki S., Mougenot B., Drapeau L., Boulet G., 2016. Remote sensing indicators of drought and plant water stress from multi-spectral remote sensing observations for the South Mediterranean region. HyMeX Workshop on Drought and Water Resources Zaragoza, Spain, 5-7 April 2016, communication orale.
- 2016-10- Hanich L., Er-Raki S., Simonneaux V., Khabba S., **Jarlan L.**, Trambly Y., Fakir Y., Saadi A., Berjamy B., Kharrou M.H., Chehbouni A., 2016. Integrated modelling of water resources in the semi-arid Tensift basin (Marrakech, Morocco). HyMeX Workshop on Drought and Water Resources Zaragoza, Spain, 5-7 April 2016, communication orale.
- 2016-11- Aithssaine B., Ezzahar J., **Jarlan L.**, Merlin O., Khabba S., Er-Raki S., 2016. Combining a two source energy balance model, aggregation approach and MODIS data to estimate area-averaged turbulent fluxes during the AMMA experiment. International Conference on Water, Energy & Climate Change WECC, Marrakech, June 1- 4, 2016, ?.
- 2016-12- Khabba S., Er-Raki S., Nassah H., Ezzahar J., Merlin O., Kharrou M.H., Simonneaux V., **Jarlan L.**, 2016. Experimental study of the water balance of the irrigated horticultures in the southern Mediterranean basin. ISHS Symposium 2016 Sensing Plant Water Status - Methods and Applications in Horticultural Science, Potsdam/Berlin Germany, October 5 - 7, 2016., ?

- 2016-13- Malbêteau Y., O. Merlin, **L. Jarlan**, S. Khabba, M.J. Escorihuela, B. Molero, Y. Kerr. Towards a soil moisture product at high-spatio-temporal resolution: time interpolation of spatially-disaggregated SMOS data based on high-frequency precipitation data (2016) Workshop AMETHYST, Marrakech, Morocco, communication orale.
- 2016-14- Aouade G., **Jarlan J.**, Ezzahar J., Er-raki S., Napoly A., Benkaddour A., Khabba S., Boulet G., Chehbouni A., Boone A., 2016. Using ISBA model for partitioning evapotranspiration into soil evaporation and plant transpiration of irrigated crops under semi-arid climate. European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria 17-22 April 2016, poster.
- 2016-15- Diarra A., **Jarlan L.**, Er-Raki S., Le Page M., Khabba S., Boulet G., 2016. Comparison of two simple tools (TSEB and FAO-56) to retrieve evapotranspiration of irrigated agriculture in semi-arid areas. European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria 17-22 April 2016, poster.
- 2016-16- Ezzahar J., Chehbouni A., Er-Raki S., Aouade G., Khabba S., Merlin O., Boulet G., **Jarlan L.**, 2016. A Two-source Energy Balance Model for estimating evapotranspiration over an olive orchard in a semi-arid region of Morocco. European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria 17-22 April 2016, poster.
- 2016-17- Sefiani S., El Mandour A., Laftouhi N., Khalil N., Chehbouni A., **Jarlan L.**, Hanich L., Khabba S., Hamaoui A., Kamal S., 2016. Hydrodynamic and hydrochemical characterization of groundwater in agricultural area (case of Agafay farm-Western Haouz) Morocco. European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria 17-22 April 2016, poster.
- 2016-18- Toumi J., Khabba S., Er-Raki S., Le Page M., Chahbi A., Lili Chabaane Z., Ezzahar J., Zribi M., **Jarlan J.**, 2016. Simple, spatial and predictive approach for cereal yield prediction in the semi-arid areas. European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria 17-22 April 2016, poster.
- 2016-19- Aouade G., **Jarlan J.**, Ezzahar J., Er-Raki S., Napoly A., Benkaddour A., Khabba S., Boulet G., Chehbouni A., Boone A., 2016. Evaluation of the performance of two versions of ISBA model for estimating evapotranspiration over an olive orchard in a semi-arid region of Morocco. International Conference on Water, Energy & Climate Change WECC, Marrakech, June 1- 4, 2016, ?.
- 2016-20- Marchane, A., S. Gascoin, **L. Jarlan**, L. Hanich (2016) Distributed modeling of snow cover mass and energy balance in the Rheraya watershed (High Atlas, Morocco), EGU General Assembly, 17-22 April 2016, Vienna, poster.
- 2016-21- Trambly Y., **Jarlan L.**, Somot S., Hanich L., 2016, Future water availability in North African dams simulated by high-resolution regional climate models, EGU General Assembly, 17-22 April 2016, Vienna, communication orale, conference invitée.
- 2016-22 Jihad Toumi, Said Khabba, Salah Er-Raki, Michel Le page, Aicha Chahbi Bellakanji, Zohra Lili Chabaane, Jamal Ezzahar, Mehrez Zribi, and **Lionel Jarlan** (2016), Simple, spatial and predictive approach for cereal yield prediction in the semi-arid areas, EGU General Assembly, 17-22 April 2016, Vienna, communication orale.
- 2015-7- Szczypta, C., S. Gascoin, F. Habets, A. Saaidi, B. Berjamy, A. Marchane, G. Boulet, L. Hanich, and **L. Jarlan**, 2015. Evaluation of the SAFRAN-ISBA-RAPID hydrometeorological chain on a mountainous catchment in a semi-arid region. Case of the Rheraya (Marrakech, Morocco), Geophysical Research Abstracts Vol. 17, EGU2015-14149 EGU General Assembly, Vienna, 12-17 avril 2015, poster.
- 2015-8- Khabba S., **Jarlan L.**, Er-Raki S., Le Page M., Merlin O., Ezzahar J., Kharrou M.H. 2015. Study of the hydrological functioning of the irrigated crops in the southern mediterranean basin. European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria 27 April – 02 May 2015, communication orale.
- 2015-9- Le Jean F., Drapeau L., **Jarlan L.** & Mangiarotti S. Low-dimensional models for cereal crop cycles observed from space in semi-arid region at different geographic locations and scales, *European Geophysical Union, April 2015, Vienna, Austria*, poster.
- 2015-10- Szczypta, C., Gascoin, S., Habets, F., Saaidi, A., Berjamy, B., Marchane, A., Boulet, G., Hanich, L., **Jarlan, L.**, Evaluation of la chaîne SAFRAN-ISBA-RAPID sur un bassin de montagne en région semi-aride. Cas du bassin de la Rheraya (Marrakech, Maroc), Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, 20-21 Jan 2015, Toulouse, France, communication orale.
- 2014-19- Fatras C., Frappart F., Mougouin E., P.-L. Frison, F. Gayane, P. Borderies, **L. Jarlan** 2014. Spaceborne altimetry and scatterometry backscattering coefficients at C- and Ku- band over West Africa. IGARSS'2014 / 35th CSRS 'Energy and our changing planet', Québec, Canada, 13-18 July, Poster.
- 2014-20- Le Page M., Khabba S., Simonneaux V., Belaqqiz S., Kharrou M.H., Er-Rak S., Berjamy B., Fakir Y., Duchemin B., Boulet G., Mougouin B., Lili Chaabane Z., Hagolle O., Chehbouni G., **Jarlan L.** 2014. Remote Sensing Time Series for Water Management of Irrigated Areas in Semi-Arid Regions. Sentinel-2 for Science Workshop, 20 - 22 May 2014, Frascati, Italy, communication orale.
- 2014-21- Toumi, J., Le Page, M., Er-Raki, S., Khabba, S., Tavernier, A., Kharrou, M.H., Belaqqiz, S., Ezzahar, J., **Jarlan, L.** 2014. Potentialités de l'imagerie satellitaire pour le pilotage de l'irrigation en conditions réelles: Test du logiciel SAMIR pour une culture du blé dans la région Tensift Al Haouz/Marrakech. Journées Méditerranéens des Systèmes d'Informations de l'Eau. 20- 21 Mars, Rabat, Maroc, communication orale.
- 2014-22- Mroos K., Baroni G., Er-Raki S., Francke T., Khabba S., **Jarlan L.**, Hanich L., Oswald S.E., 2014. Assessment of the soil water balance by the combination of cosmic ray neutron sensing and eddy covariance technique in an irrigated citrus orchard (Marrakesh, Morocco). European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria 27 April – 02 May 2014, poster.
- 2014-23- Leblanc M., Gascoin S., Le Page M., Fakir Y., Hanich L., Khabba S., **Jarlan L.**, Leblanc S., Leduc C., 2014. Intensification of groundwater use in the Mediterranean region observed at different scales. European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria 27 April – 02 May 2014, poster.

- 2014-24- Marchane A., Jarlan L., Hanich L., Boudhar A., Gascoïn S., Le Page M., Tavernier A., Filali N., Berjamy B., Khabba S., Chehbouni G., 2014. Snow cover dynamic in the Atlas Chain (Morocco) using daily MODIS products over the last decade. European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria 27 April – 02 May 2014, communication orale.
- 2014-25- Simon Gascoïn, Fabrice Dubertret, Laurent Drapeau, Nahossio Gonga-Saholiariliva, **Lionel Jarlan**, Benoît Duchemin, Philippe Maisongrande, 2014, SCOTA: AN OPEN SOURCE TOOLBOX FOR SNOW COVER MAPPING FROM SPOT-VEGETATION DAILY SYNTHESSES, . IGARSS'2014 / 35th CSRS 'Energy and our changing planet', Québec, Canada, 13-18 July, Poster.
- 2014-26- Leblanc, M., Fakir, Y. Hanich, L., Gascoïn, S., Le Page, M., Khabba, S., Jarlan, L., Leblanc, S., Leduc C. (2014) Remote Sensing of groundwater and climate variability in the Tensift and Souss Basins, Morocco (2014) 41st IAH International Congress "Groundwater : Challenges and Strategies" Marrakech, September, 15-19, 2014, communication orale
- 2014-27- Drapeau L., Le Jean F., Gascoïn S., **Jarlan L.**, Mangiarotti S., The Cycles of Snow Cover in Pyrenees Mountain and Mount Lebanon Analyzed Using the Global Modeling Technique., AGU Fall Meeting, 15-19 dec 2014, San Francisco, poster.
- 2014-28- Le Page Michel, S. Khabba, **L. Jarlan**, S. Er Raki, H. Kharrou, O. Hagolle, A.Tavernier, M. Huc, M. Kasbani, J. Toumi, M. Yousfi, "SAT-IRR, a web service to help with irrigation decision based on time series of satellite images of high spatial and temporal resolution", SPOT5-Take5 user workshop, CNES, Toulouse, Nov 2014, communication orale.
- 2014-29- Richard B., Jarlan L., Abaoui J., Duchemin B., Ouldbba A., Mangiarotti S., Le Page M., Tourre Y., Khabba S., Balaghi R., Mokssit A., Chehbouni G., 2014, Potentials for Early Prediction of Wheat Yields in Morocco using Support Vector Regression and large scale climate indices, EuroMED Crop Monitoring conference, Rabat, 19-21 novembre 2014, communication orale.
- 2013-17- Faye G., Frison P.-L., Jarlan L., Mougïn E., Hiernaux P., Rudant J.-P., 2013. Complementarity of C-band and Ku-band radar data for phytomass and soil moisture estimation over a Sahelian area: Ferlo (Senegal). ESA Space Living Planet Symposium, Edinburgh, Scotland, 9-13 September, Poster.
- 2013-18- Fatras C., Frappart F., Mougïn E., Frison P.L., Faye G., Jarlan L., 2013. Seasonal variations of C- and Ku-bands backscattering from altimeters and scatterometers over West-Africa. ESA Space Living Planet Symposium, Edinburgh, Scotland, 9-13 September, Poster.
- 2013-19- Fatras C., Frappart F., Mougïn E., P.L. Frison, G. NDiaye, Jarlan L., 2013. Surface properties in West Africa from spaceborne radars in C and Ku bands. EGU General Assembly, Vienna, 07-12 April, poster.
- 2013-20- Khabba, S., Er-Raki, S., **Jarlan, L.**, Ezzahar, J., Le Page, M., Hamaoui, A. 2013. Evapotranspiration of the orange orchard in the semi-arid conditions: Modeling and experiment. 16ème Edition des Journées Internationales de Thermiques, 15-17 Novembre 2013, communication orale.
- 2013-21- Marchane, A., A. Boudhar, L. Hanich, S. Gascoïn, **L. Jarlan**, Evaluation du produit neige MOD10A1 en zone de montagne semi-aride à l'aide d'une série d'images FORMOSAT-2 et des mesures in situ (2013) 7e éditions des Journées Internationales des Géosciences de l'Environnement JIGE7, 13-15 Nov. 2013, Marrakech, Morocco, communication orale.
- 2013-22- Le Page M. et al, « Ejemplos de buenas prácticas: Experiencias en el uso de aplicaciones satelitales para la gestión del agua en el área mediterránea », Aplicaciones satelitales para la gestión multinivel de riego: capitalización de experiencias para impulsar la innovación regional 31 October 2013 Badajoz, Spain
- 2013-23- Michel LE PAGE, Saïd KHABBA, Lionel JARLAN, Adrien TAVERNIER, Mohamed YOUSFI, Olivier HAGOLLE, Mireille HUC, Hakim KHARROU, Salah ERRAKI, Jihad TOUMI, "A Life-Size and Real-time Test of Irrigation Driving with Satellite Imagery in Morocco", SPOT4-Take5 user workshop, CNES, Toulouse, 18-19 Nov 2013, communication orale.
- 2012-10- Bigéard G., Coudret B. Jarlan L. Er-Raki S., Khabba S. 2012. Estimating evapotranspiration over agricultural landscapes with thermal infrared data: comparison of two approaches using Simple Energy Budget and SVAT modeling. EGU General Assembly, 22-27 April, Vienne, Austria, p.5392, poster.
- 2012-11- Ezzahar J, Marah, H, Amenzou N, Aouade G., Toumi J., Er-Raki S., Khabba S., Taous F., **Jarlan L.**, Lee H. 2012. Using the Aquacrop model for partitioning of evapotranspiration into soil and plant components for winter wheat in a semi-arid region. 1er Colloque REZAS12: "Ressources en eau dans les zones arides et semi-arides: Enjeux et perspectives. Cas du continent africain", Beni Mellal, 14-16 Novembre 2012, communication orale.
- 2011-10- Erraji, T., Khabba, S., Er-Raki, S., Hamaoui, A., **Jarlan, L.**, Hanich, L., Chehbouni, A., 2011. Besoin en eau de l'oranger irrigué par le goutte-à-goutte en zone semi-arides. 3ème Congrès international Amélioration de la production Agricole APA3, Settat 17-18 mars 2011, poster.
- 2011-11- Mangiarotti S., L. Drapeau, R. Coudret & **Jarlan L.**, 2011, A 3-dimensional chaotic jerk model for the dynamics of rainfed wheat from NDVI satellite data, From Laser dynamics to topology of chaos, June 28-30 2011, Rouen, France, communication orale.
- 2010-11- Chehbouni A., Boulet G., Drapeau L., Duchemin B., Escadafal R., **Jarlan L.**, Le Page M., Mangiarotti S., Mougïn B., Simonneaux V., Chehbouni A., Hanich L., Khabba S., Berjamy B., Kharrou H., Mokssit A., Ouldbba A., Filali N., 2010. Une Approche Intégrée de Modélisation de la Ressource en Eau à l'Echelle d'un Bassin Versant Marocain pour l'Etude de l'Impact et de l'Adaptation au Changement Climatique : le programme SUDMED. Rencontre régionale: Adaptation aux changements climatiques au Maghreb: bilan et perspectives" Casablanca les 16 et 17 mars 2010, communication orale.
- 2010-12- Chehbouni, A., Escadafal, R., Duchemin, B., Boulet, G., Le Page, M., **Jarlan, L.**, Simonneaux, V., Mougïn B., Mangiarotti, S., Drapeau, L., Khabba, S., Hanich, L., Chehbouni, A. H., Ezzahar, J., Er-Raki, S., Hadria, R., Kharrou, H.,

- Merlin, O., Chaponnière, A., Hoedjes, J., Abourida, A., Cheggour, A., Raibi, F., Boudhar, A., Benhadj, I., Berjamy, B., Benkaddour, A., Guemouria, N., Lahrouni, A., Mokssit, A., Ouldabba, A., Driouech, F., Filali, N., Olioso, A., Jacob, F. 2010. Fonctionnement et ressources hydro-écologiques en région semi-aride (tensift, Maroc) : le projet SudMed. 2ème Congrès International sur la Gestion Intégrée des Ressources en Eaux et Défis du Développement Durable (GIRE3D2), Agadir les 24-26 Mars 2010, communication orale.
- 2009-4- Duchemin B., BenHadj I., Baup F., Boulet G., Chehbouni A., Claverie M., Courault D., Dedieu G., Demarez V., Er-Raki S., Escadafal R., Ezzahar J., Fieuzal R., **Jarlan L.**, Hadria R., Hagolle O., Khabba S., Le Page M., Le Toan T., Maisongrande P., Merlin O., Mougénot B., Olioso A., Simonneaux V., Zribi M., 2009. Observation spatiale à haute répétitivité spatiale et temporelle : applications pour le suivi de la ressource hydrique en milieu agricole semi-aride. Congrès « utilisation de l'imagerie satellite pour l'étude de l'eau dans le sol et le proche sous-sol », Toulouse, France, 31 mars-1er avril 2009, communication orale.
- 2009-5- Duchemin B., Fieuzal R., Perez-Ruiz E.R., Rivera M.A., Hadria R., Erraki S., Ezzahar J., Boulet G., **Jarlan L.**, Mougénot B., Khabba S., Zribi M., Baup F., Benhadj I., Garatuza-Payan J., Hagolle O., Olioso A., Simonneaux V., Chehbouni A., 2009. Observation spatiale à hautes résolutions spatiale et temporelle pour le suivi des ressources hydro-agricoles en milieu agricole semi-aride. XIèmes Journées Scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUF, Alger, Algérie, 8-11 Novembre 2009, communication orale.
- 2009-6- Boone A., de Rosnay P., Balsamo G., Beljaars A., Chopin F., Delire C., Decharme B., Ducharne A., Gascoin S., Guichard F., Gusev Y., Harris P., **Jarlan L.**, Kergoat L., Mougénot E., Nasonova O., Norgaard A., Orgeval T., Ottle C., Pocard-Leclercq I., Polcher J., Sandholt I., Saux-Picart S., Taylor C.M., Xue Y., 2009. The AMMA land surface model inter-comparison project: Summary of Phase 1 and Perspectives for Phase 2. AMMA International Conference, Ouagadougou, July 20-24, communication orale.
- 2009-10- Frison P.-L., Faye G., Riazanoff S., Mougénot E., **Jarlan L.**, Baup F., Hiernaux P., Ndione J.-A., Wade S., Rudant J.-P., 2009, Contribution of METOP ASCAT data for land surface parameters monitoring over the Sahel. 2nd EPS/METOP RAO Workshop, Barcelona, Spain, 20-22 May, communication orale.
- 2008-9- Hadria, R., Duchemin, B., Baup, F., Benhadj, I., Boulet, G., Bouvet, A., Dedieu, G., Ezzahar, J., Hagolle, O., **Jarlan, L.**, Khabba S., Lepage, M., Olioso, A., LeToan, T., 2008. Combined use of high spatial resolution optical and radar satellite data for the monitoring of wheat crops in the semi-arid Tensift/Marrakech plain. 13th IWRA World Water Congress, Montpellier, France, 1-6 September 2008, poster.
- 2008-10- Chehbouni, A., Boulet, G., Duchemin, B., Simonneaux, V., Escadafal, R., Mougénot, B., Hanich, L., **Jarlan, L.**, Khabba, S., Le Page, M., Er-Raki, S., Ezzahar, J., Hadria, R., Merlin, O., Abourida, A., Cheggour, A., Benhadj, I., 2008. An integrated modelling and remote sensing approach for hydrological study in arid and semi-arid regions. 13th IWRA World Water Congress, Montpellier, France, 1-6 September 2008, communication orale.
- 2007-5- Mangiarotti S., Baup F., **Jarlan L.**, Mazzega P., Mougénot E., 2007, Modelling Contrasted Yearly Rainfall Impacts on Sahelian Vegetation via a Bi-Objective Data Assimilation Scheme (Biomass and LAI in situ Data), EGU General Assembly, Vienna, Austria, 15-20 April, poster.
- 2007-6- Calvet, J.-C., A.-L. Gibelin, J. M. Sabater, C. Rüdiger, J.-L. Roujean, **L. Jarlan**, A. Brut, P. De Rosnay, J.-F. Soussana, «Utilisation de la télédétection dans le modèle ISBA-A-gs de Météo-France : du globe à la région », Journées d'Ecologie Fonctionnelle, 19-22 mars 2007, Biarritz, communication orale.
- 2006-12- Calvet J.C. et al., The Carbon Observatory of GEOLAND : Results and Prospects, EGU06, Vienne, 2-7 Avril 2006, communication orale.
- 2006-13- Mangiarotti S., Jarlan L., Mougénot E., Mazzega P., Baup F., Schoenauer M., 2006, Assimilation of optical and radar data into a simple land surface model over sahel with a multi-criterion evolution strategies algorithm, EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 3-7, poster.
- 2006-14- Brut, A., J.-C. Calvet, **L. Jarlan**, P. Lemoigne, J. Noilhan, A.-L. Gibelin, C. Sarrat, P. Lacarrère : Simulations over South-Western France with the ISBA-A-gs model : insights into several European projects, EGU, Vienne, avril 2006, poster.
- 2006-15- Muñoz Sabater, J.; Calvet, J.C.; **Jarlan, L.** : Assimilation of surface soil moisture and LAI observations in a SVAT model, EGU, Vienne, avril 2006, poster.
- 2006-16- Calvet, J.-C.; Beljaars, A.; Friend, A.; van den Hurk, B.; Moors, E.; **Jarlan, L.**; Lafont, S.; Demarty, J.; Voogt, M.; Jacobs, C. : The carbon observatory of geoland: results and prospects, EGU, Vienne, avril 2006, poster.
- 2006-16- Munoz-Sabater J., **L. Jarlan**, JC Calvet, F Bouyssel, P De Rosnay : Assimilation des observations de l'humidité de surface et du LAI dans le modèle de surface ISBA-A-gs, Colloque National sur l'Assimilation de données, Toulouse, mai 2006, poster.
- 2005-7- Calvet J.-C., L. Jarlan, A.-L. Gibelin, P. Viterbo, A. Friend, B. van den Hurk, E. Moors, A. Kaptein, M. Leroy : Vers un suivi opérationnel de la végétation et des flux de CO₂ à l'échelle globale : geoland/ONC, Journées d'Ecologie Fonctionnelle, Super-Besse, mars 2005, communication orale.
- 2005-8- Mougénot E., Kergoat L., Le Dantec V., Hiernaux P., Seghieri J., Lavenu F., Timouk F., De Rosnay, Baup F., Berg A., Mangiarotti S., Demarez V., Mougénot B., Ceschia E., Tracol Y., **Jarlan L.**, Damesin C., Delon C., Serça D., Lacaux-Galy C., Dupont R., Epron D., Gignoux J., Leroux X., Mazzega P., Guichard F., 2005, Approche Multi-Echelles du Fonctionnement des Eco-Agrosystèmes d'Afrique de l'Ouest. Colloque ECCO, 5-7 déc., Toulouse, communication orale.

- 2005-9- **Jarlan L.**, Tourre Y., Mougouin E., Philippon N., Mazzega P., Mangiarotti S., 2005, Principaux motifs de variabilité de l'indice de végétation NDVI et des produits LAI issus des longues séries temporelles acquises par les capteurs AVHRR sur le Sahel (1982-2003). Première Conférence Internationale AMMA, Dakar, 28 nov. - 4 dec, poster.
- 2005-10- Mougouin E., Hiernaux P., Kergoat L., Seghier J., Lavenu F., Tracol Y., **Jarlan L.**, Diarra L., Dembélé F., Karembé M., Mougouinot B., Timouk F., de Rosnay P., LeDantec V., Baup F., Mangiarotti S., 2005, Réponse de la végétation sahélienne en Afrique de l'Ouest à la variabilité climatique. Conséquences sur les interactions surface-atmosphère. Première Conférence Internationale AMMA, Dakar, 28 nov. - 4 dec, communication orale.
- 2005-11- Mangiarotti S., Mazzega P., Mougouin E., **Jarlan L.**, Hiernaux P., 2005, Prédicibilité du cycle de la végétation en Afrique de l'ouest à partir des données NDVI : analyse des invariants en fonction des échelles spatiales. Première Conférence Internationale AMMA, Dakar, 28 nov. - 4 dec, poster.
- 2005-12- Mangiarotti S., **Jarlan L.**, Mougouin E., Mazzega P., Hiernaux P., 2005, Assimilation des données NDVI-VGT/SPOT dans un modèle de surface simple visant au suivi de la végétation et de la dynamique des flux d'eau sur la région du Gourma (Mali). Première Conférence Internationale AMMA, Dakar, 28 nov. - 4 dec, poster.
- 2005-13- Mougouin E., Baup F., Ceschia E., Damesin C., Delon C., Demarez V., De Rosnay P., Epron D., Hiernaux P., **Jarlan L.**, Kergoat L., Lavenu F., Le Dantec V., Lloyd C., Mangiarotti S., Mazzega P., Mougouinot B., Lacaux-Galy C., Seghier J., Serça D., Timouk F., 2005, Overview of research activities at the Gourma meso-scale site (Mali). EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 26-29, communication orale.
- 2005-14- Baup F., Mougouin E., **Jarlan L.**, Ottlé C., Coudert B., Kergoat L., 2005, Modelling vegetation growth and associated energy fluxes over the AMMA Malian site. EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 26-29, poster.
- 2005-15- **Jarlan L.**, Tourre Y., Mougouin E., Philippon N., Mazzega P., Mangiarotti S., 2005, Relationships between spatio-temporal variability of AVHRR-NDVI series over the Sahel and SST for neighbouring oceans for the 1982-2003 period. EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 26-29, poster.