



HAL
open science

Apport de la modélisation et de l'assimilation de données pour la caractérisation des surfaces continentales en prévision numérique du temps

Gianpaolo Balsamo

► **To cite this version:**

Gianpaolo Balsamo. Apport de la modélisation et de l'assimilation de données pour la caractérisation des surfaces continentales en prévision numérique du temps. Météorologie. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2012. tel-00859340

HAL Id: tel-00859340

<https://theses.hal.science/tel-00859340>

Submitted on 6 Sep 2013

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

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



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

Spécialité : Sciences de la Terre et de l'Univers

*Apport de la modélisation et de l'assimilation de données pour la
caractérisation des surfaces continentales
en prévision numérique du temps*

*Présenté le 30 Novembre 2012 à
MÉTÉO-FRANCE/CNRM, Toulouse, France, en salle Joël Noilhan*

Par Dr. Gianpaolo BALSAMO

*Centre Européen pour
les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme*

Devant le jury composé de :

Prof. Serge CHAUZY	Président
Dr. Jean-François MAHFOUF	Directeur de recherche
Dr. Isabelle BRAUD	Rapporteur
Dr. Frédéric CHEVALLIER	Rapporteur
Prof. Dara ENTEKHABI	Rapporteur
Dr. Peter BAUER	Examineur
Dr. François BOUYSSEL	Examineur
Prof. Claudio CASSARDO	Examineur
Prof. Sonia SENEVIRATNE	Examineur
Dr. Jean-Pierre WIGNERON	Examineur

AUTEUR : Dr. Gianpaolo BALSAMO

TITRE : *Apport de la modélisation et de l'assimilation de données pour la caractérisation des surfaces continentales en prévision numérique du temps*

DIRECTEUR DE RECHERCHE : Dr. Jean-François MAHFOUF

RESUME : *Une description réaliste des processus physiques du sol, de la végétation, de la couche de neige et de la couche de mélange des lacs et des océans dans les modèles de prévision du temps contribue à l'amélioration des prévisions météorologiques aux échéances allant de l'échelle journalière à l'échelle saisonnière. De plus, les méthodes d'assimilation permettant l'initialisation des variables pronostiques des schémas de surface sont essentielles pour corriger les erreurs accumulées en surface, provenant des forçages et de la modélisation.*

Je présente dans ce mémoire une synthèse de mes travaux de recherches qui ont porté sur le développement et la validation de schémas de surface pour la prévision numérique du temps ainsi que sur le développement de techniques d'assimilation innovantes pour les surfaces continentales. L'ensemble de ces activités se sont appuyées sur la disponibilité de données d'observations (in-situ et par télédétection) informatives sur les processus modélisés. Je termine en proposant plusieurs pistes à explorer pour la modélisation et l'assimilation des processus de surface pour diverses applications environnementales.

MOTS-CLES : *Modélisation de surface; Assimilation de données; Suivi des stocks d'eau, d'énergie et du carbone dans la biosphère; prévision numérique du temps.*

DISCIPLINE : *Physique de l'Atmosphère/ Météorologie*

LABORATOIRE : *Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT / ECMWF), Shinfield Park, Reading, RG2 9AX, Berkshire, Royaume-Uni.*

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	6
INTRODUCTION	8
CHAPITRE 1: LES DONNEES POUR LES SURFACES CONTINENTALES	13
LES OBSERVATIONS IN-SITU	13
<i>Le système mondial de télécommunications (SMT ou GTS)</i>	14
<i>Les réseaux de mesures au sol (non-GTS)</i>	15
<i>Le réseau FLUXNET</i>	15
<i>Les réseaux nationaux (SMOSMANIA, SCAN, OZ-NET)</i>	16
PROGRAMMES DE COORDINATION D'OBSERVATIONS AU SOL	17
<i>L'infrastructure CEOP</i>	17
<i>L'infrastructure ISMN</i>	18
<i>L'infrastructure ICOS</i>	18
<i>L'infrastructure GRDC</i>	18
LES CAMPAGNES DE MESURES	19
LES OBSERVATIONS SATELLITAIRES	21
<i>Les satellites en orbite géostationnaire</i>	21
<i>Les satellites en orbite polaire</i>	22
APPROCHE INTEGREE POUR LE SUIVI DES FLUX DE SURFACE	22
CHAPITRE 2: LA MODELISATION DES PROCESSUS DE SURFACE	25
LES CYCLES GLOBAUX DE L'ENERGIE, DE L'EAU ET DE LA VEGETATION	25
<i>Les processus hydrologiques et thermodynamiques dans le sol</i>	28
<i>Le manteau neigeux</i>	32
<i>Les lacs et la couche limite superficielle océanique</i>	35
<i>Les rivières</i>	39
<i>La végétation</i>	40
<i>Les émissions naturelles de CO₂ en surface</i>	41
<i>Les émissions naturelles dans les fréquences micro-ondes en surface</i>	45
LES PROJETS DE COMPARAISON ENTRE LES MODELES DE SURFACE	48
CHAPITRE 3 : LES METHODES D'ASSIMILATION DE DONNEES	51
LA METHODE D'INTERPOLATION OPTIMALE	52
<i>La méthode OI appliquée à l'eau et la température du sol</i>	52
<i>La méthode OI appliquée à l'épaisseur du manteau neigeux</i>	53
LES METHODES VARIATIONNELLES	54
<i>La méthode 2D-Var appliquée à l'eau du sol</i>	54
<i>La méthode 2D-Var appliquée à l'indice foliaire</i>	57
LES FILTRES DE KALMAN	58
APPORTS DES EXPERIENCES D'ASSIMILATION UTILISANT DES DONNEES SIMULEES	59
PROJETS D'INTERCOMPARAISON DES METHODES D'ASSIMILATION	61
L'APPORT DE L'ASSIMILATION POUR LE REGLAGE ET L'INITIALISATION DES MODELES.....	62
<i>La profondeur des lacs</i>	63
CHAPITRE 4 : DEFIS DES MOYENNES ET LONGUES ECHEANCES POUR LE SUIVI DE L'ETAT DE LA SURFACE ET LA PREVISION DU TEMPS	65
L'ETAT ACTUEL DE LA MODELISATION ET DE L'ASSIMILATION ET LES PRIORITES A MOYEN TERME	66
L'IMPORTANCE DES RE-ANALYSES POUR LES DEVELOPPEMENTS DE LA SURFACE	66
<i>Qualité du forçage météorologique</i>	67
<i>ERA-Interim/Land</i>	68
<i>L'initiative européenne du "Global Land Monitoring Core Service"</i>	69
PREVISIBILITE LIEE AUX SURFACES CONTINENTALES	70
<i>Lien entre précipitations et eau du sol dans la mousson Africaine</i>	70

<i>Les projets GLACE et GLACE2</i>	71
<i>Prévisibilité liée aux autres composantes de la surface</i>	74
PERSPECTIVES POUR LA RECHERCHE EN SURFACE.....	75
<i>La modélisation intégrée des processus de surface</i>	76
<i>L'assimilation couplée surface-atmosphère</i>	77
<i>Les méthodes d'assimilation adaptées aux systèmes non-linéaires et au réglage des paramètres</i>	77
<i>Les méthodes d'optimisation des statistiques d'erreurs dans les systèmes d'assimilation de surface</i>	78
BIBLIOGRAPHIE	79
BIBLIOGRAPHIE DES TRAVAUX	87
APPENDICE	96

Remerciements

Le moteur principal de la recherche est sans doute la curiosité, qui anime toutes les découvertes de l'être humain depuis sa plus tendre enfance. Une première curiosité dans un mémoire de recherche apparaît au niveau du paragraphe des "remerciements", souvent les 3-ème ou 4-ème paragraphes regardés en abordant un manuscrit, qui fournit des informations au futur lecteur. Dans ce paragraphe je vais donc d'abord remercier le lecteur pour être arrivé là et pour tout le temps qui voudra dédier à la lecture de ce travail. Plusieurs personnes méritent d'être remerciées et l'ordre ici n'est pas forcément logique, ni séquentiel, ni malheureusement complet. Je vais commencer par remercier Giovanna Ricci, pour sa passion de l'enseignement à l'école primaire et pour avoir insinué un peu de mathématiques dans nos têtes d'enfants. Ensuite, et avec un saut de 10 ans, merci à Adriano Ballone d'avoir utilisé les heures d'enseignement d'Italien pour nous apprendre à nous poser des questions, même quand la présentation des faits, dans un quotidien d'actualité comme dans un livre d'histoire, semblait parfaitement convaincante. Les bonnes questions nous permettent de progresser dans la solution d'un problème ou dans l'évaluation de sa complexité. Les débuts de l'informatique domestique ont vu arriver, grâce à mon frère Roberto, le premier PC à la maison et avec lui j'ai beaucoup appris et partagé dans ce domaine, comme dans de nombreux d'autres. Merci à Arnaldo Longhetto et Claudio Cassardo de l'Université de Turin de m'avoir initié à la météorologie sans trop de démonstrations initiales de ma part, sinon une grande motivation pour apprendre avec les meilleurs scientifiques de ce domaine. Merci à Stefano Tibaldi, Tiziana Paccagnella, Carlo Cacciamani, du Service Météorologique de Bologne de m'avoir montré qu'on peut avoir un travail d'un niveau élevé tout en ayant du plaisir à l'accomplir. Merci à Renata Pelosini, Roberto Cremonini, Daniele Gandini, de m'avoir appris le métier de prévisionniste météo et à Stefano Bovo et Vincenzo Coccolo de m'avoir proposé mon premier contrat de météorologue à Turin.

En Juin 2000, deux événements assez peu prévisibles dans ma vie m'ont poussé à entreprendre une carrière scientifique internationale: l'obtention d'une bourse d'études pour faire un doctorat en France et la perte de mon frère. Ce que l'on gagne et ce que l'on perd nous apprend énormément sur nos défauts et nos qualités, nos forces et nos faiblesses, et nous fait progresser dans la recherche la plus importante, qui soit celle de l'être humain que l'on veut devenir, et de notre place dans la société.

De mes études en France je suis redevable de mes compétences dans le domaine de la prévision numérique du temps. Le passage de l'utilisateur des produits météo à celui de modélisateur a été très stimulant et je souhaite remercier Jean-François Geleyn pour son investissement dans le projet de formation ALATNET et pour m'avoir accueilli au sein du GMAP du CNRM de Météo-France à Toulouse. Joël Noilhan et François Bouyssel ont encadré mon travail de recherche doctorale et je leur suis extrêmement reconnaissant, pour les qualités scientifiques et humaines dont j'ai pu bénéficier. Après avoir passé presque quatre ans en France, l'envie de traverser l'Atlantique et de travailler en Amérique du Nord avec des experts du traitement des surfaces continentales s'est concrétisée. Jean-François Mahfouf, Stéphane Bélair et Godelieve Deblonde m'ont accueilli dans le laboratoire de recherche en prévision numérique, RPN, d'Environnement Canada à Dorval, et j'ai

été ravi de travailler avec eux. La personne à qui je dois beaucoup à partir de cette période est mon épouse Ilenia, qui a accepté le défi des hivers canadiens avec moi, et a fait de notre expérience au Canada le début de notre vie de famille.

En 2006, j'ai commencé mes activités au Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme, à Reading, en qualité de responsable de l'activité de modélisation de la surface, sous la Direction de Philippe Bougeault, Martin Miller et Anton Beljaars. Je leur adresse un grand merci pour leur soutien dans mes activités, merci qui s'étend à mon équipe de direction actuelle, et à tous les collègues (au CEPMMT et dans d'autres laboratoires en collaboration) qui contribuent au plaisir quotidien que je peux avoir dans mon travail. Une liste exhaustive serait inutile au lecteur et resterait sans doute incomplète mais je tiens à remercier l'ensemble de mes collaborateurs au quotidien.

Enfin, je souhaite remercier mes parents, Vittoria et Franco, de m'avoir encouragé durant mes études et au début de ma carrière professionnelle, bien au-delà de leurs ambitions personnelles ou de leurs préférences. Je leur serai toujours redevable des efforts qu'ils ont prodigués et je peux simplement leur promettre un égal soutien dans l'éducation de nos filles. C'est à elles que je dédie ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches.

À Arianna et Isabella

En m'excusant symboliquement auprès de M. Victor Hugo pour mes « mauvais traitements » de la langue Française, je souhaite faire référence à ses mots:

...
*Ce peu de chose est ce que, pour sa part,
Dans l'univers chacun cherche et désire:
Un mot, un nom, un peu d'or, un regard,
Un sourire!*

...
*Une loi sort des choses d'ici-bas,
Et des hommes!*

...
*Et la voici, toute âme y peut atteindre:
Ne rien haïr, mon enfant; tout aimer,
Ou tout plaindre!*

Paris, 1842, « À ma fille », dans « Les Contemplations »

Introduction

L'importance d'une description précise des surfaces continentales pour la modélisation atmosphérique a été largement établie dans la communauté scientifique depuis plus de trente ans (Manabe, 1969 ; Shukla et Minz, 1982 ; Delworth et Manabe 1988; Atlas et al. 1993). C'est en particulier le cas pour la prévision numérique du temps ainsi que pour les simulations climatiques.

Le rôle des surfaces continentales est de permettre une description cohérente des cycles de l'eau et de l'énergie atmosphériques à des échelles temporelles variées allant de quelques heures à plusieurs décennies.

De nombreuses études de sensibilité ont montré que la description des processus physiques des surfaces continentales peut affecter de manière significative la prévision de variables météorologiques, telles que les précipitations, le vent de basses couches ou la température sous abri (Beljaars et al. 1996, Koster et Suarez, 1992, Wang et Kumar 1998, Koster et al. 2004).

Aux moyennes latitudes, le principal mécanisme de couplage entre la surface terrestre et l'atmosphère est représenté par la rétroaction évapotranspiration-précipitations, qui influe sur les paramètres météorologiques tels que la température, l'humidité de la basse troposphère, et les nuages. Cette rétroaction met en jeu l'eau du sol dans la couche racinaire qui est une des variables de surface les plus importantes contrôlant la prévision des températures estivales, dans la mesure où elle régule la partition de l'énergie radiative disponible en surface en flux d'évaporation et en flux de chaleur sensible.

Aux latitudes élevées et dans les zones montagneuses, la présence de neige affecte l'évolution des températures atmosphériques à cause de son albédo élevé et de son pouvoir d'isolation thermique permettant un découplage entre la surface et l'atmosphère, à l'origine de fortes inversions de température observées près de la surface en hiver.

En conséquence, des processus physiques et biologiques aussi réalistes que possible doivent être représentés dans les modèles, à travers l'introduction de paramétrisations décrivant les flux de matière, d'énergie et de quantité de mouvement entre la surface et l'atmosphère. Toutefois, ces paramétrisations ne sont que des représentations simplifiées des processus physiques (proposées à certaines échelles spatiales comme celle de la plante, du champ, ou du bassin versant), qui permettent de décrire les principaux mécanismes de rétroactions mais entachées d'erreurs systématiques parfois importantes.

Les erreurs systématiques dans l'évolution de certaines composantes des cycles de l'énergie et de l'eau, peuvent être réduites grâce à des procédures d'analyse, qui permettent de corriger de façon appropriée certaines quantités prévues par la modélisation. L'assimilation de données propose le cadre théorique dans lequel l'information provenant des observations et de la modélisation peut être combinée de façon optimale si l'on connaît les statistiques des erreurs de chaque composante.

L'analyse des variables de surface joue un rôle important dans la prévision numérique du temps et peut influencer la qualité des prévisions bien au delà d'une semaine d'échéance. Les développements en modélisation et en analyse doivent être conduits de manière coordonnée.

Les progrès en modélisation et en analyse des processus physiques de l'atmosphère et des surfaces continentales sont en grande partie dus à la disponibilité d'observations et à leur contenu en information. La principale source d'informations renseignant les surfaces continentales (sur des longues périodes de temps) provient des observations des réseaux de surface et des données de télédétection fournies par les satellites pour l'observation de la Terre.

Les développements des schémas de surface et des systèmes d'analyse de surface sont souvent limités par l'absence d'observabilité de certains composants (par exemple, l'épaisseur et la texture des sols ou la structure tri-dimensionnelle sur couvert végétal et de la zone racinaire, ...). En effet, la télédétection ne fournit pas d'informations directes et celles-ci ne concernent que la surface ou les horizons superficiels du sol. De plus, les observations in-situ sont trop rares pour documenter l'ensemble des régions couvertes par les modèles numériques. Par conséquent, le niveau de sophistication nécessaire pour représenter les surfaces terrestres dans les modèles, comme par exemple dans la zone racinaire ou du sol profond, est encore sujet à débat à la fois pour les applications régionales et globales.

Ma recherche s'est inscrite dans le cadre d'un ensemble d'activités ayant conduit à proposer une analyse comparative des processus de surface modélisés à l'aide de jeux de données divers et indépendants, pour en détecter les incohérences et proposer ensuite des améliorations. L'utilisation de jeux d'observations complémentaires pour les flux et les divers réservoirs (d'eau, d'énergie et de carbone) aux interfaces terre-atmosphère et terre-océans, m'a permis d'aller au-delà d'un simple étalonnage des schémas ou de la validation des modèles. La variété des observations que j'ai pu utiliser, m'a fourni un cadre cohérent pour évaluer l'augmentation de complexité d'une paramétrisation donnée en fonction de la saison et de la zone d'intérêt.

Par exemple, en hiver, la dynamique atmosphérique, le manteau neigeux et le ruissellement sont fortement liés. Au cours des mois d'été, les précipitations, l'évaporation, l'humidité du sol, et le ruissellement sont également couplés. Cependant pour chacune des saisons, l'amélioration d'une des composantes (par exemple, liée à un flux ou à un réservoir terrestre) ne se traduit pas forcément par des améliorations dans les autres composantes physiquement liées.

Il est donc nécessaire de développer la recherche dans un contexte où les simulations peuvent être comparées à des sources d'observations les plus diversifiées possible pour fournir des renseignements complémentaires au niveau des processus physiques mis en jeu. Cette démarche permet l'évaluation conjointe de plusieurs composantes affectées par des changements d'une paramétrisation et aide à en identifier les faiblesses. Cette démarche est aussi d'une importance centrale pour l'assimilation des données qui vise à intégrer de manière cohérente

plusieurs types de données comme les mesures in-situ et les données de télédétection par satellite pour estimer des états modèle optimaux.

Les domaines principaux dans lesquels mes actions de recherche se sont effectuées ont été (i) l'hydrométéorologie (en particulier la description des processus d'évaporation (du sol, de la végétation et des lacs), de sublimation et fonte de la neige, du ruissellement et du stockage de l'eau dans le sol et dans le manteau neigeux) et (ii) la « météorologie du carbone » (à savoir l'extension au cycle du carbone continental des processus de surface, pour la description des processus d'assimilation et de respiration des écosystèmes ainsi que le couplage avec les schémas de transport atmosphérique).

L'utilisation des observations de débits des rivières et des mesures in-situ des flux de chaleurs latente et sensible et dioxyde de carbone (CO₂), combinées aux données météorologiques conventionnelles, m'a permis d'entreprendre et faire aboutir ces développements vers une utilisation opérationnelle. Concernant la paramétrisation des flux de CO₂, la comparaison à des produits de NEE (l'échange net en CO₂ entre la surface et l'atmosphère) à l'échelle globale et de qualité suffisante (ex. du modèle de « Carnegie-Ames-Stanford Approach ») ainsi que l'analyse comparative des résultats des simulations à l'aide des données in-situ, m'a permis de proposer une implémentation dans le système opérationnel de prévision météorologique du CEPMMT ainsi que son utilisation dans le système de suivi global des constituants atmosphériques (projet MACC). Ces résultats, ainsi que la vérification des autres composantes du modèle global du système Terre, ont donc qualifié les changements que j'ai apportés au modèle du CEPMMT relatifs aux améliorations de la modélisation des processus biophysiques.

En parallèle, mes activités de recherche en assimilation des données pour les surfaces continentales ont permis de progresser vers l'utilisation de schémas issus de la théorie de l'estimation optimale où les sources d'information provenant des modèles et des observations disponibles sont combinées en fonction de leurs caractéristiques d'erreurs. En m'inspirant des méthodes utilisées en atmosphère avec certaines simplifications et adaptations selon les spécificités des surfaces continentales d'intérêt, les résultats de mes travaux ont été adoptés par plusieurs centres de prévisions météorologiques à Météo-France, Environnement Canada et au CEPMMT.

Un schéma de surface doté d'un système d'assimilation de données avec certaines caractéristiques d'optimalité permet étendre la prévisibilité d'un système de prévision numérique du temps comme cela a pu être démontré dans des projets multi-modèles auxquels j'ai participé. J'ai également pu montrer qu'une telle approche permet d'améliorer la reconstruction de l'état des surfaces continentales dans les réanalyses du passé.

Les perspectives pour ma recherche sur les processus de surface vont s'appuyer sur la combinaison des techniques de l'estimation optimale et de la modélisation, pour permettre le réglage optimal de certains paramètres et pour aussi mieux identifier certaines limites des paramétrisations adoptées. La prévision du temps, la

reconstruction du temps passé et présent, et la prévision saisonnière, ainsi que les projections climatiques restent au coeur des motivations de ma démarche scientifique. Ces applications permettent de vérifier les améliorations introduites dans la modélisation et permettent au travail scientifique de se traduire en termes de service rendu pour de nombreuses activités sociétales par l'intermédiaire des services météorologiques.

Ce manuscrit est organisé en quatre chapitres. Je décris dans un premier temps les observations pour les surfaces continentales qui sont au coeur des diverses activités que j'ai entreprises. Je m'attache ensuite à exposer les différentes composantes des schémas de surface pour lesquels j'ai apporté une contribution originale (sol, végétation, neige, lacs) dans le cadre de mes développements au CEPMMT. Les méthodes d'assimilation que j'ai développées et évaluées, notamment dans le cadre de la préparation de futures missions spatiales, sont présentées dans un troisième chapitre. Je conclus au chapitre quatre sur les défis des longues échéances avec un regard particulier sur le rôle de la surface, soit dans la reconstruction du climat passé, soit dans la prévision du temps au-delà d'une semaine d'échéance. L'ensemble de la discussion scientifique présentée dans ces quatre chapitres s'articule autour des données d'observations, car les avancées dans la représentation des processus physiques et en assimilation sont liées à la disponibilité de données de mesures (leur couverture spatio-temporelle) et à leurs qualités intrinsèques (précision et stabilité).

La liste des publications principales dont je discute dans cette thèse est rassemblée dans la table suivante. Cette liste englobe les travaux finalisés au cours de la période 2002-2011 et effectués avec une contribution majeure, ou en qualité de (co-)encadrant de doctorants ou post-doctorants, ou liés à une participation à des projets internationaux, dont 5 publications sont en annexe (*).

<i>Publications</i>	<i>Label</i>	<i>Acronyme du journal</i>
Agusti-Panareda et al. (2010)	SM-P-AMMA	GRL
Albergel et al. (2010)	SM-IFS	HESS
Albergel et al. (2012)	Bare-Soil-Evap	HESSD
Balsamo et al. (2004)	SM-2DVAR	QJRMS
Balsamo et al. (2006)	Hydros	JHM
Balsamo et al. (2007)*	SM-DFS	JHM
Balsamo et al. (2009)*	HTESSEL	JHM
Balsamo et al. (2010)*	Lakedepth	BER
Balsamo et al. (2010)	Meteo-HydroVerif	HP
Balsamo et al. (2011)	LSM-update	ECMWF-NL
Balsamo et al. (2011)	ERA-GPCP	ERA-Rep
Balsamo et al. (2012)	Lake-IFS	TELLUS-A
Balsamo et al. (2012)	Benchmarking	BAMS-Note
Beljaars et al. (2010)	ECMWF-GLASS	ECMWF-NL
Boone et al. (2009)	AMMA-ALMIP	BAMS
Boussetta et al. (2011)	LAI-MODIS	IJRS
Boussetta et al. (2012)	CTESSEL	JGR (soumis)
Calvet et al. (2009)	Geoland2	EC-GLASS-Ws
Dee et al. (2011)	ERA-Interim	QJRMS
de Rosnay et al. (2009)	ALMIP-MEM	JGR
de Rosnay et al. (2011)	LDAS	ECMWF-NL
de Rosnay et al. (2012)	Land-Init	SurvGeophy(rev)
Drusch et al. (2009)	EKF	GRL
Drusch et al. (2009)	Skylab	JHM
Dutra et al. (2009)	LakeIFS	BER
Dutra et al. (2010)*	New-Snow-IFS	JHM
Dutra et al. (2012)	Snow-Complexity	JHM
Jacobs et al. (2008)	ELDAS	TELLUS-A
Jarlan et al. (2009)	LAI-2DVAR	JGR
Jimenez et al. (2011)	Land-fluxes-MIP	JGR
Koster et al. (2009)	GLACE2 US	GRL
Koster et al. (2010)	GLACE2 global	JHM
Mueller et al. (2011)	Evaporation	GRL
Munoz-Sabater et al. (2009)	L-band-Z0	IJRS
Pappenberger et al. (2009)	HTESSEL-Rivers	JOC
Rabier et al. (2009)	Concordiasi	BAMS
Szczypta et al. (2011)	ERAI-France	HESS
Takaya et al. (2010)	Mixed-layer-ocean	ECMWF-TM
Vitart et al (2008)	Var-EPS	QJRMS
VandenHurk et al. (2010)	GLACE2 EU	ClimDyn
Orsolini et al. (2012)	SNOWGLACE2	ClimDyn(rev)

Chapitre 1: Les données pour les surfaces continentales

Les données d'observations constituent le fil conducteur de l'ensemble des recherches que j'ai été amené à entreprendre et à diriger. Les liens entre les trois thèmes qui vont nous intéresser dans ce mémoire : la modélisation, l'assimilation et la prévisibilité se définissent principalement autour des données de surface. Je présente ici les principaux jeux de données que j'ai utilisé dans les différents travaux associés aux trois thèmes de recherche qui seront détaillés par la suite.

La plupart des observations en surface ne fournissent pas une information directe de la variable que l'on souhaite mesurer. Dans ce chapitre je sépare les données d'observations en deux catégories selon la plateforme d'installation de l'instrument de mesure : les observations in-situ et les observations de télédétection. De plus, pour les données in-situ je distingue les réseaux caractérisés par une disponibilité en temps-réel, des réseaux de recherche et de suivi climatique, provenant soit de programmes d'observations coordonnées, soit de campagnes de mesures. Pour ce qui est des données de télédétection, je me limite essentiellement aux satellites en orbite polaire et géostationnaires ayant des capteurs adaptés au suivi des surfaces continentales.

Malgré la disponibilité de ces jeux de données, chacun d'eux ne peut suffire à caractériser complètement de l'état de la surface, ce qui nécessite de considérer une « approche intégrée » (Guenther et al. 2012, Balsamo et al. 2012). Cette approche consiste à valider les schémas de surface avec des jeux de données in-situ variés afin de pouvoir évaluer de manière séparée les diverses composantes simulées. Chaque jeu de données pris individuellement ne permet d'examiner qu'une facette des processus physiques, pouvant de ce fait masquer des défauts ou des erreurs présents dans les composantes non observées. Ainsi, la complémentarité des observations utilisées constitue donc un aspect fondamental pour consolider les activités de recherches sur la caractérisation des surfaces continentales dans les modèles de prévision numérique. Je vais montrer comment cette démarche, que j'ai adoptée, m'a permis de faire des avancées significatives sur plusieurs aspects.

Les observations in-situ

L'observation à l'aide de mesures ponctuelles dites « observations in-situ » (en immergeant l'instrument dans le milieu à mesurer) constitue la méthode plus répandue pour l'étude des processus physiques du système Terre (surfaces continentales, atmosphère, océans). D'un point de vue historique ces données constituent un premier jeu de mesures pour le suivi de l'évolution de la planète (de longues séries temporelles sont disponibles par les observatoires historiques) et sont encore de nos jours une source d'information essentielle.

En particulier, l'importance de suivre les changements climatiques a été reconnue très tôt dans l'histoire moderne avec le développement industriel et a amené à l'établissement de réseaux d'observations avec des caractéristiques d'homogénéité pour les méthodes de mesure et les infrastructures adaptées.

Dans l'hémisphère sud et dans les tropiques, on note une augmentation régulière du nombre de données fournies par radiosondes. Toutefois dans ces régions, ainsi que sur les grandes étendues océaniques, en Antarctique et en Amérique du Sud, le système d'observations classiques ne suffit pas à suivre l'état de la planète et doit être complété par des réseaux de recherche (permettant aussi extension des variables mesurées in-situ, comme par exemple en Antarctique sur le site de Dôme Concordia) et par l'observation depuis l'espace par satellites.

Le système mondial de télécommunications (SMT ou GTS)

Le SMT ou GTS (depuis l'anglais « Global Telecommunication System »), est un système coordonné au niveau mondial par l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale) et composé de moyens et d'installations de télécommunications destinés à assurer la collecte, l'échange et la diffusion des données d'observations météorologiques. Les systèmes principaux d'observations ponctuelles permettent le suivi des conditions atmosphériques en surface (réseau au sol) et en altitude (réseau des radiosondages) rentrent dans le SMT. Les paramètres météorologiques classiques (température, humidité, pression, vitesse et direction du vent, couverture nuageuse et précipitations) près de la surface sont mesurés à des heures synoptiques (à 00 UTC et toutes les 3, 6 ou 12 ou 24 heures selon les stations et les variables).

En ce qui concerne l'état de la surface à l'échelle globale, seule l'épaisseur de la couche de neige au sol est mesurée, typiquement une fois par jour si elle est présente, mais les contenus en eau du sol ou l'état de la végétation ne sont pas considérés. En effet, comme cela sera exposé par la suite, ces variables sont particulièrement importantes pour l'initialisation des modèles de prévision du temps qui ont besoin de connaître précisément l'état des surfaces continentales.

Les données des réseaux SYNOP et METAR (Figure 1) qui fournissent des observations dont la disponibilité en temps réel (environ une heure après que la mesure a été effectuée) ont été utilisées pour l'initialisation opérationnelle des modèles de prévision numérique du temps et plusieurs travaux auxquels j'ai contribué (Cassardo et al. 2002, Balsamo et al. 2004, 2005, 2007) utilisent cette source d'information.

ECMWF Data Coverage (All obs DA) - Synop-Ship-Metar
10/May/2012; 00 UTC
Total number of obs = 32621

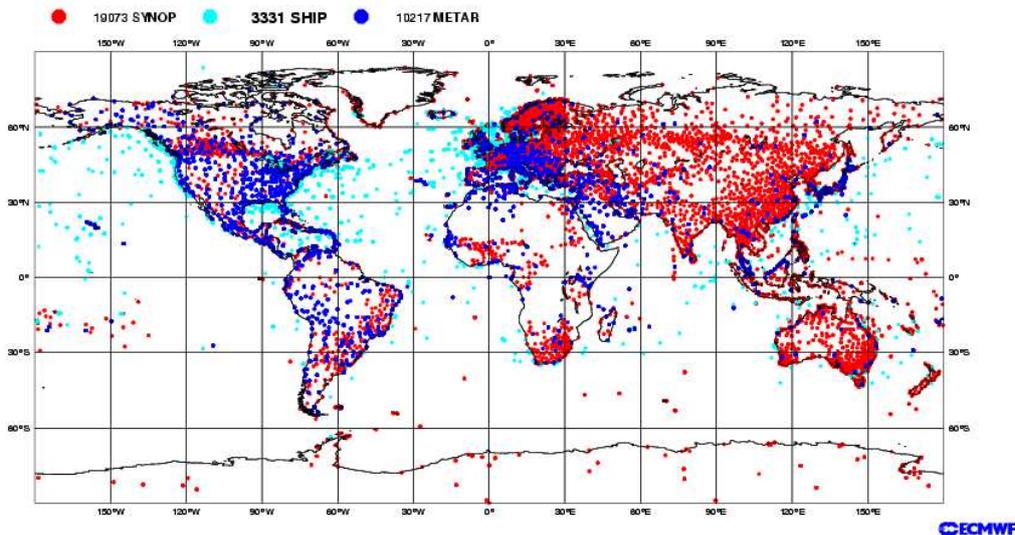


Figure 1 : Exemple de couverture des données de surface in-situ des réseaux SYNOP, METAR, SHIP du SMT utilisées par le modèle du CEPMMT sur une période de 6 heures.

Toutefois, ces données ne renseignent pas sur les échanges d'énergie et de matière entre les surfaces et l'atmosphère mais plutôt sur l'effet produit par ces échanges sur l'atmosphère. Elles doivent donc être complétées par les données in-situ des réseaux de recherche et les données de télédétection sensibles aux conditions de surface et aux flux surface-atmosphère et surface-rivières-océans.

Les réseaux de mesures au sol (non-GTS)

Les réseaux d'observations au sol ne sont pas limités à ceux disponibles sur le SMT (GTS) et plusieurs initiatives financées par des projets de recherche dans plusieurs pays ont abouti à des réseaux coordonnés et plutôt homogènes.

Je décris ci-après les réseaux et les initiatives dont je me suis servi dans plusieurs de mes études.

Le réseau FLUXNET

Le réseau FLUXNET (Baldocchi, 2008) est le résultat d'une collaboration entre instituts de recherche possédant des stations de mesures qui fournissent des mesures supplémentaires de paramètres importants non disponibles sur le GTS. En particulier les flux de rayonnement descendant et montant en surface, et les flux turbulents de chaleurs sensible et latente, mais aussi l'eau et la température dans le sol pour certains sites. Une synthèse de ces observations constitue la base de

données « FLUXNET-La-Thuille » (depuis l'atelier qui a amené à la décision de rendre ces données disponibles à la communauté scientifique), qui est à présent une source des données extrêmement utile pour la validation des modèles de surface en divers endroits du monde (32 sites en 2006) ayant des caractéristiques climatiques pédologiques et écologiques contrastées (voir la Figure 2 du réseau FLUXNET). L'intérêt de ces données est reconnu par les spécialistes du domaine et cette base est mise à jour régulièrement par des contrôles de qualité qui y sont effectués.

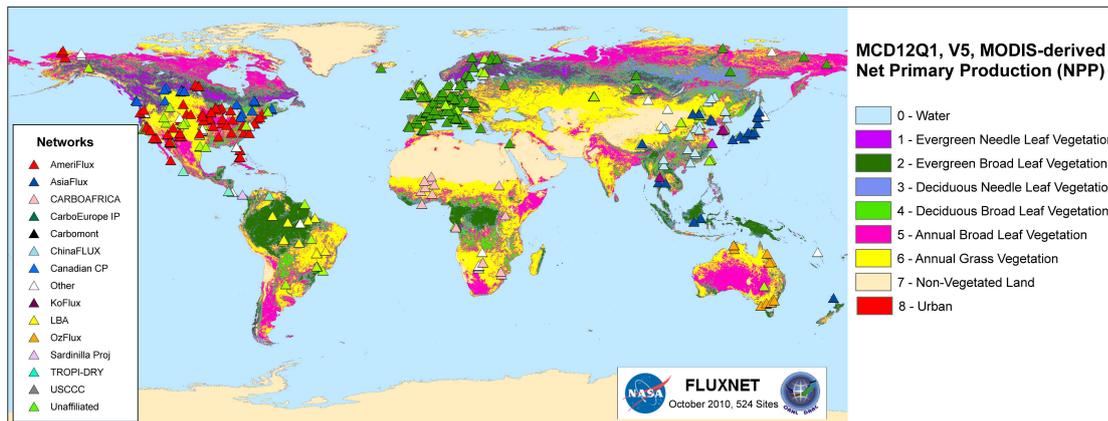


Figure 2 : Carte du réseau de recherche FLUXNET (en 2010) pour l'observation des flux surface-atmosphère (eau, énergie et dioxyde de carbone).

Les données du réseau FLUXNET ne sont pas disponibles en accès libre. Cet accès est réservé à des scientifiques soumettant des projets de recherche auprès du coordinateur. J'ai ainsi soumis un projet sur la validation du schéma de surface du CEPMMT dont la description est disponible en ligne (Balsamo and Beljaars, 2010).

<http://www.fluxdata.org/>

L'accès à ces données au CEPMMT a permis de mettre en place un travail de vérification des flux dans la ré-analyse ERA-Interim (Kral, 2010), et les travaux de modélisation des flux de CO₂ que j'ai co-encadrés avec le Dr. Anton Beljaars.

Les réseaux nationaux (SMOSMANIA, SCAN, OZ-NET)

Le réseau SMOSMANIA installé dans le Sud de la France à l'initiative de Météo-France permet le suivi de l'eau du sol à plusieurs niveaux dans le sol (jusqu'à 30 cm), avec comme objectif principal la calibration et la validation de produits satellitaires et issus des modèles.

Un réseau de 12 stations a été initialement installé en 2006 dans le Sud-Ouest de la France sur des sites mesurant les variables météorologiques classiques (vent, température, pression, humidité, précipitations) et la qualité des données est vérifiée en continu. En 2009 le réseau a été étendu par 9 autres stations dans le Sud-Est de la France.

Ce réseau a été mis à disposition de la communauté scientifique dans le cadre de plusieurs projets collaboratifs (en particulier pour le projet Européen GEOLAND2 et

dans le cadre du SAF « hydrologie » d'EUMETSAT), et fait maintenant partie de la base de données de l' « International Soil Moisture Network » décrit plus loin.

Le contenu en eau dans la couche du sol près de la surface et dans la zone racinaire (jusqu'à 30 cm) est mesuré de façon cohérente dans l'espace et le temps pour les 12 stations et sur une période de plusieurs années à partir de 2006.

Le réseau SCAN (Soil Climate Analysis Network) est disponible aux Etats Unis d'Amérique. Il comprend un ensemble d'environ 150 stations équipées de plusieurs instruments dans le sol (e.g. pour mesurer le contenu en eau et la température du sol) et près de la surface (e.g. température et humidité de l'air à 2m et vent à 10m).

Le contrôle de qualité des données SCAN n'est pas effectué au niveau des stations de mesures car s'agit d'un réseau conçu pour une diffusion des données en temps-réel. Des travaux pour créer une base de données filtrée, grâce à une collaboration interne, ont fait l'objet d'une publication (Albergel et al. 2012), à laquelle j'ai contribué, sur l'évaluation de l'eau du sol prévue par le modèle du CEPMMT.

<http://www.wcc.nrcs.usda.gov/scan/>

Le réseau OZ-Net en Australie couvre le bassin versant du Murrumbidgee étant un tributaire majeur de la rivière de Murray, avec ces 84,000 kilomètres carrés. L'eau du sol et la température du sol sont mesurés à plusieurs niveaux.

<http://www.oznet.org.au/>

Ce réseau bénéficie d'une calibration fréquente et permet d'évaluer les modèles de sol et végétation (Boussetta et al. 2010). Les données sont disponibles en accès libre et plusieurs points de mesures sont co-localisés avec des données satellitaires pendant les campagnes de mesure du « National Airborne Field Experiment » en Australie (ex. NAFE 2005).

Programmes de coordination d'observations au sol

Plusieurs initiatives de coordination sont aussi au cœur de l'avancement de la recherche sur les processus de surface et les infrastructures les plus établies sont répertoriées ci-après :

L'infrastructure CEOP

L'initiative CEOP (Coordinated Energy&water cycle Observing Project) est similaire à celle de FLUXNET mais avec une vocation plus atmosphérique. Plusieurs projets de mesures liés aux cycles de l'eau et d'énergie ainsi qu'un ensemble de données sont aujourd'hui disponibles. Pour cette raison, CEOP est plutôt considéré comme un projet fournissant une infrastructure d'échange de données.

<http://www.ceop.net/>

L'infrastructure ISMN

L' « International Soil Moisture Network » est un projet issu d'une collaboration internationale qui rassemble les mesures in-situ d'eau du sol effectuées par des réseaux variés. Cette base de données, malgré l'hétérogénéité des réseaux considérés, est très importante pour l'étude de l'hydrologie du sol superficiel (zone non saturée). Cette initiative est coordonnée par le « Global Energy and Water Cycle Experiment » (GEWEX) en coopération avec le « Group of Earth Observation » (GEO) et le « Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) ».

Plusieurs bases de données d'observations in-situ sont incluses, comme par exemple la base « Global Soil Moisture Databank » de l'Université Américaine de Rutgers.

<http://www.ipf.tuwien.ac.at/insitu/>

L'infrastructure ICOS

L' « Integrated Carbon Observation System » est un réseau issu d'une collaboration Européenne entre divers centres de recherche. Le but principal d'ICOS est de constituer un réseau caractérisé par la continuité temporelle (qui n'est pas garantie par le réseau FLUXNET basé sur des financements nationaux et sur des projets de courte durée).

Le statut du projet ICOS est en cours de définition pour garantir la continuité de l'action de suivi de la concentration atmosphérique et des flux de CO₂ en surface. Un point fort de ce réseau réside dans l'effort entrepris en vue de standardiser les méthodes de mesures employées dans différents pays Européens.

<http://www.icos-infrastructure.eu/>

L'infrastructure GRDC

Le GRDC (Global Runoff Data Centre) est centre mondial de données sur les débits des grands fleuves, et coordonne la base de données des principales rivières du monde. La base de données est mise à jour en continu et contient les débits journaliers et mensuels de plus de 2900 stations hydrologiques dans 143 pays (Figure 3).

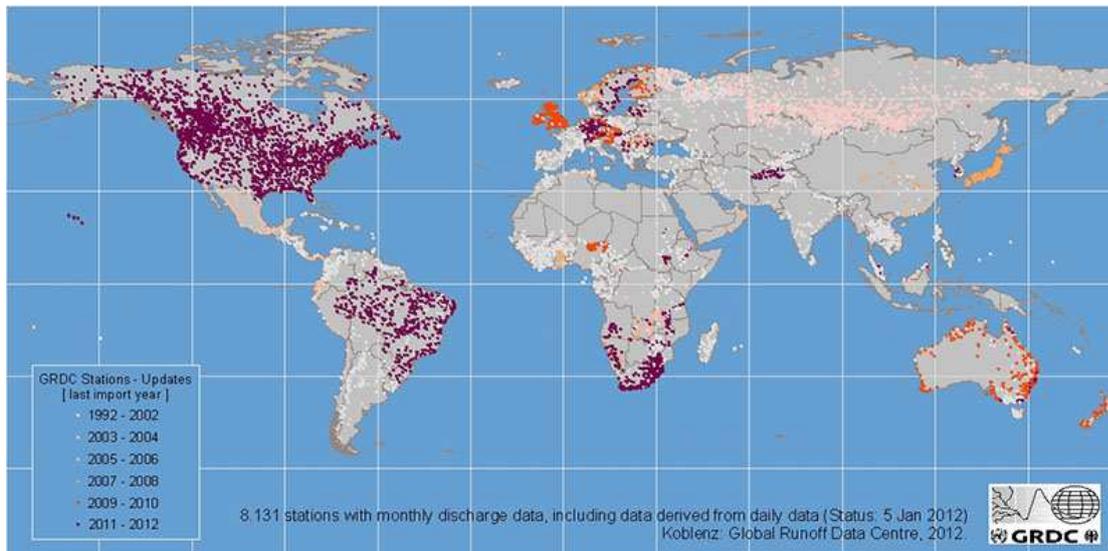


Figure 3 : Carte du réseau d'observations des débits des rivières du GRDC (en 2012).

<http://www.gewex.org/grdc.html>

J'ai utilisé ces données dans plusieurs études pour évaluer le cycle hydrologique simulé par le modèle du CEPMMT (Balsamo et al., 2009, 2010).

Les campagnes de mesures

Malgré l'apport fondamental des actions coordonnées d'observations comme celles de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM), des campagnes de mesure de courte durée dans des régions peu instrumentées par les réseaux conventionnels sont d'une importance cruciale pour caractériser les processus dans des conditions d'extrêmes météorologiques pour la température ou les précipitations.

Deux exemples sont fournis par les campagnes de mesures SEBEX au Sahel en 1989-1990 et BOREAS/BERMS au Canada depuis 1994 dans des extrêmes climatiques contrastés pour évaluer (valider) les modèles de surface à l'échelle globale et plus particulièrement celui du CEPMMT pour lequel j'ai utilisé ces deux jeux de données.

De même, les projets GSWP (<http://www.iges.org/gswp/> Dirmeyer et al. 2011), dédié à l'intercomparaison des sorties de modèles et en particulier pour l'eau du sol à l'échelle globale, et les projets « Rhône Agrégation » et « Thorne-Kalix » ont été particulièrement utiles pour l'étude des processus de surface de l'échelle des bassins versants à l'échelle globale. J'ai utilisé les données et les résultats de ces projets à plusieurs reprises dans mes activités de recherche.

Pour les processus liés au manteau neigeux, les projets d'intercomparaison « Snow-MIP » et « Snow-MIP2 » ont fourni des observations très importantes pour mettre en évidence les défauts du schéma de neige du CEPMMT et en produire une version améliorée sous ma supervision.

L'étude des situations climatiques plus extrêmes a été rendue possible grâce à des campagnes de mesures et des projets internationaux.

L'Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine (AMMA) et son volet « surface » ALMIP (« AMMA Land Model Intercomparison Project » http://www.cnrm.meteo.fr/amma-moana/amma_surf/almip/index.html) a permis de stimuler l'activité de recherche en Afrique Ouest pour comparer les modèles de surface et aussi pour étudier les liens entre eau du sol et les précipitations dans la zone de convergence intertropicale.

Le projet CONCORDIASI en Antarctique (<http://www.cnrm.meteo.fr/concordiasi/>) a permis de conduire des activités de recherche finalisées en vue d'une meilleure compréhension des processus de surface dans des conditions climatiques plus extrêmes et du réglage de paramètres importants du modèle du CEPMMT (comme l'albédo des calottes glaciaires).

Les observations satellitaires

Les observations satellitaires tendent à jouer un rôle de plus en plus important pour caractériser les surfaces continentales. D'une part elles permettent une couverture de données dans des régions non accessibles par les réseaux de mesures in-situ (hors campagnes de mesures spécifiques) et d'autre part la plupart des missions récentes fournissent leurs observations en temps quasi-réel permettant d'être utilisées dans les modèles de prévision numérique opérationnels pour améliorer l'état initial des surfaces continentales. Une part significative de mes travaux de recherche a porté sur des études en vue de l'utilisation d'observations satellitaires dans les modèles de prévision numérique à travers notamment le développement de méthodes d'assimilation de données innovantes et leur application à de nouveaux types d'observations. Je présente dans ce paragraphe quelques instruments récents fournissant des informations utiles pour les surfaces continentales en prévision numérique du temps et qui ont été au cœur de certaines de mes activités.

Le premier satellite météorologique effectuant des mesures dans toute l'épaisseur de la troposphère et de la stratosphère a été lancé en 1972. On différencie les capteurs à bord des satellites entre imageurs (produisant une image bidimensionnelle de la scène d'atmosphère observée) et sondeurs (capables de fournir une information sur plusieurs couches d'atmosphère). Chaque capteur est conçu pour une ou plusieurs bandes spectrales (dites canaux) sensibles à différents constituants atmosphériques (oxygène, vapeur d'eau, eau condensée, ozone, etc.). La capacité à couvrir le globe est liée au type de satellite mis en orbite et pour cela on distingue deux catégories en fonction de leur orbite autour de la Terre (géostationnaire et polaire). La connaissance des spécificités de ces données et de leur contenu en information pour l'étude des processus de surface est importante pour définir une stratégie de recherche.

Les satellites en orbite géostationnaire

Les satellites géostationnaires sont en orbite synchrone avec la rotation terrestre à une altitude typiquement de 36000 km et pour cela il s'agit de points fixes dans le ciel. Ce type d'orbite permet une répétitivité d'observations très utile pour suivre les évolutions rapides des phénomènes météorologiques ainsi que les surfaces continentales en condition de ciel clair dans les fréquences visible et infrarouge du spectre électromagnétique.

Le satellite Européen Meteosat deuxième génération (MSG) de l'Agence Européenne EUMETSAT, mis en orbite le 19 Mai 2002, et le dernier satellite Américain de l'Agence National Atmosphérique et Océanique (NOAA), GOES-13 mis en orbite le 14 Avril 2010, constituent deux exemples opérationnels de haute technologie.

Les données de MSG et GOES sont liées à mes activités en qualité d'évaluateur du projet Land-SAF en 2007-2008 et aux travaux effectués avec les données simulées GOES au Centre Météorologique Canadien où j'ai développé des simulateurs d'orbite et de fauchée pour étudier l'intérêt des observations de télédétection dans le contexte de l'assimilation de données pour les surfaces continentales.

Les satellites en orbite polaire

Les satellites en orbite polaire couvrent l'orbite du Pôle Nord au Pôle Sud à une fréquence d'environ 90 minutes et à une élévation de 600-800 km. Ceci permet une résolution spatiale plus élevée qu'avec les satellites en orbite géostationnaire (avec notamment la possibilité d'utiliser les fréquences micro-ondes) obtenue au détriment de la couverture temporelle.

Quatre satellites-capteurs sont présentés pour illustrer l'information disponible pour le suivi des surfaces continentales à des résolutions comprises entre 1 et 50 km.

- Radiomètre AQUA-AMSR-E (2002-2011), dans les micro-ondes passives (bande C) capable d'estimer de l'eau du sol dans les premiers 1-2 cm de sol.
- Diffusiomètre radar METOP-ASCAT dans les micro-ondes actives (bande C) capable d'estimer l'eau du sol superficiel (1-2 cm), avec une résolution spatiale d'environ 25 km.
- Radiomètre à synthèse d'ouverture SMOS-MIRAS (2009-) dans les micro-ondes passives (bande L) capable de suivre l'évolution de l'eau du sol dans les premiers 5 cm de sol avec une résolution spatiale d'environ 40 km.
- Radiomètre TERRA-MODIS (2000-) dans l'infrarouge, capable de donner des informations sur la température de surface et sur l'état de la végétation, avec une résolution spatiale de 1 km.

Le lancement de plusieurs nouveaux satellites est prévu au cours de la prochaine décennie et les informations les plus récentes sont disponibles sur les sites web des principales agences spatiales à travers le monde.

Approche intégrée pour le suivi des flux de surface

La disponibilité de réseaux coordonnés permet de mettre en place une vérification étendue des flux de surface en particulier de l'évaporation et du ruissellement, qui peut être combinée à des mesures des variables gouvernant les réservoirs hydrologiques (eau du sol, épaisseur de neige). C'est l'approche que j'ai développée dans mes activités de recherche pour évaluer les paramétrisations physiques des schémas de surface dans un contexte multi-varié et pluridisciplinaire (e.g. météorologie et hydrologie, en Figure 4).

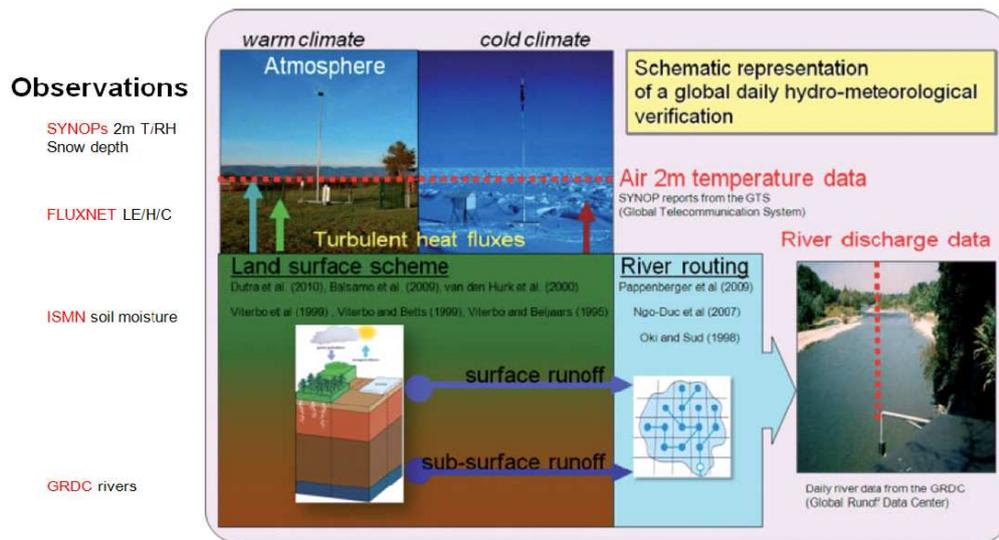


Figure from Balsamo et al. 2010 HP

Figure 4 : Schéma d'une approche intégrée pour l'évaluation hydrométéorologique des modèles de surfaces continentales (extrait de Balsamo et al. 2010)

Cette méthodologie proposée dans le contexte hydrométéorologique peut être généralisée au développement des modèles dans un contexte de prévision numérique du temps et plus généralement dans les simulations des composantes du système Terre, comme schématisé dans la Figure 5.

Land surface development at ECMWF: a proposed structure

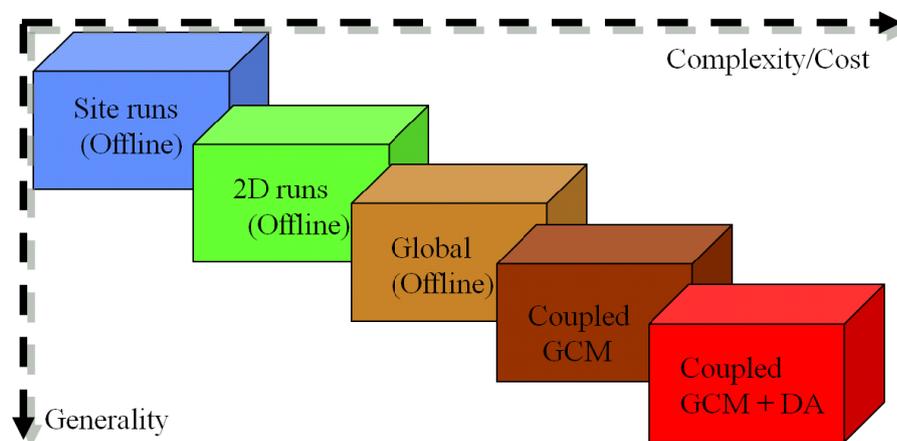


Figure 5 : Schéma représentatif de la stratégie de développement pour la modélisation de surfaces continentales. Chaque étape demande la disponibilité d'observations informatives des échelles simulées. La complexité de l'évaluation est proportionnelle au niveau de généralité des résultats.

Ce schéma conceptuel du développement d'un modèle de surfaces continentales comporte 5 phases à complexité croissante. Le cœur de la recherche se situe dans les phases 1 et 2 où les simulations en mode forcé (« offline ») sur des sites ou des régions bien instrumentés permet l'étude des paramétrisations dans un cadre

contrôlé pour lequel les erreurs dues au forçage atmosphérique sont négligeables et des observations dédiées aux processus physiques d'intérêt sont disponibles. La phase 3 (mode forcé à l'échelle globale) est nécessaire pour étendre la vérification de la paramétrisation à l'échelle globale, après son étude à l'échelle locale ou pour un climat particulier. Les phases 4 et 5 (simulations couplées avec l'atmosphère) sont fondamentales pour l'étude de l'impact dans le modèle atmosphérique et en présence des rétroactions surface-atmosphère. Elles peuvent demander plusieurs années de recherche (à cause des interactions entre les différentes paramétrisations présentes dans le modèles atmosphérique et de l'existence d'erreurs compensatoires) avant de pouvoir être utilisées dans des modèles de prévision numérique du temps.

Dans la phase 5, l'assimilation des données permet de confirmer la généralité des résultats (amélioration de la modélisation) en examinant la réduction des corrections d'erreurs faite par l'analyse (pour ajuster le modèle aux observations).

Ce schéma de développement a été suivi dans plusieurs démarches de recherche présentées dans les chapitres suivants.

Chapitre 2: La modélisation des processus de surface

Après avoir présenté brièvement les différents processus de surface devant être considérés dans les modèles atmosphériques, je décris la méthodologie de validation que j'ai mise en œuvre dans mes travaux de recherche (principalement au CEPMMT) et illustre les résultats les plus originaux que j'ai obtenu concernant l'hydrologie continentale, le manteau neigeux, les lacs, les rivières et le couvert végétal. Je termine ce chapitre en présentant des travaux de validation du schéma de surface du CEPMMT par comparaison avec des observations satellitaires, travail préalable à l'assimilation de données, qui sera présentée au Chapitre 3.

Les cycles globaux de l'énergie, de l'eau et de la végétation

La représentation des processus d'échanges entre les surfaces continentales et l'atmosphère pour ce qui concerne l'énergie, l'eau, et le carbone, est essentielle pour modéliser (et donc prévoir) l'évolution dans le temps de l'état du «Système-Terre ».

Du fait de la complexité du « Système-Terre » des simplifications conceptuelles et pratiques sont nécessaires tout en conservant les éléments fondamentaux. Tout d'abord, on peut distinguer dans ce triple cycle les « réservoirs » des « flux » (décrivant les échanges entre réservoirs).

L'objectif principal des schémas de surface utilisés en prévision numérique du temps est de calculer la température et l'humidité spécifique à la limite inférieure d'atmosphérique des modèles. Ces deux variables sont nécessaires dans l'estimation des flux de chaleur, d'eau, de quantité de mouvement. Le cycle du carbone est modélisé de façon très simplifiée et incomplète en prévision numérique du temps et on considère principalement la biomasse continentale pour la végétation (que l'on peut considérer comme un « réservoir » de carbone) en interactions directes avec l'atmosphère.

Les schémas de surface décrivent de façon simplifiée (avec des paramétrisations) les échanges entre les surfaces continentales et la basse atmosphère. Manabe (1969) a introduit le premier schéma de surface a été dans un modèle de circulation générale dans le but de représenter le réservoir d'eau dans le sol (avec un modèle de type « bucket » inspiré des travaux de Budyko dans les année 1950) permettant ainsi de réguler l'évapotranspiration des surfaces continentales en fonction du contenu en eau de ce réservoir.

Plus récemment, le concept d'échelle temporelle dans les schémas de surface a été introduit, permettant de distinguer les couches superficielles réagissant directement au forçage en surface des couches plus profondes moins réactives et jouant un rôle tampon pour la surface. Ainsi, la température de surface est obtenue par la solution à l'équilibre du bilan d'énergie (Noilhan and Planton, 1989; Viterbo and Beljaars, 1995; Essery et al., 2003; Ek et al., 2003). Dans des conditions d'enneigement, typiquement une couche de neige est paramétrée en contact avec l'atmosphère, ayant un effet isolant pour le sol.

Si l'on considère le cycle de l'eau, les principaux flux naturels d'eau sont les précipitations, l'évaporation, et le ruissellement. Les réservoirs d'eau dans les

surfaces continentales peuvent être distingués en fonction de l'occupation de la surface entre : le sol (contenant l'eau dans la zone racinaire et souvent plus bas dans la nappe phréatique, sous forme liquide ou de glace), la végétation (ayant un contenu en eau important), la neige (avec un contenu d'eau variant de 10% à 50% en volume), et les autres réservoirs d'eau tels que les glaciers (aux hautes altitudes/latitudes), les lacs et les rivières.

L'énergie provenant du soleil s'accumule principalement dans le sol (réservoir principal). La neige et la glace peuvent aussi agir comme réservoirs d'énergie importants et peuvent retarder le réchauffement ou le refroidissement de l'atmosphère et du sol (par libération ou absorption de chaleur latente). Le cycle du carbone, dont font partie toutes les espèces vivantes de la planète, se réduit essentiellement au cycle de la végétation dans les modèles de prévision numérique du temps, qui joue un rôle important dans le bilan d'énergie et la quantité de mouvement en surface. En modélisation climatique, la représentation du cycle de la végétation est fondamentale car elle permet de réguler la teneur en dioxyde de carbone atmosphérique par le processus de photosynthèse des feuilles qui constitue un puissant mécanisme d'absorption du CO₂ atmosphérique (responsable de l'effet de serre).

Trois équations simplifiées sont introduites pour décrire le cycle de l'eau, de l'énergie et du CO₂ en surface :

$dS/dt = P - E - R$ représente la variation stock d'eau continentale S (dans la neige et le sol),
où P est la précipitation, E l'évaporation et R le ruissellement.

$CdT/dt = R_n - LE - H$ représente la variation de la température T de surface,
où C est capacité calorifique du milieu,
 R_n est le rayonnement net à la surface (solaire et thermique),
 LE le flux de chaleur latente et H le flux de chaleur sensible.

$NEE = GPP - R_{eco}$ représente les échanges nets de flux de CO₂ entre écosystème et atmosphère
où GPP est la production primaire brute (CO₂ fixé par la végétation) et
 R_{eco} la respiration de l'écosystème (CO₂ émis par le sol).

La plupart de mes travaux de modélisation de surface visent à améliorer la répartition des flux de surface et le réalisme de stocks d'eau, d'énergie et aussi de carbone.

Les principaux processus de surface décrits par la suite font référence à des travaux que j'ai réalisés dans chaque domaine et appliqués au schéma de surface utilisée opérationnellement au CEPMMT. La stratégie de recherche que j'ai retenue a visé, dans un premier temps à l'amélioration de l'hydrologie du sol, en utilisant des observations ponctuelles et des estimations globales selon l'approche intégrée, telle que présentée au Chapitre 1. Les travaux pour le développement d'un nouveau schéma de neige et des lacs ont prolongé ceux sur l'hydrologie du sol grâce à des collaborations externes et ont conduit à des améliorations considérables du schéma

de neige du CEPMMT.

Les priorités données par la stratégie de développement du laboratoire visent à garder un niveau de complexité homogène entre les différents schémas. Cette stratégie motive une approche séquentielle des révisions (le sol, la neige, la végétation, le sol nu, Figure 6), et j'ai pu intégrer les développements de différents chercheurs à travers les collaborations que j'ai pu nouer. J'ai ainsi établi des collaborations externes pour bénéficier de l'expertise scientifique des spécialistes des différents domaines abordés.

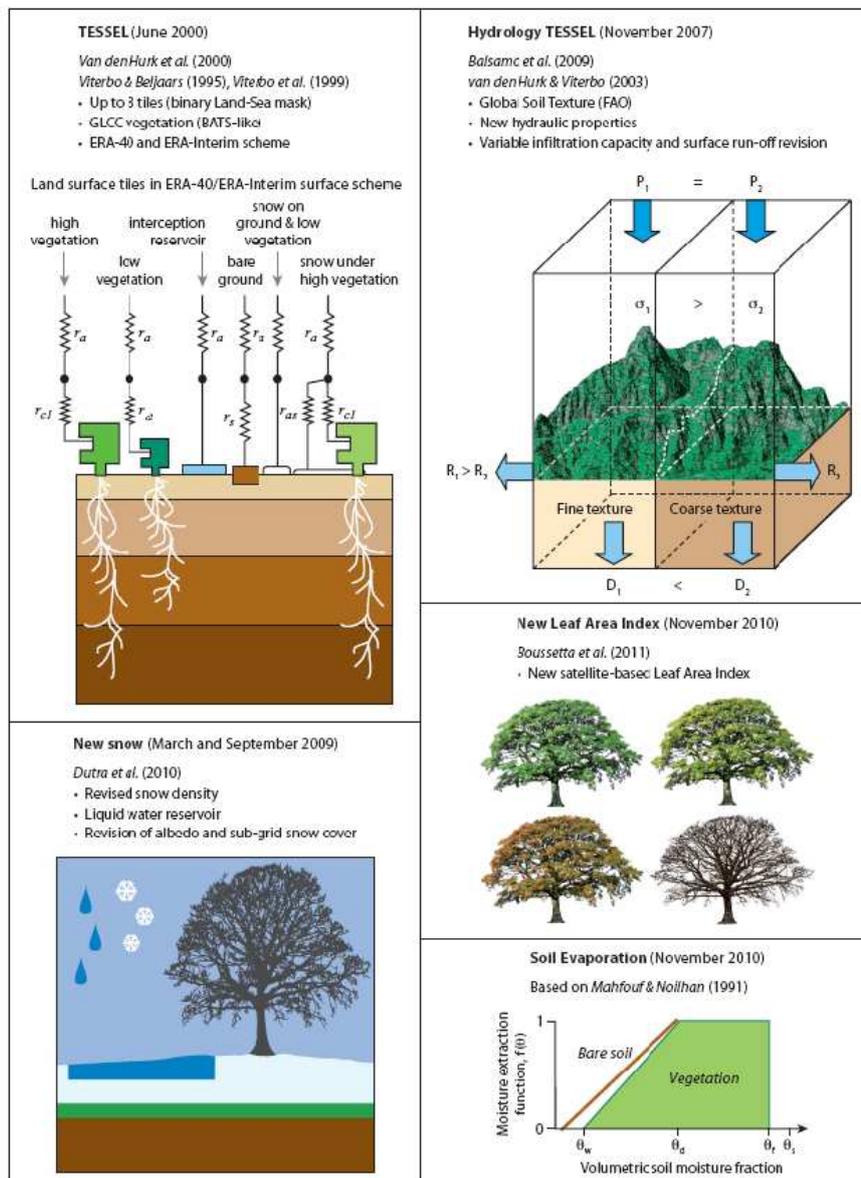


Figure 6 : Principaux éléments de la modélisation des surfaces continentales dans les modèles de prévision numérique du temps illustrés avec le schéma TESSEL du CEPMMT incluant l'approche « mosaïque », le ruissellement sous-maille, le cycle saisonnier de la végétation, la représentation du manteau neigeux et l'évaporation sur sol nu (extrait de Balsamo et al. 2011).

L'originalité de cette approche est constituée par la chaîne des évaluations où le processus est d'abord évalué à l'échelle locale et où ensuite les impacts

hydrologiques et météorologiques sont examinés depuis l'échelle des bassins versants jusqu'à l'échelle globale. Cette approche intégrée permet de limiter l'utilisation de certaines variables physiques comme « paramètres ajustables » pouvant corriger des erreurs atmosphériques indépendantes du processus physique étudié.

Les processus hydrologiques et thermodynamiques dans le sol

Une description des processus de diffusion verticale d'eau et énergie dans le sol est nécessaire pour estimer l'intensité des flux atmosphériques (chaleurs sensible et latente en surface) et la partition du forçage météorologique (rayonnement et précipitations) entre les différents réservoirs de surface (ex : infiltration vs. ruissellement).

Pour décrire ces processus, les paramétrisations de surface utilisées en prévision numérique du temps s'appuient généralement sur des schémas à validité locale, généralisés pour reproduire les échanges en surface de façon statistique à l'échelle de la maille d'un modèle numérique. Les paramètres de tels schémas pouvant être utilisés à l'échelle non-locale ne sont pas forcément liés de façon directe aux processus physiques et sont dits "paramètres effectifs".

J'ai développé pour le modèle du CEPMMT une nouvelle paramétrisation du sol que j'ai validée en reproduisant plusieurs exercices d'évaluation effectués au cours des dix dernières années. L'apport des révisions introduites, en particulier concernant la répartition des flux d'eau entre ruissellement superficiel et drainage profond dans le sol, a montré un comportement de ce nouveau schéma en meilleur accord avec les données d'observations directes des débits de fleuves du GRDC ainsi qu'avec des estimations indépendantes du contenu en eau des grands bassins continentaux obtenu en utilisant le bilan d'eau atmosphérique (Hirschi et al. 2006).

Les travaux présentés dans Balsamo et al. (2009, JHM, en annexe), décrivent en détail les stratégies utilisées pour l'implémentation et la validation d'un schéma de surface à l'échelle globale.

J'ai été le principal investigateur de ce premier travail de recherche au CEPMMT qui a amené à l'implémentation opérationnelle d'un schéma de surface amélioré pour les composantes de l'hydrologie du sol. Les points les plus originaux de ce travail ont concerné l'évaluation de l'impact à plusieurs échelles spatiales et temporelles (du site de mesure à l'ensemble du globe) et avec plusieurs modes de simulations (forcées par et couplées avec le modèle de prévision du temps du CEPMMT).

Ces développements ont été stimulés par certaines faiblesses connues de l'hydrologie du schéma de surface du CEPMMT (TESSEL) (van den Hurk et al. 2000): spécifiquement le choix d'une texture du sol global unique, qui ne caractérise pas les différents régimes d'humidité du sol, et une description du ruissellement de type « hortonien » (d'après Horton, 1937), basé sur l'infiltration maximale dans les sols, qui produit très peu de ruissellement de surface. Une nouvelle formulation de la conductivité et de la diffusivité du sol, variable spatialement en fonction de la texture du sol dominante (fournie par la base de données de FAO en 2000) et une description du ruissellement de surface basé sur l'approche de type « capacité variable d'infiltration » (VIC, d'après Wood et al. 1992) en considération de la

variabilité sous-maille de l'eau du sol, ont été proposées.

Le schéma révisé (HTESSEL) que j'ai développé a ainsi répondu aux attentes pour ce qui concernait l'amélioration de l'évolution de l'eau du sol, tout en préservant l'évaporation de surface, permettant ainsi l'assimilation conjointe de plusieurs types d'observations en réduisant les incohérences entre évaporation et eau du sol. En effet, Seuffert et al. (2004) avaient montré les difficultés à assimiler des observations sensibles à l'eau du sol (telles que les températures de brillance dans les micro-ondes) en même temps que des observations sensibles à l'évaporation (telle que les températures à 2m du réseau SYNOP). De manière similaire, Drusch et Viterbo (2007) avaient montré également que l'eau du sol obtenue par l'analyse pour réduire les erreurs de prévisions de la température et de l'humidité à 2 m ne se comparait pas favorablement à des mesures in-situ.

Ainsi le développement de HTESSEL a concerné en priorité l'hydrologie du sol pour permettre d'améliorer les simulations de l'eau du sol tout en gardant une qualité équivalente pour les flux d'évaporation.

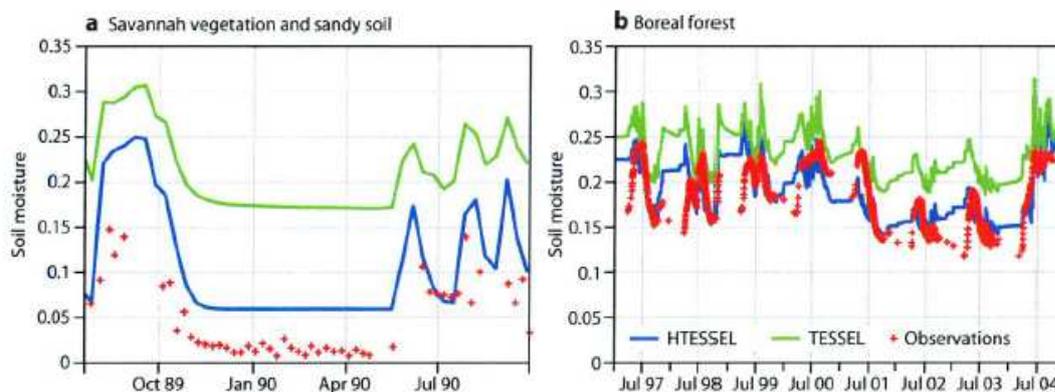


Figure 7 : Evolution de l'eau du sol dans la couche racinaire pour le schéma TESSEL (en vert) et HTESSEL (en bleu) comparée aux observations in-situ (en rouge) pour un site du Sahel (SEBEX) et un site de la forêt boréale (BERMS).

Un site du Sahel (SEBEX) et un site de la forêt boréale (BERMS) ont été choisis pour montrer les effets de la nouvelle hydrologie dans des climats extrêmement différents. La capacité du schéma HTESSEL à reproduire des anomalies d'eau du sol à l'échelle de plusieurs années a été mise en évidence (Figure 7) par des évaluations locales en mode forcé.

Pour ce qui concerne le ruissellement et le drainage, la validation à l'échelle locale n'est pas suffisante pour qualifier un changement à l'échelle globale. La validation a donc consisté en deux expériences proposées dans des projets internationaux d'inter-comparaison des modèles où de plus grands domaines sont pris en compte : le projet global pour l'humidité du sol, deuxième initiative (GSWP-2, Dirmeyer et al. 2002) et le projet dit « Rhône Agrégation » (RhôneAgg, Boone et al. 2004) fournissant les données de forçage pour les modèles de surface. Dans les simulations GSWP-2, le stockage d'eau et le débit de la rivière sont examinés sur un certain nombre de bassins. La cohérence hydrologique aux échelles de temps

mensuelles a été vérifiée. Les simulations « Rhone-Agg » ont été utilisées pour examiner la composante rapide des eaux de ruissellement à l'échelle de temps journalière.

Le couplage entre la surface terrestre et l'atmosphère est également étudié. Il s'agit d'une étape essentielle, afin d'évaluer l'impact de la nouvelle paramétrisation. Cette configuration, dite de « simulations en mode climat », où le modèle de prévision numérique du temps simule l'évolution atmosphérique sur des longues échéances (ici 13-mois) forcé uniquement par les températures de l'océan, permet d'évaluer l'impact des modifications de surface sur l'ensemble des variables moyennes du modèle (précipitations, nuages, bilan radiatif, etc.).

Les moyennes annuelles et saisonnières sont comparées à un certain nombre de jeux de données indépendants avec un accent plus particulier sur les mois de l'été boréal pour lequel un impact plus important de l'hydrologie du sol est attendu.

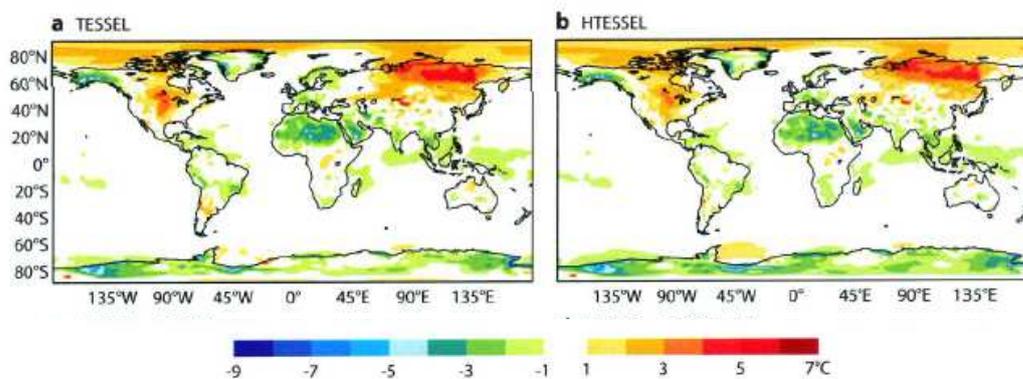


Figure 8 : Evaluation des erreurs annuelles pour la température à 2m dans des simulations de 13-mois en mode « océan-forcé » pour comparer les schémas TESSEL (a) et HTESSEL (b). Les erreurs sont évaluées par rapport à l'analyse de température à 2m d'ERA-Interim (moyennée entre le 2000-09-01 et le 2001-08-31).

Sur la Figure 8, la réduction des erreurs dans la température a 2m peut être appréciée aux longues échéances de prévisions (saisons). Le travail fait au CEPMMT a été introduit aussi dans le système « EC-Earth » (version « climat » du modèle du CEPMMT, Hazeleger et al. 2010), qui participe au rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC).

Enfin, comme en prévision numérique le modèle est sujet à corrections périodiques par l'assimilation de données, une évaluation globale du schéma HTESSEL est fournie par la comparaison des incréments d'analyse pour la surface entre l'ancienne version et la nouvelle. Une réduction des incréments moyens entre les deux versions du modèle peut être interprétée comme une amélioration globale de la représentation de la surface (réduction des erreurs systématiques de modélisation).

L'ensemble des démarches mises en place dans cette étude a permis de montrer l'intérêt de la stratégie de développement et validation proposée pour les paramétrisations de surface au CEPMMT (Figure 5) en allant de l'échelle locale à l'échelle globale et du mode forcé au mode couplé, pour appréhender par étapes la complexité des interactions surface-atmosphère.

Une étude d'impact à une nouvelle formulation de l'évaporation du sol nu a été

réalisée par le Dr. Clement Albergel, sur ma proposition, dans laquelle les changements du cycle saisonnier de l'eau du sol ont été évalués. La révision de cette paramétrisation proposée par Balsamo et al. (2011) se base sur le constat que l'évaporation des zones de sol nu correspond à un mécanisme physique différent des zones à forte densité de végétation.

La vaporisation de l'eau dans les pores du sol a lieu dans une couche mince à proximité de l'interface surface-atmosphère. Mahfouf et Noilhan (1991) ont comparé plusieurs formulations et montrent que l'évaporation du sol nu reste active jusqu'au complet assèchement du sol (humidité du sol superficiel proche de zéro).

Au contraire, dans le schéma TESSEL (van den Hurk et al. 2000) le lien entre l'humidité du sol et l'évaporation a été supposé linéaire entre le point de flétrissement et la valeur à la capacité au champ, négligeant le fait que la notion de point de flétrissement s'applique uniquement à des zones de végétation.

La formulation de l'évaporation du sol nu a été modifiée dans la dernière version du schéma HTESSSEL en se basant sur des études bibliographiques, et pour permettre une transition linéaire entre les zones de végétation et le sol nu.

L'impact dans l'eau du sol est montré sur la Figure 9 qui confirme un meilleur accord de la nouvelle paramétrisation validée avec les observations du réseau américain SCAN (présenté au Chapitre 1).

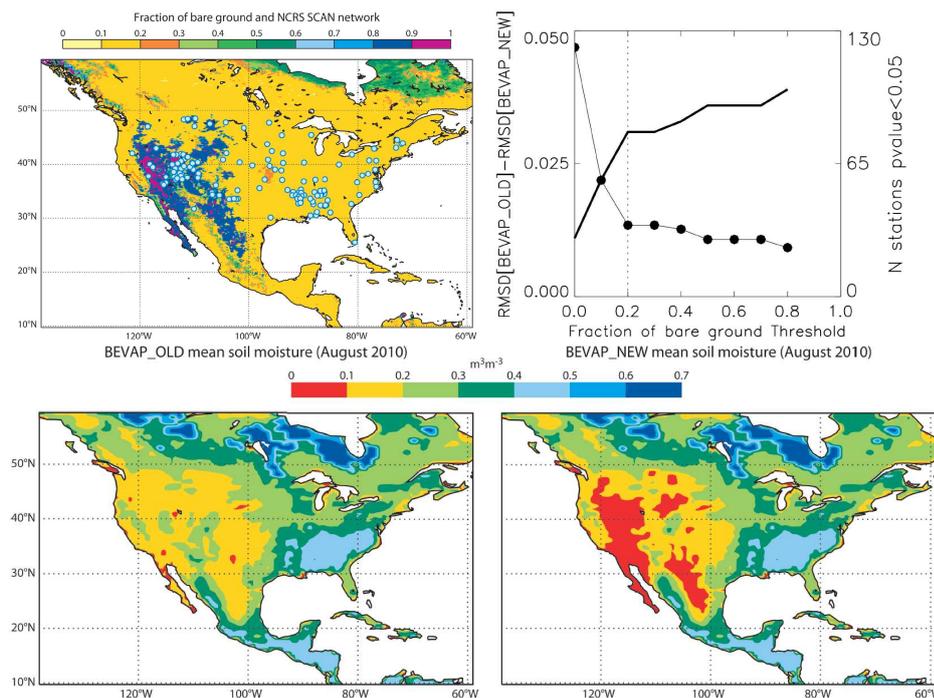


Figure 9 : En haut la fraction de sol nu dans HTESSSEL et la distribution des stations de mesure SCAN (à gauche), et l'impact du changement de l'évaporation du sol nu sur les erreurs (RMSD) d'eau du sol simulée par le modèle en fonction de la fraction de sol nu (à droite), les points indiquant le nombre de stations SCAN. En bas les champs d'eau du sol superficiel sur l'ensemble des Etats-Unis simulés par l'ancienne (à gauche) et la nouvelle (à droite) paramétrisation (pour le mois de Aout 2010).

Le manteau neigeux

Le manteau neigeux constitue un isolant thermique très efficace, car il peut contenir jusqu'à 90% d'air (pour une densité d'environ 100 kg/m^3 dans le cas de neige fraîchement déposée).

Les processus qui gouvernent l'évolution de la couche de neige sont complexes et les paramétrisations physiques utilisées dans les modèles numériques pour la prévision du temps décrivent seulement les effets de température, de compaction liés à la masse et conduisant à une augmentation de la densité, ainsi que les modifications de l'albédo sans toutefois considérer la variabilité entre zones polluées et zones non contaminées. La neige constitue aussi un réservoir très important d'eau douce qui module les débits de rivières, surtout aux latitudes élevées.

La couverture neigeuse a un fort impact sur la qualité des prévisions météorologiques et climatiques. En effet, l'absorption du rayonnement solaire à l'interface terre-atmosphère est modifiée d'un facteur pouvant atteindre quatre par la présence de neige suite au changement d'albédo de surface (Viterbo et Betts, 1999). L'albédo de surface peut ensuite rétroagir avec la température de surface (Groisman et al. 1994). Dans les hautes latitudes et les régions montagneuses, la neige agit également comme un important réservoir d'énergie et d'eau (Immerzeel et al. 2010). Par conséquent, une représentation précise de la masse de neige et sa densité est cruciale pour prédire l'isolation thermique de la neige, ceci s'avère être important à toutes échelles de prévisions, avec des conséquences directes pour l'hydrologie et la température du sol (Dutra et al. 2012).

Cet effet thermique joue également un rôle important dans le contrôle du gel de l'eau dans le sol, avec un impact sur la température dans la couche limite stable (Viterbo et al. 1999).

Le rôle de la couverture de neige dans le système climatique a été un sujet de recherche depuis de nombreuses années. Dans le cadre de la modélisation, Williams (1975) fut l'un des premiers à explorer l'influence de la couverture de neige sur la circulation atmosphérique et le changement climatique. De nombreux modèles de neige ont été développés pour des applications variées, telles que les études de processus de neige, le ruissellement, et la prévision des avalanches, et pour les modèles atmosphériques. Brun et al. (2008) a fait une analyse détaillée des modèles existants et leurs applications. Le but des paramétrisations pour les modèles atmosphériques (globaux et régionaux) est de fournir des conditions à la limite inférieure de l'atmosphère au-dessus des régions enneigées. Le contenu en eau de la neige et les flux d'énergie entre la couche de neige et le sol sont également importants pour atteindre ce but. Une attention particulière doit être accordée au rôle de l'isolation thermique de la neige dans le contrôle du couplage sol-atmosphère comme montré par Cook et al. (2008) et Ge et Gong (2010).

Dans les travaux Dutra et al. (2009, 2012 JHM en annexe) dont j'ai assuré la co-direction de thèse, deux nouveaux schémas de neige ont été développés et validés de bout-en-bout pour le modèle du CEPMMT.

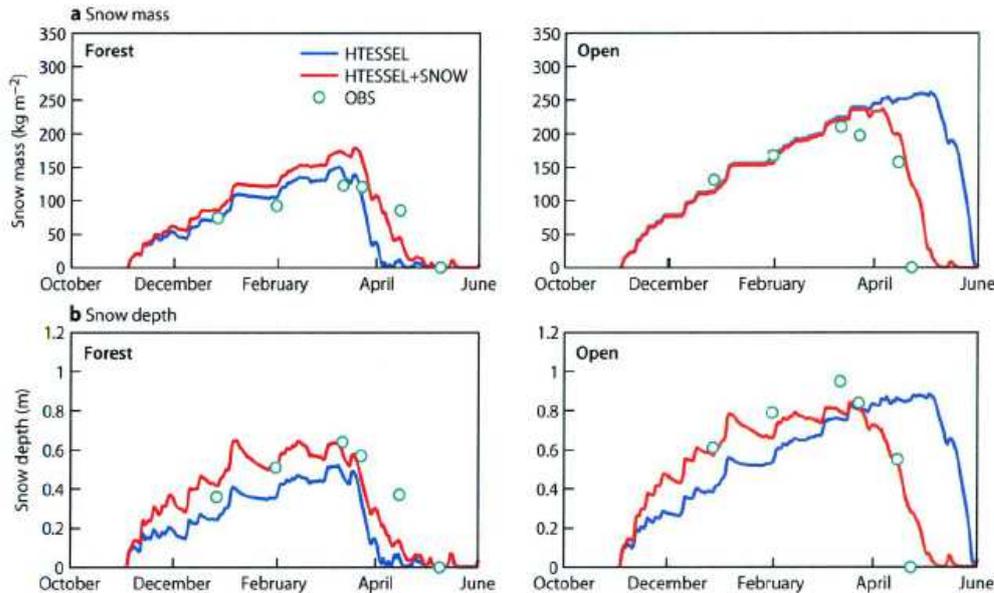


Figure 10 : Exemples de simulations du contenu en eau équivalent (en haut) et de l'épaisseur de neige (en bas) en incluant une nouvelle paramétrisation de neige dans le schéma de surface du CEPMMT (HTESSSEL+SNOW en rouge, HTESSSEL en bleu) - Fraser 2004/05.

L'expertise dans le laboratoire d'accueil du thésard (encadré par les Profs. Pedro Miranda et Pedro Viterbo de l'Université de Lisbonne) a permis une excellente interaction scientifique sur ce thème de recherche, les méthodes et la base de données (issue des projets d'intercomparaison des modèles Snow-MIP, Etchevers et al. 2002, et Snow-MIP2, Rutter et al. 2009), utiles pour décrire les processus de la couche de neige.

La Figure 10 présente un exemple de l'amélioration introduite sur le site de Fraser au Canada, dans le contenu en eau équivalent (snow mass) et l'épaisseur de la neige (snow depth). En particulier, ma contribution scientifique fût de suggérer le développement d'une méthode diagnostique pour prendre en compte la quantité d'eau liquide stockée dans la couche de neige, et de la comparer à une méthode pronostique dans laquelle l'eau liquide est une variable supplémentaire du système. Cette méthode, facile à implémenter et fournissant des résultats réalistes a pu être rapidement considérée dans le modèle opérationnel (introduction en 2009) du CEPMMT.

Les travaux présentés dans Dutra et al. (2012) ont permis d'apprécier l'importance de traiter de manière plus détaillée certains processus et échelles temporelles dans le manteau neigeux (Figure 11) en utilisant trois versions à complexité croissante. En particulier, l'utilisation d'un schéma à trois couches pour l'enneigement a été validée pour une implémentation dans un modèle de climat « EC-Earth » (Hazeleger et al. 2010) basé sur le modèle de prévision météorologique du CEPMMT. La couverture de neige (Figure 12) et l'impact sur la prévision des températures (Figure 13) aux échéances climatiques. Des simulations de 30 ans avec 3 membres initialisés le 1^{er} Novembre 1977, 1^{er} Décembre 1977 et 1^{er} Janvier 1978, avec la température de surface de la mer et la glace marine spécifiées. Une nette réduction des erreurs est obtenue avec le schéma de neige de Dutra et al. (2010) par rapport au schéma de

Douville et al. (1995). Le schéma de neige à 3 couches de Dutra et al. (2012) montre une légère amélioration dans les zones de plaines mais une augmentation du biais en zones montagneuses.

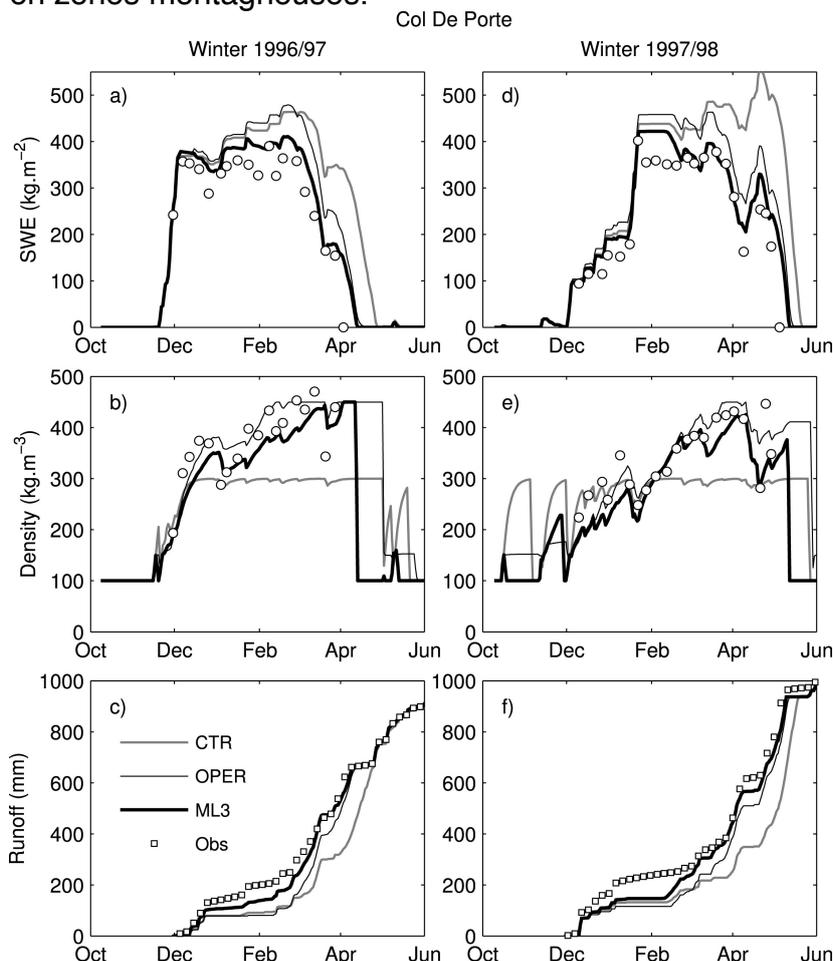


Figure 11 : Exemples de simulations de la couche de neige (masse et densité) et du ruissellement pour le site de Col de Porte (Alpes, France), par trois schémas de complexité croissante (Douville et al. 1995, CTR/HTESSEL ; Dutra et al. 2010 OPER/SNOWHTESSEL ; Dutra et al. 2012, ML3).

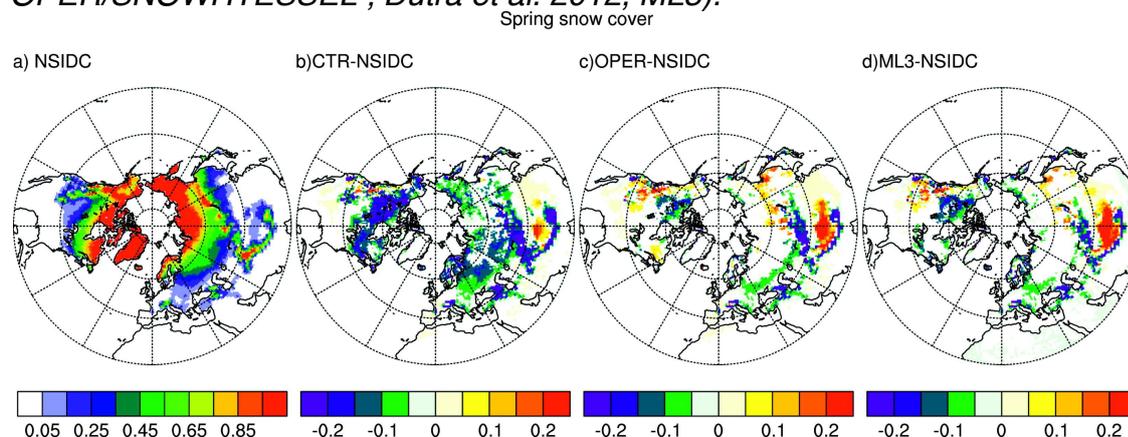


Figure 12 : Couverture de neige observée par le produit du NSIDC et simulée par les trois schémas de neige (HTESSEL, SNOWHTESSEL, ML3) dans le modèle « EC-Earth » en mode « prévision climatique » (30-ans, 3-membres initialisés en hiver 1977/1978 et évalués sur 1979-2006).

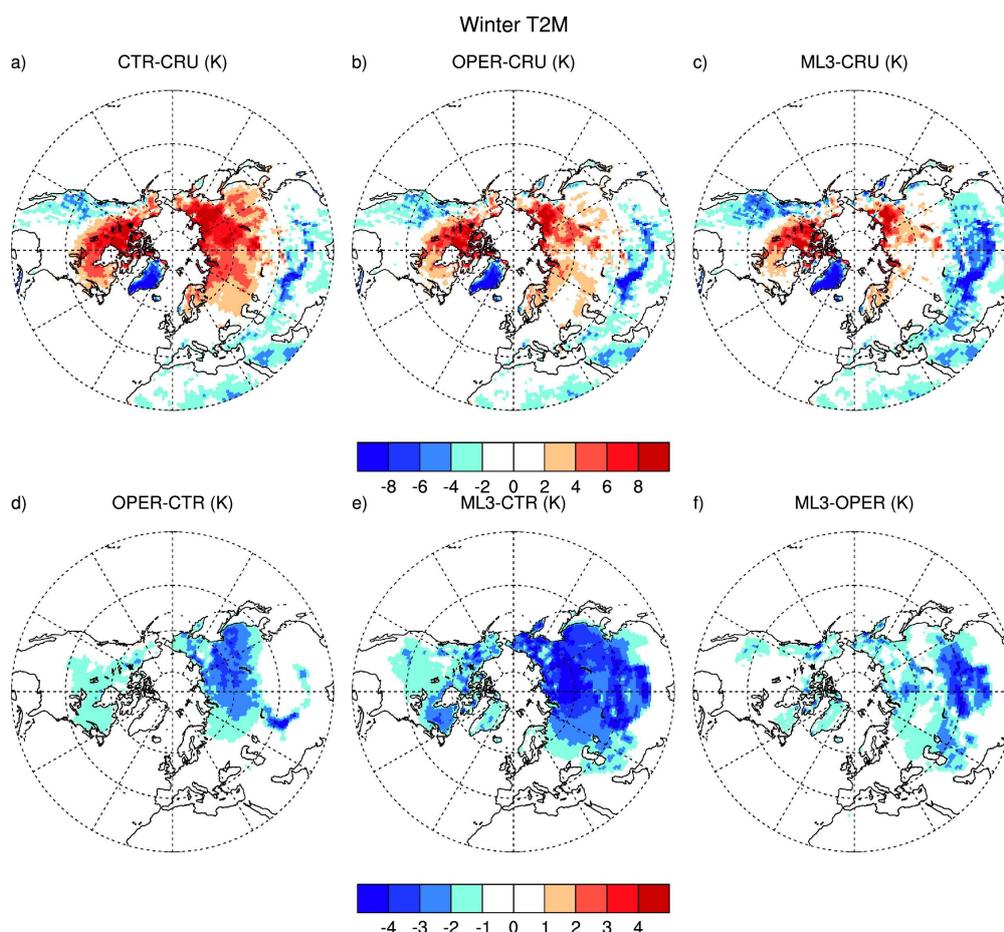


Figure 13 : Erreurs de prévisions à long terme (30-ans, moyenne de 3-membres initialisés en hiver 1977-1978) de température à 2m en utilisant trois schémas de neige (comparées à la base de données d'observations CRU TS3.0 sur 1979-2006).

Rabier et al. (2009) ont documenté les efforts de recherche entrepris dans le projet international Concordiasi (présenté au Chapitre 2). Dans le cadre de ce projet, une comparaison entre la température de surface mesurée à Dome-C/Concordia en Antarctique et les simulations du CEPMMT a montré de fortes erreurs positives (de l'ordre de +5 K en moyenne) dans l'atmosphère de la couche limite de surface. Une étude de l'impact de l'albédo des calottes glaciaires a montré qu'une valeur plus élevée était à la fois plus près des estimations de terrain et mieux adaptée pour prévoir les températures en Antarctique pendant la période estivale. Ma contribution a été de proposer un changement de l'albédo en Antarctique à partir des résultats de Pirazzini (2004) et de réaliser les expériences en « mode climat » qui ont montré un impact bénéfique sur la réduction des erreurs de température à 2m.

Les lacs et la couche limite superficielle océanique

Les surfaces d'eau libre se comportent comme des réservoirs d'eau infinis (évaporation potentielle en surface) qui affectent le bilan énergétique en surface. Cette particularité doit donc être prise en compte dans les modèles.

Les lacs occupent seulement un faible pourcentage des surfaces continentales (de l'ordre de 2-3 %, Figure 14a). Ce constat pourrait amener à penser que les lacs ne constituent pas un développement important pour la modélisation de surface.

Toutefois, si on considère les points de grille d'un modèle de prévision à l'échelle globale (compris entre 15 et 50 km) très peu de zones n'ont aucune fraction de lacs (essentiellement les déserts).

Les lacs sont donc une composante importante de la surface terrestre (surtout aux hautes latitudes de l'hémisphère nord), et ils peuvent influencer la météorologie régionale, de part leurs caractéristiques assez différentes des surfaces terrestres environnantes comme l'albédo, la rugosité et la capacité thermique. Toutefois, jusqu'à tout récemment ils ont été négligés dans la plupart des modèles de prévision numérique du temps du à la difficulté de spécifier des paramètres à l'échelle globale (telles que la profondeur des lacs) et à la disponibilité de schémas à la fois simples et réalistes. L'impact des lacs sur l'atmosphère provient essentiellement des processus d'évaporation et des différentes propriétés de l'albédo, qui contribuent à modifier la température près de la surface en présence d'eau libre. Samuelsson et al. (2010) ont constaté que la présence de lacs induit un réchauffement sur le climat européen pour toutes les saisons. L'impact le plus important a été constaté au cours de l'automne et l'hiver sur le sud de la Finlande et la Russie occidentale, où le réchauffement est supérieur à 1° C localement. Une étude de Rouse et al. (2005) s'appuyant sur des données d'observation a également révélé que les lacs des hautes latitudes permettent d'augmenter l'évaporation, surtout au cours de l'automne, lorsque les gradients verticaux de température et d'humidité sont les plus élevés.

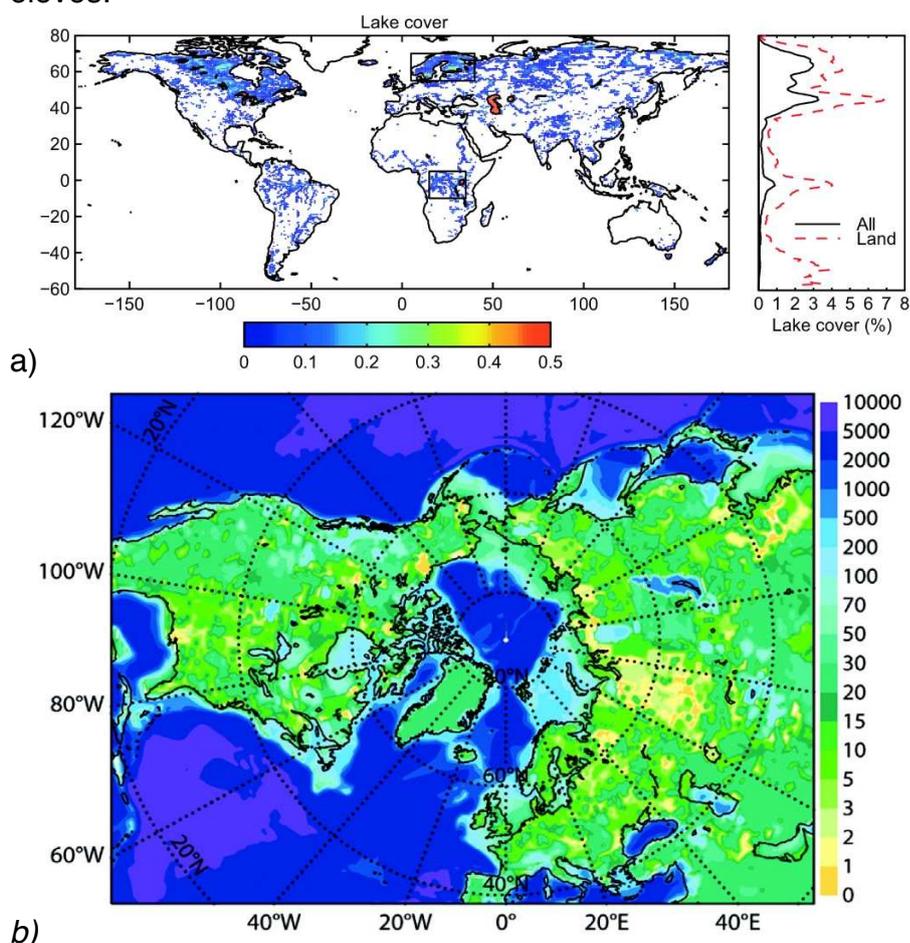


Figure 14 : Couverture (a) et profondeur (b) des lacs dans le schéma H-TESSSEL+FLAKE (Dutra et al. 2009, Balsamo et al. 2012) à la résolution spatiale de

la ré-analyse ERA-Interim (0.7 degrés).

De plus, les développements en vue de simuler l'émission naturelle de la surface dans les basses fréquences micro-ondes (ex. la bande L à 1.4 GHz) telles qu'utilisées par le satellite SMOS pour l'estimation de l'eau du sol superficiel ont montré que la contribution de la fraction d'eau libre dans un pixel satellitaire ne peut pas être ignorée. J'ai ainsi effectué deux études afin d'évaluer l'importance des lacs en prévision numérique du temps tout d'abord en mode forcé (impact sur les flux de surface) où les erreurs météorologiques sont faibles et ensuite avec des simulations couplées (impact sur l'atmosphère).

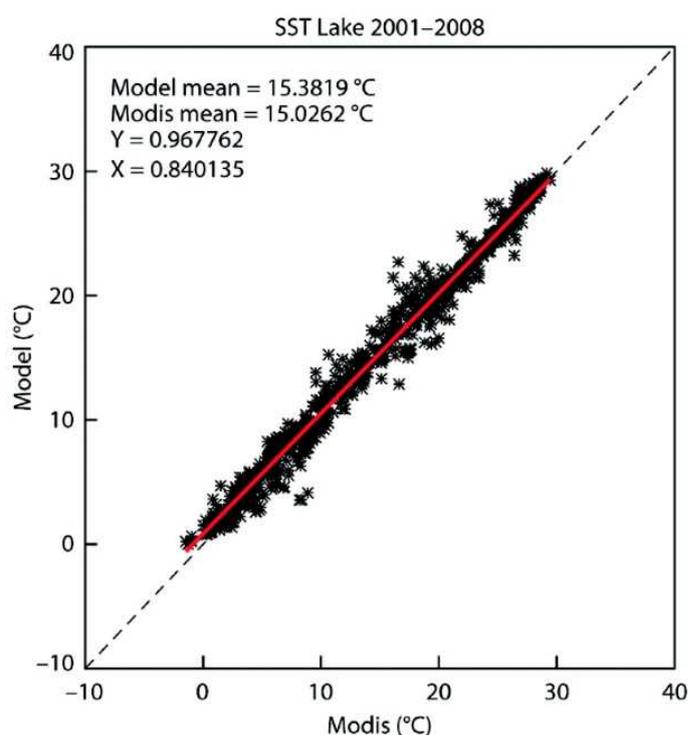


Figure 15 : Simulations des températures de lacs obtenues par le modèle HTESSEL-FLAKE en mode forcé comparées aux données de télédétection du capteur MODIS sur la période 2001-2008.

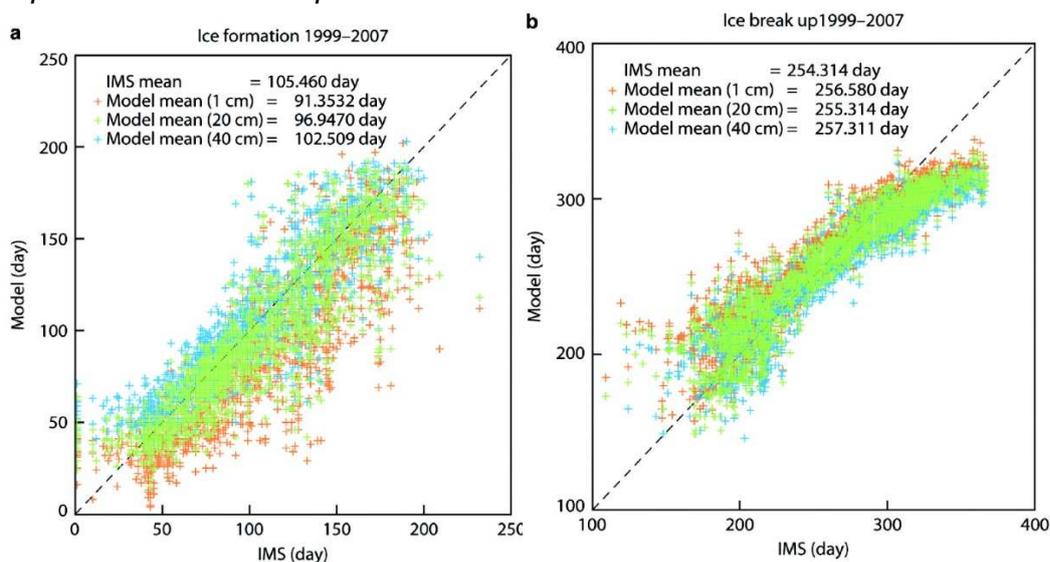


Figure 16 : Simulations de la fraction de glace de lacs obtenue par le modèle HTESSSEL-FLAKE en mode forcé comparées aux produits de couverture de glace IMS sur la période 1999-2007.

Cette étude a été développée au CEPMMT en deux phases: Dutra et al. (2010) décrivent l'implémentation en mode forcé et une première évaluation ; Balsamo et al. (2012) présentent l'initialisation des champs statiques (couverture et profondeur des lacs, Figure 14) et des variables pronostiques, ainsi qu'une vérification de l'impact météorologique.

Dans ces deux travaux, le modèle de lacs « FLake » (Mironov et al. 2010) développé au Service Météorologique Allemand (DWD) a été utilisé. Plusieurs autres services météorologiques ont adopté ce schéma : Météo-France (Salgado et Le Moigne, 2010), le Met Office britannique (Rooney et Jones, 2010) et le service hydrométéorologique suédois (Samuelsson et al. 2010). Il s'agit d'un modèle conceptuel à la fois simple et réaliste permettant de décrire les transferts thermiques verticaux dans les lacs et incluant les lacs gelés. « FLake » prédit la structure verticale de température et les conditions de mélange dans les lacs de différentes profondeurs (jusqu'à environ 60 m) sur des échelles de temps allant de quelques heures à quelques années.

La performance de « FLake » a été évaluée sur plusieurs lacs et comparée avec d'autres systèmes sophistiqués au cours du projet de comparaison de modèles de lacs (Lac-MIP, Stepanenko et al. 2010).

L'introduction des lacs dans le schéma de surface HTESSSEL a reposée sur l'approche de type « mosaïque » (ou « tiling ») proposée pour les surfaces continentales (Koster et Suarez, 1992) qui est apparue bien adaptée au modèle de lacs « FLake » (Mironov et al. 2010).

Les bénéfices de l'approche « mosaïque » pour les lacs ont été montrés par Ms. Andrea Manrique-Sunen au CEPMMT sous ma codirection (en collaboration avec Dr. Anton Beljaars et l'Institut Météorologique Finnois) pour deux sites instrumentés. Ces travaux font l'objet d'une publication soumise (Manrique-Sunen et al. 2012).

Dutra et al. (2010) ont montré que la représentation des lacs entraîne des changements au niveau de la variation de stockage de l'énergie de surface et des changements dans la répartition des flux d'énergie de surface dans les régions des hautes latitudes et équatoriales, respectivement. J'ai co-encadré ces travaux de recherche et j'ai notamment suggéré l'utilisation de données satellitaires de température superficielle de l'eau, afin d'étendre la validation du modèle à l'échelle globale.

Dans Balsamo et al. (2012), j'ai étudié le modèle de lacs « FLake » en vue de sa mise en œuvre opérationnelle dans le système de prévision du CEPMMT. J'ai ainsi montré que « FLake » permet de simuler des températures des lacs en bon accord avec les observations du radiomètre MODIS (Figure 15). La durée de la période où les lacs sont gelés dans le modèle a aussi été vérifiée à l'aide des produits satellitaires de l'IMS («Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System», <http://www.natice.noaa.gov/ims/>) comme montré sur la Figure 16. J'ai évalué l'impact

de « Flake » sur la prévision des températures près de la surface à courte échéance (36 heures). Un impact positif sur la performance des prévisions des températures a été noté à proximité des lacs au printemps et durant la période estivale.

J'ai contribué dans la planification des deux articles précédemment cités : pendant l'atelier de modélisation des lacs du 18-20 Septembre 2008, à St. Petersburg, en Russie (<http://netfam.fmi.fi/Lake08/>), et lors d'un atelier similaire du 15-17 Septembre 2010 à Norrköping, en Suède (<http://netfam.fmi.fi/Lake10/>).

En parallèle, j'ai participé à des études visant l'introduction d'un schéma unidimensionnel de couche de mélange océanique. La couche superficielle des océans répond aux forçages météorologiques et hydrodynamiques de l'océan de façon plus rapide que la colonne d'eau sous-jacente. Takaya et al. (2010) ont documenté les travaux d'implémentation d'un schéma de couche limite océanique nommé « KPP » (Large et al. 1994). Ce travail a été amené par le Dr. Yuhei Takaya, visiteur scientifique de l'Agence Météorologique Japonaise, encadré par le Dr. Frédéric Vitart. J'ai contribué à ce travail sur les aspects techniques de l'introduction du schéma « KPP » dans le modèle du CEPMMT dans la mesure où les paramétrisations des processus physiques de la couche de mélange sont gérées de la même façon pour la surface continentale et l'océan. Je participe à une activité visant à combiner les schémas de lacs et de couche limite océanique (combinaison des schémas « FLake » et « KPP »). L'unicité de la théorie physique dans les bassins fermés et dans les océans permet d'envisager ce type de développement. Le traitement de la couche limite océanique dans les paramétrisations des modèles atmosphériques présente plusieurs avantages, notamment au voisinage des côtes. La nature fractale des côtes fait que les surfaces océaniques comme certains lacs sont destinées à rester d'échelle inférieure à la maille de modèle en leur voisinage. De plus, ces zones ne sont pas décrites dans les modélisations océaniques (généralement à plus faibles résolutions et uniquement concernées par les zones ouvertes). A court-terme, je vais m'impliquer dans des travaux d'assimilation de la température des lacs pour permettre une implémentation opérationnelle du schéma « FLake ».

Les rivières

Le lien entre météorologie et hydrologie se fait par le drainage et le ruissellement en provenance des réservoirs d'eau en surface (eau emmagasinée dans la couche de neige et dans la réserve utile des sols). La modélisation des rivières (schémas de routage) est liée à l'hydrodynamique et nécessite une connaissance du bassin et dans le cas de rivières contrôlées par l'activité humaine d'une connaissance des critères de gestion de la ressource en eau. Ces derniers aspects sont généralement négligés du à la difficulté de spécifier les détails morphologiques du bassin versant, et la calibration des débits est faite pour chaque bassin de façon indépendante afin de compenser les erreurs de modélisation. Les schémas de routage de rivières ont leurs réservoirs propres (nappes) qui sont alimentés par les ruissellements des modèles de surface. De plus le pas de temps des schémas de routage est généralement de 24 heures.

Pappenberger et al. (2009) et Balsamo et al. (2010) ont développé les activités de recherche nécessaire à l'introduction d'un schéma de routage de rivières dans le modèle du CEPMMT. Ces travaux ont démarré suite à une collaboration que j'ai établie avec l'Université de Tokyo (Prof. Taikan Oki, Oki-Lab), et grâce au travail du Dr. Florian Pappenberger au CEPMMT pour ce qui concerne la calibration du schéma de routage de rivières « TRIP2 » (Ngo-Duc et al. 2007). J'ai notamment fourni des ruissellements issus de simulations en mode forcé (GSWP2) du schéma de surface HTESSEL sur la période 1986-1995 nécessaires au schéma de routage « TRIP2 ».

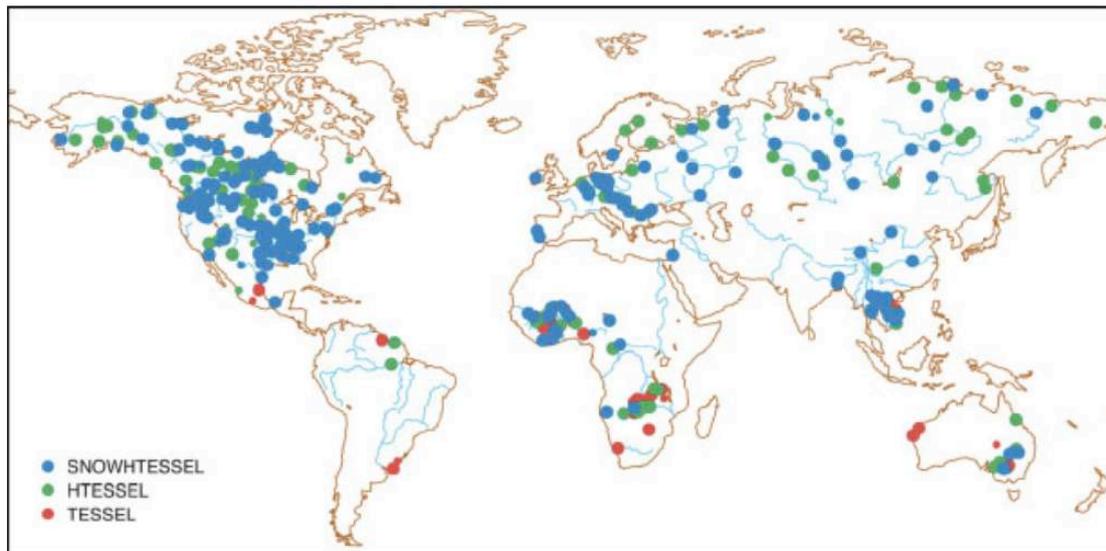


Figure 17 : Vérification de la performance dans la simulation des débits de rivières en fonction de la version de schéma de surface (TESSEL, van den Hurk et al. 2000, HTESSEL Balsamo et al. 2009, SNOWHTESSEL, Dutra et al. 2010) utilisé et couplé au schéma de routage « TRIP2 » (Ngo-Duc et al. 2007). Les petits cercles ne passent pas le niveau de significativité.

Dans Balsamo et al. (2010), les débits des rivières fournis par le GRDC (Figure 3) ont été utilisés pour valider les améliorations précédemment introduites concernant les modifications à l'hydrologie du sol et à la neige dans le modèle du CEPMMT (Figure 17).

Ces travaux ont montré l'intérêt des débits comme observations intégrées permettant le suivi du cycle de l'eau et la validation des précipitations et des processus de surface retardant le ruissellement dans les modèles de prévision du temps.

La végétation

La description de la végétation dans les modèles numériques de prévision du temps conduit à d'inévitables approximations, par la nécessité de la discrétiser en points de grille avec un nombre de types de végétations assez réduit, et surtout la représentation des aspects liés à la biologie comme la réponse de la végétation en conditions de stress hydrique. De plus, les aspects bio-géo-chimiques des biomes planétaires sont généralement négligés dans la prévision numérique du temps (ex.

stock et variations de la biomasse). Les propriétés principales que l'on souhaite représenter sont celles qui conditionnent les échanges de quantité de mouvement, chaleur, et masse (principalement les échanges d'eau mais comme on verra dans les perspectives aussi les échanges de carbone) entre les surfaces continentales et l'atmosphère.

Boussetta et al. (2011) ont étudié et quantifié l'impact de la saisonnalité de la végétation dans le modèle de prévision du CEPMMT. L'indice foliaire (« Leaf Area Index » ou LAI) qui définit l'état de la végétation (surface des feuilles vertes par unité de surface de sol) a été spécifié à partir d'une source externe pour remplacer une table de correspondance empirique entre LAI et types de végétation.

Pour ces travaux les données satellitaires MODIS fournissant une information sur le LAI entre 2001 et 2008 ont été utilisées, pour générer une climatologie mensuelle de ce paramètre, et pour étudier la sensibilité du modèle de prévision du CEPMMT à une description plus réaliste.

Plusieurs travaux avaient déjà montré la sensibilité d'une description du cycle phénologique de la végétation sur l'évaporation aux échelles saisonnières comme Xue et al. (1996ab), Xue et Shukla (1996), et ainsi que van den Hurk (2003) dans le modèle du CEPMMT.

Ce travail a été mené par le Dr. Souhail Boussetta sous ma co-direction et représente une contribution d'intérêt scientifique particulier car elle met en évidence pour la première fois avec le modèle du CEPMMT un impact météorologique quantifiable et positif sur la prévision à courte échéance (jusqu'à 48 h) dû au traitement de la végétation.

J'ai contribué en qualité de co-encadrant à définir les expériences numériques et à participer à l'écriture de l'article scientifique. Je me suis également impliqué dans divers aspects techniques de ce travail (projection des données satellitaires, écriture de code pour une utilisation dans le modèle numérique).

L'ensemble de ces développements s'est concrétisé par une implémentation opérationnelle au CEPMMT en Novembre 2010.

Les émissions naturelles de CO₂ en surface

Les émissions naturelles de CO₂ au-dessus des surfaces continentales font l'objet de l'effort du projet « Geoland-2 », financé par la Commission Européenne dans le 7ème Programme Cadre, pour le volet « Land-Carbon Core Information Service ». Ce projet a pour objet de définir les bases d'un service opérationnel de suivi des échanges de CO₂ en surface, qui puisse fournir des informations objectives complémentaires des inventaires forestiers (constituant actuellement la base objective principale pour le suivi des changements des flux de CO₂ en surface par le GIEC, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat).

Introduire des paramétrisations des flux de CO₂ dans les modèles de surface et dans les systèmes d'analyses adaptés aux prévisions numériques du temps est un défi pour les années à venir, car cela va demander à redéfinir les classes de végétation selon les propriétés de fonctionnement des biomes (« Plant Functional Types »), ainsi que les propriétés thermodynamiques, surtout si l'on envisage de traiter de

façon cohérente les cycles d'eau, d'énergie et de carbone.

Calvet et al. (2009) ont documenté les efforts de recherche dans le cadre de Geoland2 et en particulier dans le volet CO₂ (LC-CIS « Land Carbon Core Information Service »).

En qualité de coordinateur de l'activité Geoland2 au CEPMMT j'ai participé à l'évolution du projet, depuis sa proposition à la phase de négociation et aux phases comportant des livrables. Les activités de recherche produites dans Geoland2 ont été intégrées à celles du CEPMMT et ont permis des développements à vocation opérationnelle.

Les résultats principaux du projet Geoland2 sont documentées dans une publication par le Dr. Souhail Boussetta, sur la validation du schéma d'émission de CO₂ effectuée à l'aide des données FLUXNET et par comparaison avec des produits existants qui constituent « l'état de l'art » pour les estimations d'émission de CO₂.

Dans les travaux de Boussetta et al. (2012), l'approche intégrée décrite au Chapitre 1 a été appliquée à la validation du CO₂ (flux surface-atmosphère et concentration en atmosphère libre) de façon conjointe au flux d'énergie (latente, sensible et net) et mise en place, sur un grand nombre de sites de mesures (Tableau 1).

Deux versions du schéma de surface HTESSEL ont été proposées : une dont les flux turbulents sont calculés de façon indépendante du CO₂ (CHTESSEL) et l'autre où les conductances stomatiques sont calculées par la paramétrisation de Calvet et al. (2009) (CTESSEL).

Cela permet d'introduire un certain niveau de modularité dans les paramétrisations. Un avantage pratique est de permettre le développement en parallèle des schémas (pour le cycle de l'eau et le cycle du carbone). Les résultats sont comparables entre les deux approches pour la GPP et la RECO (Figure 18).

Tableau 1 : Liste des sites utilisés pour la vérification des flux par type de biome : (DBF=deciduous broadleaf forest ; forêts de feuillus caduques), (EBF=evergreen broadleaf forest ; forêts de feuillus), (DNF=deciduous needleleaf forest ; forêts de conifères caduques), (ENF=evergreen needleleaf forest ; forêts de conifères), (MF=mixed forest ; forêts mixtes), (WSA=woody savannas ; savane arborée), (GRA=grasslands ; prairies), (CRO=crops ; cultures), (WET= wetlands ; marécages).

N	Site	Lat [°N]	Lon [°E]	Veg. type	N	Site	Lat [°N]	Lon [°E]	Veg. type
1	sk-oa	53.63	-106.20	DBF	18	it-ro2	42.39	11.92	DBF
2	sk-obs	53.99	-105.12	ENF/WET	19	nl-ca1	51.97	4.93	GRA
3	brasilia	-15.93	-47.92	WSA/GRA	20	nl-haa	52.00	4.81	GRA
4	at-neu	47.12	11.32	GRA	21	nl-hor	52.03	5.07	GRA
5	ca-mer	45.41	-75.52	WET	22	nl-loo	52.17	5.74	ENF
6	ca-qfo	49.69	-74.34	ENF	23	ru-fyo	56.46	32.92	ENF
7	ca-sf1	54.49	-105.82	ENF	24	ru-ha1	54.73	90.00	GRA
8	ca-sf2	54.25	-105.88	ENF	25	ru-ha3	54.70	89.08	GRA

9	ch-oe1	47.29	7.73	GRA	26	se-sk2	60.13	17.84	ENF
10	fi-hyy	61.85	24.29	ENF	27	us-arm	36.61	-97.49	CRO
11	fr-hes	48.67	7.06	DBF	28	us-bar	44.06	-71.29	DBF
12	fr-lbr	44.72	-0.77	ENF	29	us-ha1	42.54	-72.17	DBF
13	il-yat	31.34	35.05	ENF	30	us-mms	39.32	-86.41	DBF
14	it-amp	41.90	13.61	GRA	31	us-syv	46.24	-89.35	MF
15	it-cpz	41.71	12.38	EBF	32	us-ton	38.43	-120.97	MF/WSA
16	it-mbo	46.02	11.05	GRA	33	us-var	38.41	-120.95	GRA
17	it-ro1	42.41	11.93	DBF	34	us-wtr	45.81	-90.08	DBF

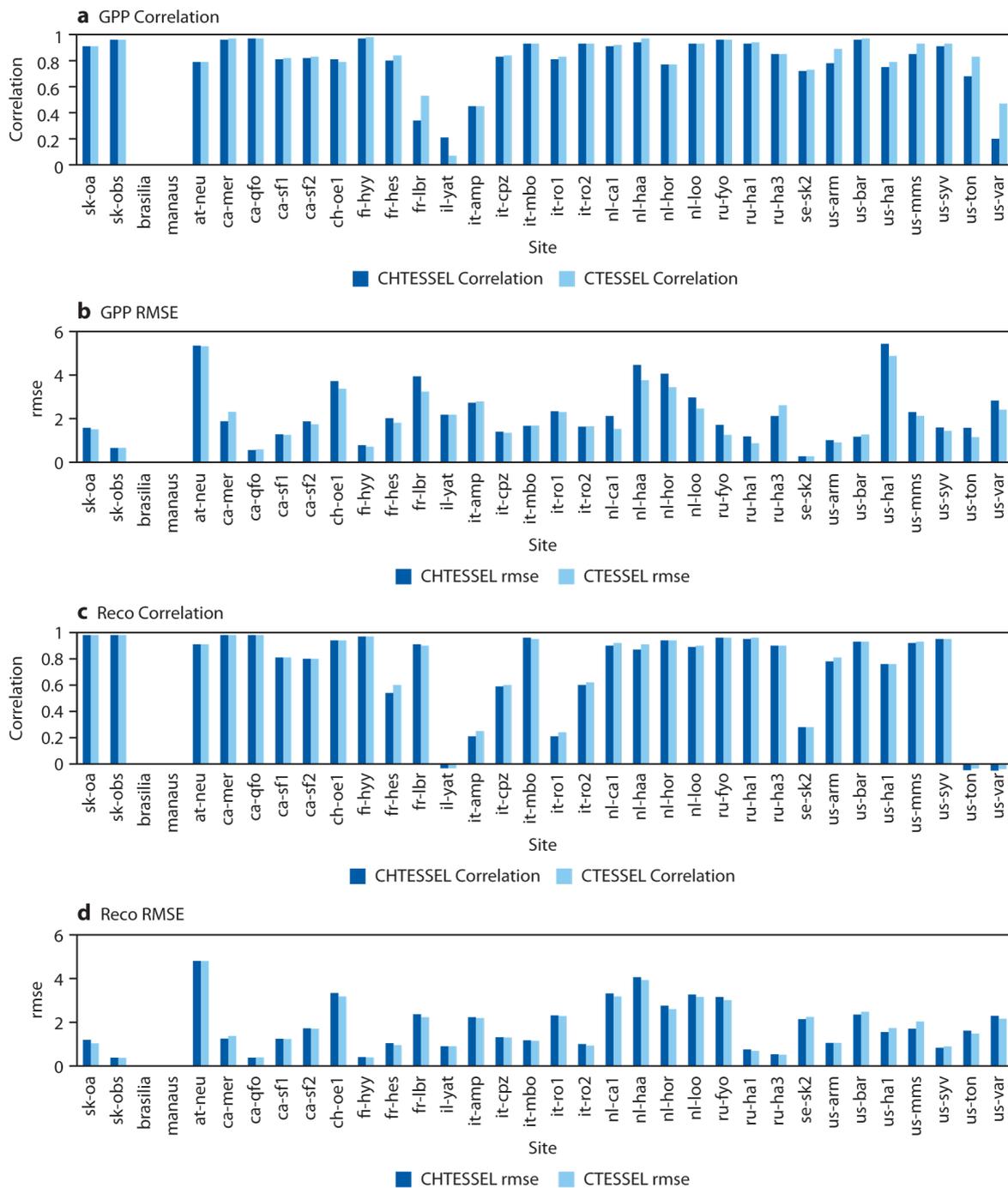


Figure 18 : Statistiques (corrélation et rmse) pour les simulations des flux de CO₂

pour 2 versions du schéma CHTESSEL (en bleu foncé) et CTESSEL (en bleu céleste) : pour la GPP (a) Corrélation et (b) Ecart quadratique moyen (rmse), et pour la Reco (c) Corrélation, et (d) Ecart quadratique moyen (rmse).

Les flux d'énergie en surface sont vérifiés de manière similaire sur la Figure 19, montrant une légère amélioration avec l'introduction du schéma CTESSEL.

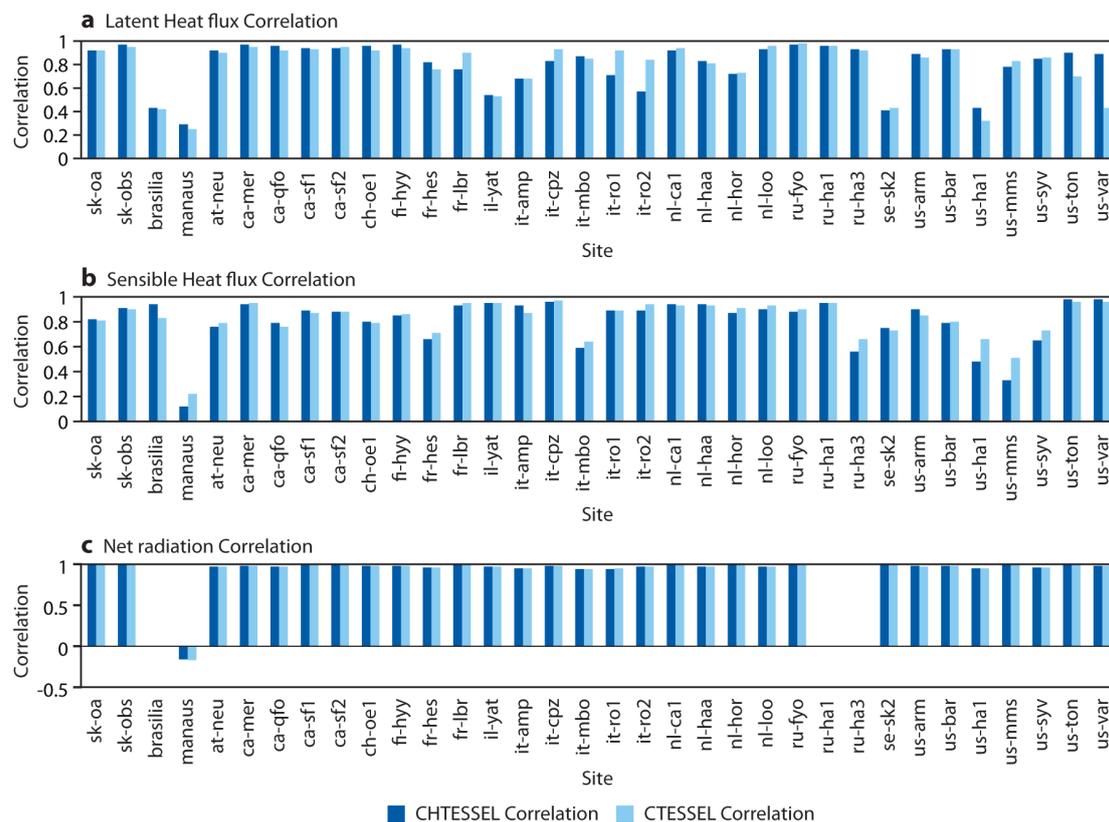


Figure 19 : Corrélation des flux observés et simulés sur 34 sites (Tableau 1 CO2 pour 2 versions du schéma CHTESSEL (en bleu foncé) et CTESSEL (en bleu céleste) : (a) Chaleur latente (b) Chaleur sensible (c) Rayonnement net.

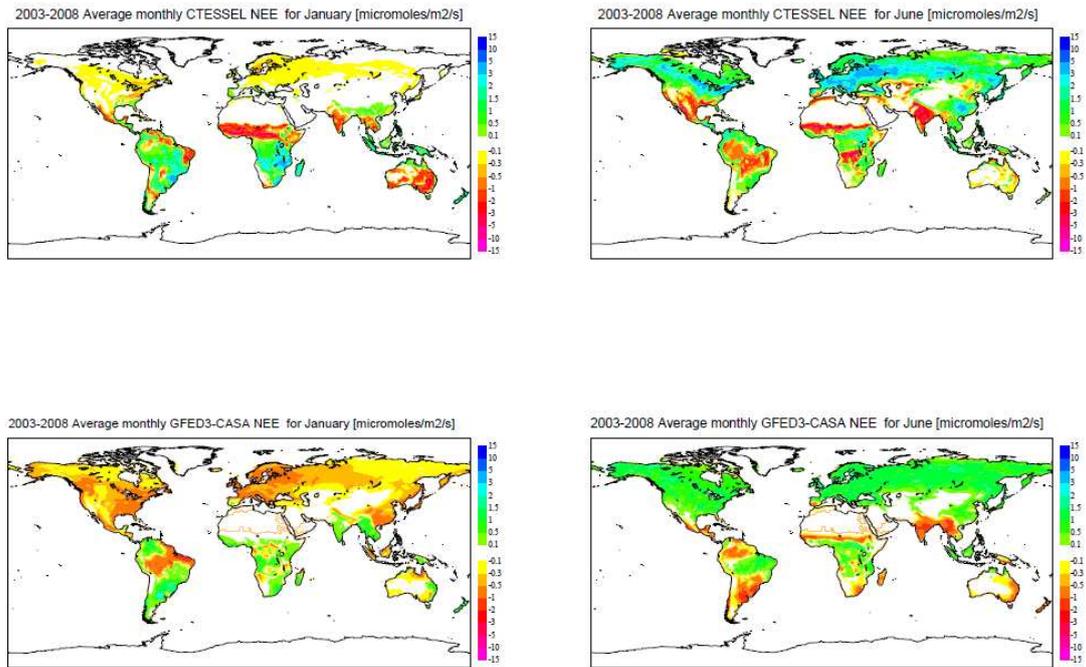


Figure 20 : Moyenne mensuelle du NEE 2003-2008 [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] simulées par CHTESSEL (en haut) et CASA-GFED3 (en bas) pour les mois de Janvier (à gauche) and Juin (à droite).

Selon la stratégie de développement décrite précédemment (Figure 5), des simulations globales ont été effectuées pour valider les flux de CO_2 produits par le schéma CHTESSEL dans le cadre du modèle couplé utilisé dans le projet MACC (« Monitoring Atmospheric Composition and Climate »).

Les flux de CO_2 simulés par CHTESSEL ont été comparés aux produits CASA-GFED3 (van der Werf et al. 2010) utilisés opérationnellement dans MACC (Figure 20), avec un impact positif provenant de CHTESSEL pour la simulation des concentrations de CO_2 à l'échelle globale (Boussetta et al. 2012).

Ces développements ont permis de considérer les sorties du modèle CHTESSEL au sein du projet MACC-2 qui alimente le Service Européen du GMES (« Global Monitoring for Environment and Security ») pour le suivi opérationnel des concentrations et des flux de CO_2 .

Les émissions naturelles dans les fréquences micro-ondes en surface

La modélisation de l'émission du rayonnement électromagnétique de la surface dans différentes gammes de longueurs d'onde présente depuis plusieurs années un intérêt croissant dû aux perspectives qu'elle offre de permettre l'assimilation directe des radiances satellitaires informatives sur les surfaces dans les modèles de prévision du temps.

Les avancées dans ce domaine sont liées à disponibilité d'observations directes des radiances que l'on veut simuler et pour cela plusieurs instituts de recherche se sont dotés d'instruments similaires aux capteurs satellitaires lors

de campagnes de mesures.

Dans le cadre de la mission SMOS, j'ai contribué à un travail préparatoire avant le lancement du satellite en considérant les observations en bande L de la mission spatiale Skylab.

Drusch et al. (2009) ont comparé les émissions micro-ondes simulées par le schéma CMEM (de Rosnay et al. 2008) alimenté par la ré-analyse ERA-40 (Uppala et al. 2004), aux observations de en bande L pendant la mission spatiale Skylab (Figure 21).

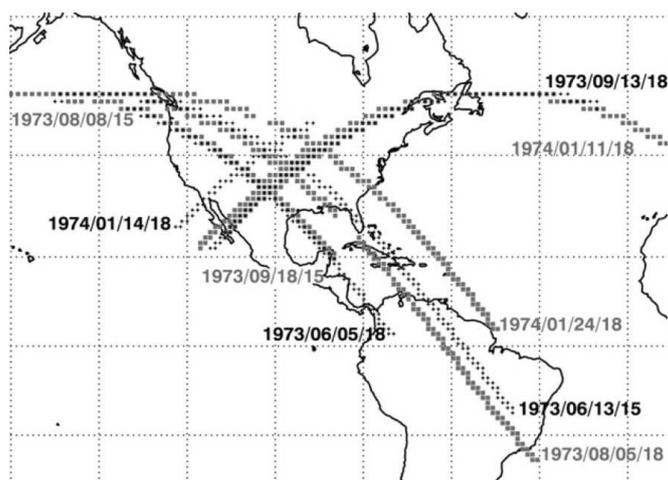


Figure 21 : Trajectoires de la station orbitale Skylab en 1973/74 avec à son bord les premiers radiomètres micro-ondes en bande-L.

Ce travail avait été envisagé et initié au laboratoire RPN du Centre Météorologique Canadien, mais n'avait pas été finalisé. En collaboration avec le Dr. Matthias Drusch, j'ai poursuivi cette étude au CEPMMT dans le cadre de l'évaluation du schéma de transfert radiatif CMEM. J'ai fourni les données de la ré-analyse ERA-40 (nécessaires pour considérer des dates passées aussi lointaines) et participé à l'écriture et aux révisions d'une publication (Drusch et al. 2009).

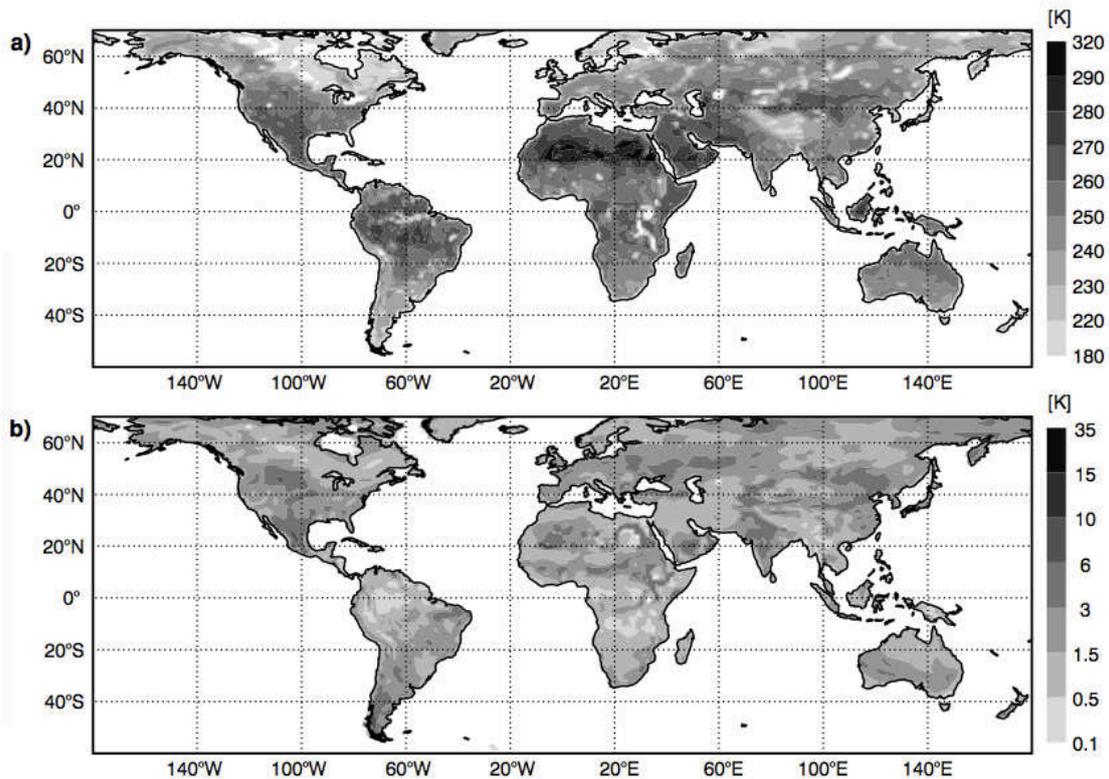


Figure 22 : Carte globale annuelle des émissions naturelles micro-ondes en bande-L (températures de brillance) obtenue par le schéma CMEM utilisant les champs de surface de la ré-analyse ERA-40. Moyenne (a) et écart type (b) des températures de brillance [K].

Il est intéressant de noter qu'il s'agissait de la première calibration d'un schéma de transfert radiatif en bande-L utilisant des données satellitaires observées. A titre d'illustration, une carte globale des températures de brillance simulées par CMEM (utilisant les données de la ré-analyse ERA-40) est présentée sur la Figure 22.

Un des paramètres les plus sensibles pour simuler l'émission micro-ondes en bande-L est la rugosité de surface. Elle n'a toutefois pas de lien direct avec les rugosités dynamique ou thermique définies pour les transferts turbulents dans la couche limite mais elle joue un rôle essentiel pour moduler l'émission des surfaces. Muñoz Sabater et al. (2009) ont démontré l'importance de la rugosité micro-ondes et exploré des différentes configurations pour le schéma radiatif en bande L. Ce travail a permis de tester plusieurs configurations du schéma de transfert radiatif CMEM avec une attention particulière aux paramètres les plus susceptibles de modifier les résultats de manière significative. Ce travail était nécessaire et très important pour permettre de simuler de manière réaliste les émissions en bande-L telles que mesurées par le satellite SMOS. J'ai contribué à ce travail par des discussions scientifiques et lors des phases de rédaction-révision de l'article. Une configuration optimale de CMEM testée sur le site de SMOSREX, près de Toulouse en France, a été identifiée pour le modèle HTESSSEL-CMEM et est utilisée dans le monitoring des températures de brillance SMOS.

Les données de SMOS pour l'année 2010 ont été aussi utilisées dans l'étude

d'Albergel et al. (2012) pour valider les changements dans la paramétrisation de l'évaporation du sol nu. L'assèchement produit par la nouvelle paramétrisation sur les zones désertiques produit une augmentation des températures de brillance simulées en meilleur accord avec les observations de SMOS.

Les projets de comparaison entres les modèles de surface

Les projets internationaux de comparaisons de paramétrisations pour la surface continentale sont une source d'information très importante pour mieux comprendre leur comportement.

Les projets PILPS (Project of Intercomparison of Land Parameterization Schemes), GSWP (Global Soil Wetness Project, Dirmeyer 2011), SNOWMIP (Snow Model Intercomparison Project, Etchevers et al. 2004, Rutter et al. 2009) ont permis, à partir des années 90s, d'établir des collaborations entre les spécialistes des processus physiques et les modélisateurs en prévision numérique du temps, d'identifier les variables de contrôle et les paramètres plus importants dans les modèles en fonction de leur niveau de complexité.

Les travaux présentés dans Boone et al. (2009) et de Rosnay et al. (2009) décrivent l'effort dans le volet surface du projet d'Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine (AMMA) pour comparer différents modèles de surface (Figure 23) dans lequel je me suis inscrit pour représenter le CEPMMT.

En particulier dans l'article de Rosnay et al. (2009) différentes combinaisons des schémas de surface et de schémas de transfert radiatif (en bande C) ont été comparés pour établir des configurations optimales.

Tableau 2 : Liste des schémas participant au projet AMMA ALMIP (Boone et al, 2009).

Model acronym	Institute	Recent reference	ALMIP structure
a) TESSEL, b) CTESSEL, c) HTESSEL	ECMWF, Reading, United Kingdom	a) Van den Hurk and Viterbo (2003), b) Lafont et al. (2006), c) Balsamo et al. (2009)	4L, 6 tiles, 1E SV: ECMWF
a) ORCHIDEE-CHOIS, b) ORCHIDEE-CWRR	IPSL, Paris, France	a) Krinner et al. (2005), b) d'Orgeval et al. (2008)	a) 2L, b) 11L, 13 tiles, 1E SV: Ecoclimap
a) ISBA, b) ISBA-DF	CNRM, Météo-France, Toulouse, France	a) Noilhan and Mahfouf (1996), b) Boone et al. (2000)	a) 3L, b) 5L, 1 tile, 1E SV: Ecoclimap
JULES	CEH, Wallingford, United Kingdom	Essery et al. (2003)	4L, 9 tiles, 1E SV: Ecoclimap
SETHYS	CETP/LSCE, Vélizy, France/ Gif-sur-Yvette, France	Coudert et al. (2006)	2L, 12 tiles, 2E SV: Ecoclimap
IBIS	ISE-Montpellier, France; SAGE, UW Madison—Madison, WI	Kucharik et al. (2000)	6L, 1 tile, 8E SV: Ecoclimap
NOAH	CETP/LSCE (NCEP)	Chen and Dudhia (2001), Decharme (2007)	7L, 12 tiles, 1E SV: Ecoclimap
CLSM	UPMC, Paris, France	Koster et al. (2000)	3L, 5 tiles, 3E SV: Ecoclimap
M SHE	University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark	Graham and Butts (2006)	42L, 1 tile, 1E SV: Ecoclimap
SSiB	LETG, Nantes, France; UCLA, Los Angeles, CA	Xue et al. (1991)	3L, 1 tile, 2E SV: SSiB
SWAP	IWP, Moscow, Russia	Gusev et al. (2006)	3L, 1 tile, 1E SV: Ecoclimap

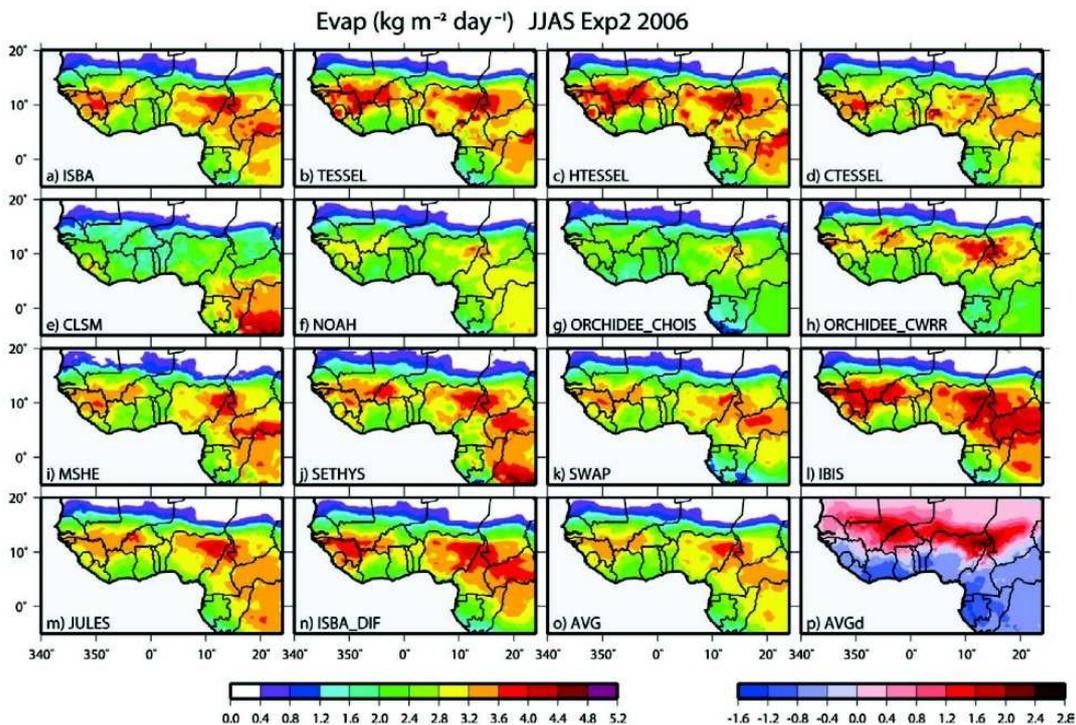


Figure 23 : Comparaison des champs d'évaporation obtenus dans le cadre du projet AMMA-ALMIP. Le CEPMMT a participé avec 3 versions différentes de son schéma de surface (voir Tableau 2).

Récemment, plusieurs centres de recherches ont développé des produits pour fournir une estimation quantitative de l'évaporation des surfaces continentales. Etant donnée la difficulté de cette tâche, plusieurs produits ont été développés pour améliorer la représentativité statistique en estimant les

incertitudes associées.

Mueller et al. (2011) et Jiménez et al. (2010) ont conduit des projets d'inter-comparaison (projet Land-FLUX) essentiels pour connaître les défauts des modèles et ma participation à ces projets a mis en évidence des comportements similaires entre le modèle de surface du CEPMMT et les autres modèles. J'ai contribué à ces projets en produisant les simulations de surface pour le schéma de surface du CEPMMT en mode forcé selon le protocole proposé par les organisateurs et en interagissant sur le texte des publications. Les interactions scientifiques que j'ai pu développer avec plusieurs chercheurs pendant la durée des projets AMMA et Land-FLUX ont été un énorme enrichissement personnel et professionnel.

De manière générale, la participation aux expériences d'intercomparaison m'a permis de confronter les simulations du modèle et les analyses du CEPMMT avec « l'état de l'art » (en termes d'observations disponibles, modèles participants, et méthodologies de vérification), en permettant également de qualifier nos travaux de modélisation. La participation en équipe et le partage des aspects techniques a permis d'optimiser la charge de travail, compatible avec les contraintes opérationnelles et de recherche du laboratoire, et a aussi stimulé les collaborations internes. Quand cela a été possible, la participation avec différentes versions du schéma de surface (dans le cadre de ALMIP/ALMIP-MEM) a aussi permis d'obtenir une validation indépendante des paramétrisations à l'aide des données in situ ou de télédétection.

Chapitre 3 : Les méthodes d'assimilation de données

L'assimilation de données pour les surfaces continentales est une discipline relativement jeune (environ une vingtaine d'année) par rapport aux développements équivalents pour l'atmosphère ou l'océan. Certaines variables de surface (e.g. eau du sol dans la zone racinaire) ont une évolution lente par rapport aux échelles de temps des variables atmosphériques et nécessitent d'être initialisées correctement afin de ne pas maintenir et accumuler des erreurs initiales au cours de la prévision du modèle. En contre partie, une initialisation correcte de ces variables lentes du système Terre peuvent accroître la prévisibilité atmosphérique (cette thématique sera abordée au Chapitre 4). Je présente dans ce chapitre mes contributions dans ce domaine qui ont permis de vérifier certaines hypothèses implicites utilisées dans les modèles de prévision opérationnels mais surtout de faire progresser les méthodes depuis des approches statiques (de type « interpolation optimale ») vers des approches dynamiques (de type « variationnel » ou « filtre de Kalman »). Je montre l'intérêt des approches dynamiques qui permettent l'assimilation d'observations satellitaires, tout en les combinant de manière naturelle aux observations conventionnelles. Je conclus ce chapitre sur les approches innovantes que j'ai développé utilisant les critères d'optimalité de l'assimilation de données pour une estimation objective de paramètres empiriques ou non observables des schémas de surface.

Les méthodes d'assimilation de données répondant aux critères statistiques de l'estimation optimale sont les plus reconnues et utilisées pour l'initialisation des modèles de prévision numérique du temps. Ces méthodes, sont nettement supérieures à de simples interpolations spatiale et temporelle, car elles respectent la cohérence des relations physiques et statistiques qui lient les différentes données météorologiques et présentes dans les modèles de prévision numérique.

L'histoire des schémas d'analyse montre différents exemples de méthodes contenant des éléments de la théorie de l'estimation optimale (ex. le krigeage, l'estimation des moindres carrés, l'estimation du maximum de vraisemblance). Les méthodes étudiées dans le contexte de l'analyse atmosphérique (Daley, 1991) ont été appliquées aux surfaces continentales.

Je présente par la suite trois familles de méthodes d'assimilation pouvant être appliquées aux surfaces continentales: l'interpolation optimale, la méthode variationnelle, le filtre de Kalman.

Au cours de mes activités de recherche à Météo-France et au Service Météorologique Canadien j'ai eu l'occasion d'étudier la méthode variationnelle en examinant de manière approfondie les hypothèses sous-jacentes. L'analyse de surface est caractérisée par deux facteurs la distinguant de l'analyse atmosphérique :

- L'absence d'observations directes sur de larges domaines

- La forte variabilité spatiale des paramètres de surface

Pour cela, la plupart des techniques d'assimilation opérationnelles en prévision numérique du temps pour l'initialisation des surfaces continentales utilisent les trois hypothèses suivantes:

- L'indépendance avec les variables atmosphériques (ou hypothèse de troncature dans l'espace de la variable de contrôle, permettant de traiter l'analyse de surface séparément de celle d'altitude)
- La validité locale (hypothèse de découplage spatial horizontal : 2D)
- La validité de l'hypothèse linéaire-tangente (hypothèse de linéarité locale pour l'opérateur d'observation : TL)

Différentes méthodes ont été testées (Mahfouf 1991, Hess 2001) et sont utilisées opérationnellement en prévision numérique du temps : l'interpolation optimale (OI), l'assimilation variationnelle (VAR), et les filtres de Kalman (sous plusieurs variantes).

En particulier, j'ai, depuis mon travail de thèse de doctorat, étendu l'application de la méthode variationnelle simplifiée, que j'avais alors proposé, en la combinant avec l'approche « offline » utilisée pour forcer les schémas de surface, permettant ainsi une réduction considérable dans le coût numérique (de l'ordre d'un facteur 100) nécessaire au calcul de la matrice Jacobienne en différences finies. La portabilité et la faisabilité de cette méthode, pour la méthode variationnelle simplifiée ou le filtre de Kalman simplifié, ont été étudiées dans différents laboratoires, et son coût réduit permet de l'envisager pour des applications opérationnelles en prévision numérique du temps.

La méthode d'interpolation optimale

La méthode d'interpolation optimale (Rutherford, 1972) est souvent appliquée pour des analyses de surfaces uni-variées en modes unidimensionnel (OI - 1D) ou bidimensionnel (OI - 2D).

Le modèle de prévision fournit une ébauche (information a priori généralement fournie par une prévision à courte échéance) qui est utilisée pour calculer les écarts entre le modèle et des observations ponctuelles. Ces différences, si elles sont jugées représentatives, sont ensuite converties en incréments d'analyse (correction apportée à l'ébauche) par le schéma d'interpolation optimale, au moyen d'une relation linéaire dont les coefficients minimisent la variance de l'erreur d'analyse (critère d'optimalité).

L'« optimalité » réelle de ces schémas réside dans la calibration des statistiques d'erreurs et dans les fonctions d'interpolation (dites fonctions de structures spatiales des erreurs).

La méthode OI appliquée à l'eau et la température du sol

La méthode de type « OI-1D », initialement proposée par Mahfouf (1991), est appliquée opérationnellement à Météo-France, au Centre Météorologique

Canadien, et au CEPMMT, pour l'analyse de l'eau du sol et de la température du sol. Pour cela, une analyse (de type OI-2D) des données de températures et humidités à 2m est effectuée aux heures synoptiques et les incréments de cette analyse à 2m sont utilisés comme innovations pour l'analyse dans le sol.

La méthode OI appliquée à l'épaisseur du manteau neigeux

La méthode OI pour l'analyse de la couche de neige a été proposée par Brasnett (1999) et elle est utilisée opérationnellement au Service Météorologique Canadien. En Europe des études effectuées dans le cadre du modèle HIRLAM (Cansado et al. 2008), ont vérifié la validité de cette méthode. L'OI pour la neige est une extension de l'OI-2D des données de température/humidité à l'analyse de l'épaisseur de la couche de neige tel qu'observée par les stations du réseau SYNOP.

Une étude a été menée par le Dr. Patricia de Rosnay pour évaluer l'impact du schéma d'assimilation de type OI remplaçant la méthode de Cressman (1959) ainsi que l'utilisation d'une nouvelle base de données pour contraindre l'extension de la couverture de neige (produit IMS, <http://www.natice.noaa.gov/ims/>, disponible à une résolution spatiale de 4 km et à une fréquence journalière). Ces deux composantes constituent d'importantes améliorations par rapport à l'analyse de neige opérationnelle au CEPMMT entre les années 2004 et 2010 (Drusch et al. 2004) et font l'objet d'une publication (de Rosnay et al. 2012) dont je suis co-auteur.

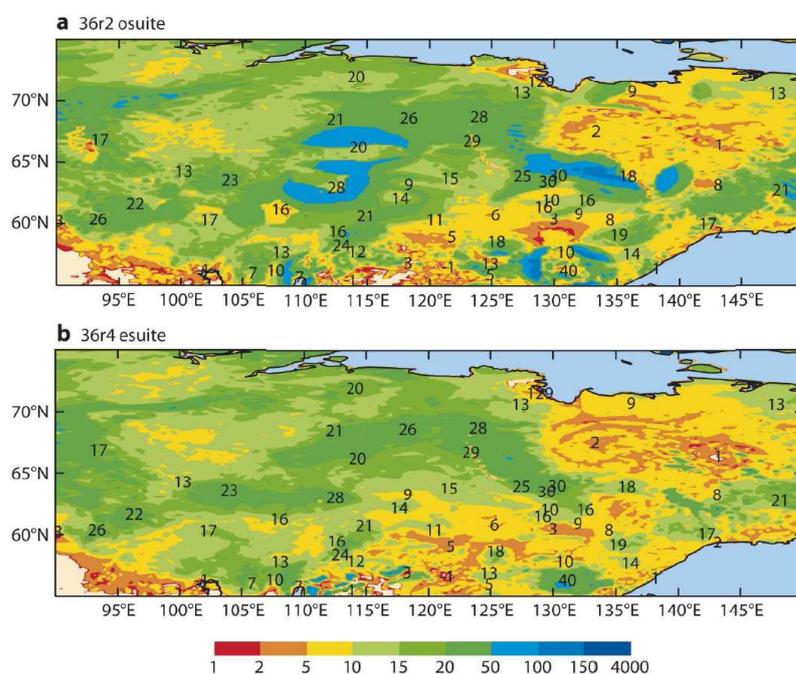


Figure 24 : Comparaison des analyses de l'épaisseur de neige obtenues avec la méthode de Cressman (en haut) et la méthode OI (en bas) le 30 Octobre 2010 (extrait de de Rosnay et al. 2012). Les observations SYNOP sont reportées en noir.

Un exemple de l'amélioration de la cohérence spatiale de la nouvelle analyse

est fourni sur la Figure 24. L'impact sur les scores de prévision est apparu significatif pour le géopotential à 500 hPa à une première semaine d'échéance, et en particulier sur l'Asie.

Les méthodes variationnelles

La méthode d'assimilation variationnelle consiste à minimiser une fonction coût mesurant l'écart d'un état modèle à la fois une ébauche et à des observations. Elle peut être uni-, bi- ou tri-dimensionnelle (1D-Var, 2D-Var ou, 3D-Var) dans l'espace.

L'extension dans le temps de ce concept porte le nom d'assimilation variationnelle quadridimensionnelle (en abrégé : 4D-Var). Dans ce cas, on prend en compte de manière simultanée les données disponibles à des instants différents sur une fenêtre d'assimilation. Les trois dimensions d'espace sont utilisées avec la dimension "temps" permettant d'ajuster la trajectoire du modèle sur la période considérée (fenêtre d'assimilation). En considérant la variable de contrôle \mathbf{x} décrivant l'état du modèle, la fonction coût J peut s'écrire comme la somme de deux termes quadratiques :

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} (\mathbf{x} - \mathbf{x}^b)^T \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}^b) + \frac{1}{2} (\mathbf{y} - H(\mathbf{x}))^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - H(\mathbf{x}))$$

où \mathbf{x} est le vecteur de contrôle, \mathbf{y} et le vecteur d'observations.

\mathbf{B} est la matrice de covariances d'erreurs de l'ébauche, et \mathbf{R} la matrice de covariances d'erreurs des observations, et H est l'opérateur d'observation qui fait le lien entre le vecteur de contrôle et les observations, qui inclus le modèle de prévision numérique du temps ou dans une assimilation dite « offline » uniquement le schéma de surface.

La méthode 2D-Var appliquée à l'eau du sol

La méthode 2D-Var (dimensions considérées : la verticale et le temps) pour l'analyse de l'eau du sol a été mise en œuvre dans les études de Callies et al. (1998), Rhodin et al. (1999). Bouyssel et al. (1999) ont montré la faisabilité et l'intérêt de la méthode 2D-Var à Météo-France dans le cadre du schéma de surface ISBA (Noilhan et Planton, 1989).

Balsamo et al. (2004) ont proposé une version réduite ou simplifiée de cette méthode basée sur la proposition de Hess (2001), calculant la Jacobienne de l'opérateur d'observation en différences finies (plusieurs intégrations du modèle de prévision numérique avec des conditions dans le sol perturbées). Cette approche a été développée pour l'assimilation de l'eau du sol dans la couche racinaire, après avoir vérifié la validité de l'hypothèse linéaire tangente et l'hypothèse de découplage spatial, considérant uniquement la dimension verticale (z) et le temps (t). Le principal avantage de cette méthode provient de sa mise en œuvre aisée car elle ne demande pas le codage des schémas linéaire tangent et adjoint des paramétrisations de surface. La sensibilité de la variable de contrôle \mathbf{x} est obtenue au moyen de perturbations en différences finies de modèle non-linéaire comme illustré sur la Figure 25.

La minimisation de la fonction cout J est alors remplacée par une solution analytique sous l'hypothèse de linéarité pour l'opérateur d'observation H.

$$H(\mathbf{x}+d\mathbf{x}) \cong H(\mathbf{x}) + \mathbf{H} d\mathbf{x}$$

$$\text{Grad}_{\mathbf{x}} J(\mathbf{x}) = 0 = \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}^b) + \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - H(\mathbf{x}))$$

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^b + \mathbf{B}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}(\mathbf{y} - H(\mathbf{x}^b))$$

L'équation d'analyse s'écrit souvent sous la forme :

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^b + \mathbf{K} (\mathbf{y} - H(\mathbf{x}^b)) \quad \text{ou } \mathbf{K} = \mathbf{B}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \text{ est matrice de gain, et } (\mathbf{y} - H(\mathbf{x}^b)) \text{ est le vecteur innovation.}$$

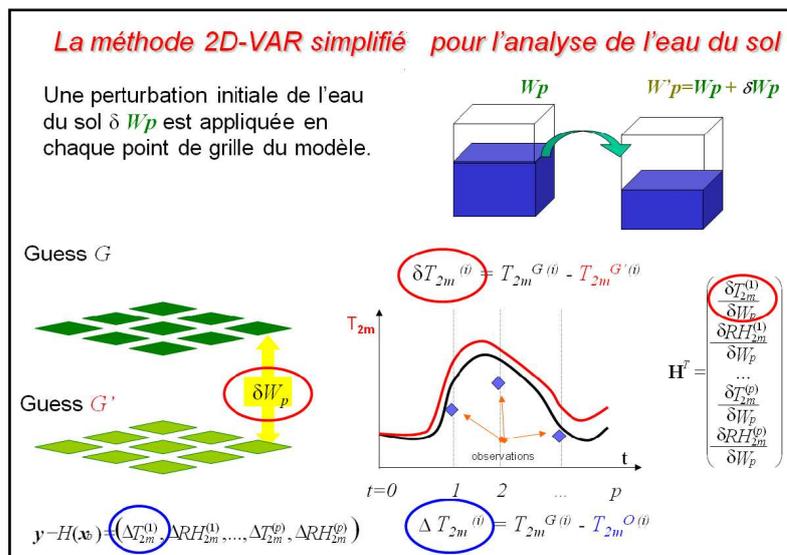


Figure 25 : Schéma d'analyse 2D-Var simplifié (extrait de Balsamo, 2003)

Une méthode « 2D-Var simplifié » pour l'assimilation de données de températures et humidité à 2m (comme dans le cas de l'« OI ») et appliquée à l'analyse de l'eau du sol a été mise en œuvre dans un modèle de prévision du temps à aire limitée ALADIN de Météo-France, et comparée à la méthode de type « OI ». La comparaison des méthodes « OI » et « 2D-Var simplifié » que j'ai développées, est illustrée par les valeurs de la matrice de gain \mathbf{K} (Figure 26). L'approche « 2D-Var simplifié » permet de prendre en compte la situation météorologique et de mieux extraire le contenu en information des observations à 2m (liée au processus d'évapotranspiration).

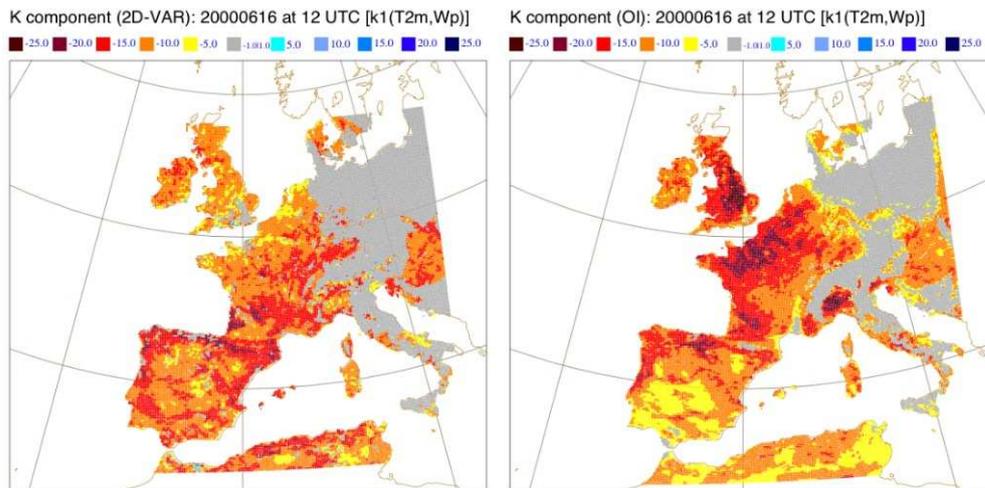


Figure 26 : Illustration des composantes de la matrice de gain K pour l'eau du sol et $T2m$) dans la méthode « dynamique » « 2D-Var simplifié » (à gauche) et dans la méthode « statistique » « OI » (à droite), d'après Balsamo et al. (2004).

La méthode proposée se basait sur les propriétés du schéma de surface ISBA de Météo-France, particulièrement adapté à une approche simplifiée de la méthode variationnelle (à l'aide de différences finies).

L'eau du sol (indice normalisé entre la capacité au champ et le point de flétrissement) obtenue par l'analyse « 2D-Var simplifié » a été comparée au système de modélisation hydrologique SAFRAN-ISBA-MODCOU (Habets et al., 2008) qui est utilisé pour le suivi du débits de rivières en France métropolitaine à Météo-France (Figure 27).

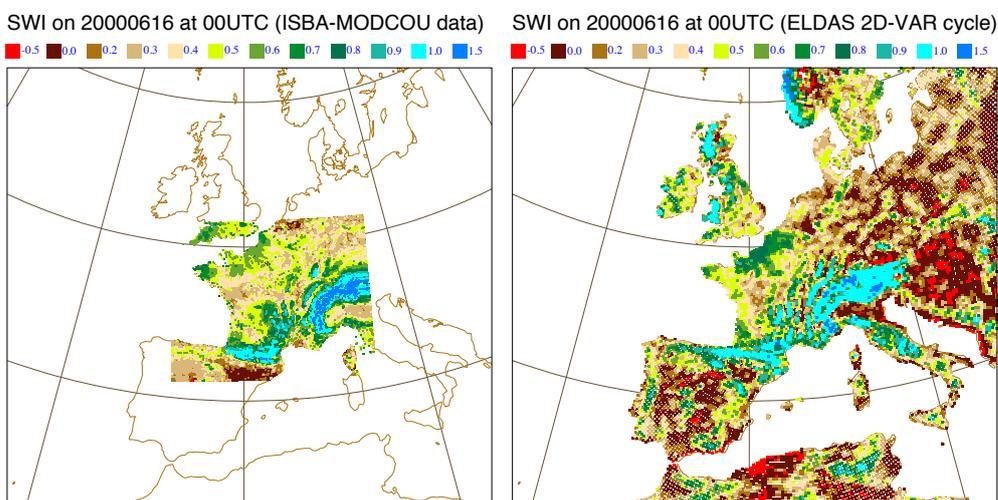


Figure 27 : Indice d'humidité du sol dans la zone racinaire produit par un système hydrologique SIM (à gauche) et par la méthode « 2D-Var simplifié » sur des fenêtres d'assimilation de 24-h (à droite) pour la journée du 16 Juin 2000 (après 10-jours de cycles d'analyse) appliquée au modèle à aire limitée de prévision du temps ALADIN.

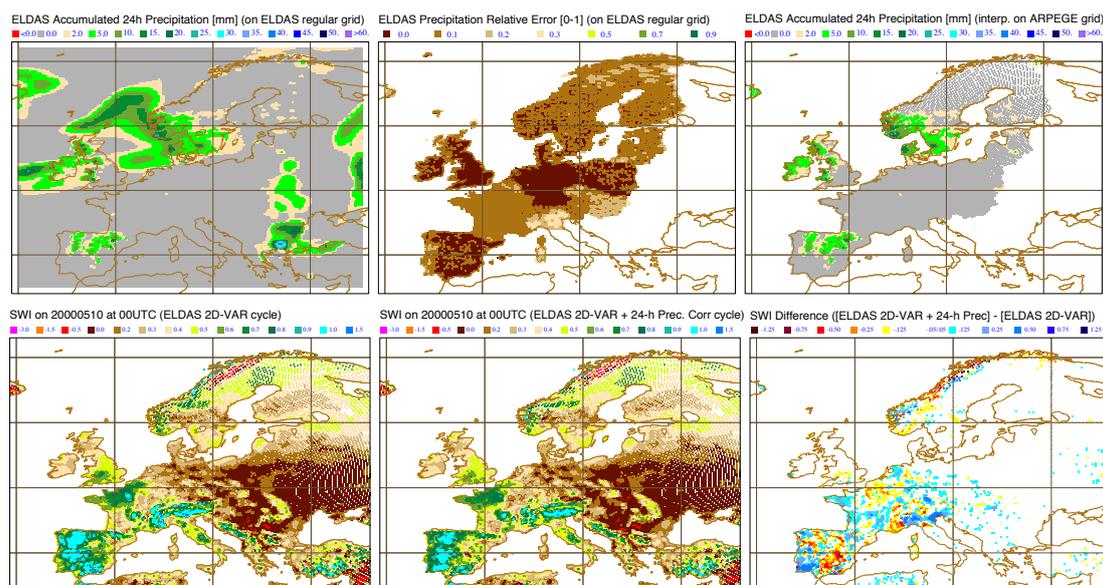


Figure 28 : Illustration de la méthode « OI » étendue aux observations de Précipitations (cumuls 24-heures) (en haut, le modèle ARPEGE à gauche, dans ELDAS au centre et leur différence à droite). En bas, l'impact de l'utilisation additive de l'OI de précipitations ajoutée au « 2D-Var simplifié » (Balsamo et al. 2005).

Mes travaux ont continué dans le cadre du projet ELDAS (« European Land Data Assimilation System », van den Hurk, 2002) où j'ai adapté la méthode « 2D-Var simplifié » au modèle global ARPEGE (Figure 28) utilisée opérationnellement à Météo-France.

J'ai aussi développé une méthode de type « OI » utilisant les données journalières de précipitations afin de corriger l'eau du sol, ce qui n'avait jamais été examiné auparavant. L'avantage de cette méthode, combinée à la méthode « 2D-Var simplifié », consiste à corriger plus efficacement les erreurs sur l'eau du sol produites par les précipitations par rapport à la méthode n'assimilant que les données à 2m. Cette approche originale a été récemment reprise par Mahfouf and Bliznak (2011) avec un filtre de Kalman étendu.

La méthode 2D-Var appliquée à l'indice foliaire

Dans le cadre du projet Geoland au CEPMMT, j'ai proposé d'utiliser la méthode du « 2D-Var simplifié » appliquée à l'assimilation de l'indice foliaire de la végétation (LAI) sur un domaine d'étude en Afrique de l'Ouest qui présente un cycle marqué de la végétation avec le schéma de surface CTESSEL (décrivant la production de biomasse par photosynthèse). Cette étude a été réalisée par le Dr. Lionel Jarlan (IRD, France) sous ma direction et a donné lieu à une publication (Jarlan et al. 2008). Ces travaux ont montré l'importance d'une connaissance précise de l'état de la végétation pour pouvoir simuler de manière réaliste les flux de CO₂ entre la surface et l'atmosphère. Ils ont aussi montré l'importance du forçage atmosphérique, en particulier des précipitations, sur la simulation des flux turbulents et du ruissellement en surface.

L'application de l'assimilation de données au cycle de la végétation et l'impact sur les flux de CO₂ et l'évaporation de surface constituent les éléments les plus originaux de ce travail. Une étude rigoureuse de l'hypothèse linéaire tangente (à la base de la méthode « 2D-Var simplifié ») n'a pas été effectuée dans ces travaux et donc en constitue une limite, qui a été comblée depuis par d'autres travaux effectués plus récemment à Météo-France et à l'Université de Melbourne (Rüdiger et al., 2010).

Les filtres de Kalman

Le filtre de Kalman appartient à la famille des méthodes optimales et sa version étendue est appliquée aux systèmes faiblement non linéaires. Les travaux présentés dans la suite concernent l'implémentation d'une première version appliquée à l'analyse de l'eau du sol dans le modèle opérationnel au CEPMMT à laquelle j'ai contribué de manière significative. Cette version du filtre de Kalman étendu (Extended Kalman Filter : EKF) est aussi simplifiée car la matrice des covariances d'erreurs de l'ébauche **B** reste constante dans le temps. Les qualités du filtre de Kalman étendu et d'ensemble avaient été étudiées par Reichle et al. (2002), en montrant l'équivalence des deux méthodes même lorsque le nombre de membres du filtre d'ensemble est faible. La matrice de gain **K** est calculée comme avec le « 2D-Var simplifié » en utilisant une approche en différences finies (Hess, 2001). La différence principale entre le « 2D Var simplifié » et l'« EKF simplifié » est que dans un cas l'incrément d'analyse est calculé au début de la fenêtre d'assimilation alors que dans l'autre cas cet incrément est estimé en fin de fenêtre.

Drusch et al. (2009) ont documenté les avancements relatifs à l'utilisation du filtre de Kalman étendu (simplifié) au schéma de surface HTESSEL, pour l'analyse de l'eau du sol dans la couche racinaire. J'ai contribué à ce travail en réalisant l'étude de la linéarité et dans la discussion des résultats. J'ai aussi participé à la rédaction de l'article. Bien que la matrice de gain **K** soit calculée à l'aide du modèle non linéaire complet (surface et atmosphère), dans l'implémentation, la trajectoire atmosphérique perturbée n'est propagée dans le temps et à chaque pas de temps la trajectoire atmosphérique de contrôle est lue pour limiter le bruit numérique (documenté dans Balsamo, 2003).

Cela conduit à une équivalence formelle avec la méthode « offline » (décrite dans Balsamo et al. 2007). La comparaison des deux méthodes « offline » (*OI* et *SEKF*) a été ensuite étudiée par Mahfouf et al. (2009) qui ont confirmé l'applicabilité de l'EKF « offline ».

A Météo-France, une comparaison entre l'eau du sol simulée par différents modèles et systèmes d'assimilation de surface et par la télédétection (dans le cadre du SAF « hydrologie » d'EUMETSAT) a été mise en place et repose sur les données d'eau du sol du réseau ISMN. Ce travail a permis de qualifier l'eau du sol produite opérationnellement dans le modèle du CEPMMT (avec la méthode « OI ») et avec le filtre de Kalman Etendu (EKF) par rapport au système SAFRAN-ISBA-MODCOU (Habets et al. 2008) qui est utilisé pour la

prévision des débits de rivières à Météo-France. J'ai contribué à ce travail dans la discussion et l'interprétation des résultats (Albergel et al. 2012).

Albergel et al. (2010) ont vérifié la performance de l'analyse de l'eau du sol rétrospectivement et ont montré les progrès dans la simulations, contrastant avec les résultats obtenus précédemment par Drusch et Viterbo (2007), qui indiquaient la difficulté de l'analyse de surface de minimiser les erreurs atmosphériques tout en préservant la cohérence de l'hydrologie de surface. Dans cette étude, l'analyse de l'eau du sol obtenue à partir d'observations (du réseau synoptique ou satellitaires) fournit des valeurs en meilleur accord avec des observations indépendantes d'eau du sol.

Apports des expériences d'assimilation utilisant des données simulées

Les contraintes pour l'assimilation de données en prévision numérique du temps sont imposées par la disponibilité des observations en temps quasi-réel, des infrastructures adaptées au traitement des données, la flexibilité des méthodes d'assimilation utilisées, et la qualité des modèles (paramétrisations physiques et opérateurs d'observation pour simuler les variables observées à partir des variables simulées). Il faut ajouter à cela des arguments d'ordre logistique, comme les ressources humaines ou les moyens de calcul.

Il est souvent difficile de guider les priorités en assimilation de manière objective, sauf dans des situations idéalisées.

Un type d'expériences préparatoires à l'assimilation de données : les OSSE (de l'anglais « Observing System Simulation Experiment ») sont utiles pour évaluer l'apport d'un nouveau type d'observation. Elles consistent à assimiler des données synthétiques produites par exemple en utilisant les résultats de simulations numériques auxquelles sont appliquées les opérateurs d'observation.

J'ai développé lors de mon séjour à Environnement Canada (Balsamo et al., 2006) un simulateur du radiomètre en bande L de la mission HYDROS (redéfinie récemment comme la mission SMAP, Figure 29) que la NASA a prévu de lancer en 2015, et qui devrait contribuer au suivi de l'eau du sol superficiel à l'échelle globale et à des résolutions fines (de 1 à 10 km) grâce à la synergie entre un radar et un radiomètre.

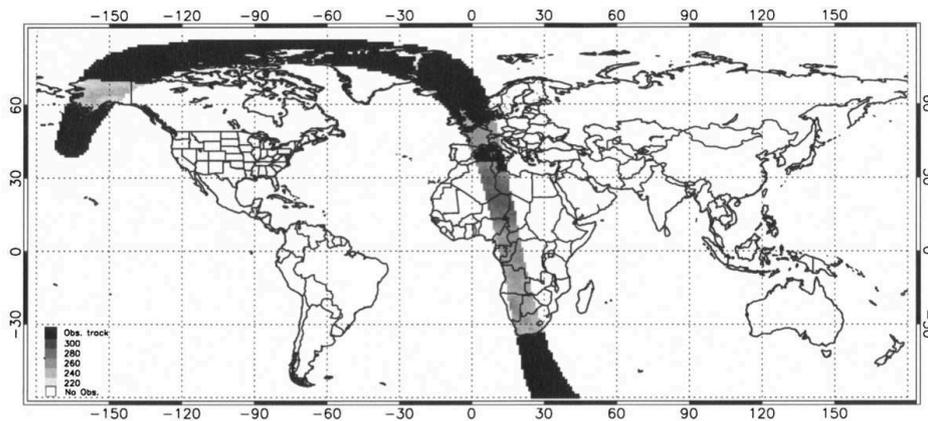


Figure 29 : Simulation du passage du satellite Hydros (SMAP) : La température de brillance T_b est obtenue par des simulations du schéma de surface ISBA (Noilhan and Mahfouf, 1996) dans le cadre du projet GSWP-2, couplées avec un modèle de transfert radiatif (LSMEM, Drusch et al. 2001).

J'ai ensuite développé (Balsamo et al. 2007 présenté en annexe) une « OSSE » dans un contexte réaliste, avec des distributions d'observations réelles fournies par les réseaux SYNOP et METAR en surface, et des observations satellitaires spécifiées selon l'orbite et la fauchée de chaque satellite. J'ai ensuite étudié le contenu en information de chaque type d'observation sur les variables dans le sol pour l'analyse.

Une approche couplée (Balsamo et al. 2004) et une approche forcée à un niveau situé dans la couche limite de surface (environ 50 m au dessus du sol), ont été comparées favorablement (Figure 30) pour l'estimation de la matrice de gain en différences finies.

Si l'équation d'analyse est combinée avec la théorie du contenu en information il est possible de produire une estimation de l'impact qu'une observation (ou d'un type d'observations) aura sur l'analyse de la variable de contrôle, en calculant sa contribution à la réduction de variance d'erreur de l'ébauche, selon les diagnostics proposés par Cardinali et al. (2004).

$$IC = \text{Tr}(\mathbf{HK})$$

Les résultats obtenus ont confirmé le fort contenu en information des données micro-ondes en bande L (Figure 31), mais aussi l'intérêt des données SYNOP et METAR (considérées avec une fréquence horaire).

J'ai réalisé ces travaux avec la première version du système d'assimilation d'eau et de température dans le sol développée au Service Météorologique Canadien en 2005 afin de comparer, pour la première fois, l'apport respectif des observations in-situ et satellitaires (infra-rouge et micro-ondes) à l'analyse de l'eau du sol.

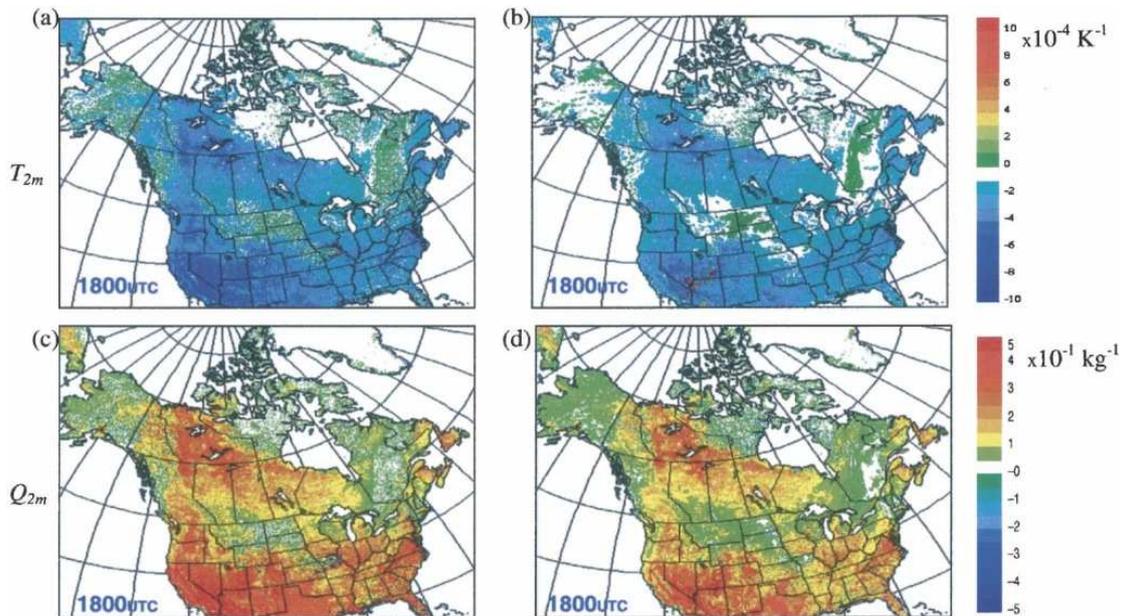


Figure 30 : Eléments de la matrice de gain K de la fonction d'analyse pour l'eau du sol dans l'assimilation de la température (a,b) et l'humidité à 2m (c,d). Les éléments sont obtenus en mode couplé (a,c), ou en mode forcé ou « offline » (b,d), (où le coût numérique est réduit d'un facteur 100).

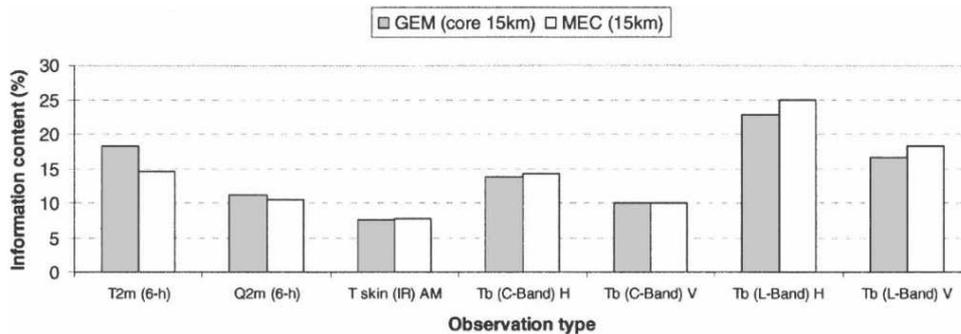


Figure 31 : Contenu en information (IC) provenant des différents types d'observations en mode couplé (en gris) en mode forcé (en blanc). Les plateformes considérées sont les satellites polaires en bande C (AMSR-E) et bande L (SMOS ou SMAP), les satellites géostationnaires GOES dans l'infrarouge et les données des réseaux SYNOP et METAR.

Ce travail a un intérêt scientifique particulier dans la mesure où il a permis de valider de façon expérimentale la validité de l'approche « offline » pour l'assimilation des données de surface. Mahfouf et al. (2009) ont confirmé la faisabilité de l'assimilation « offline » des données de température et humidité près de la surface, pourvu que le niveau du forçage atmosphérique soit situé dans la couche limite de surface.

Projets d'intercomparaison des méthodes d'assimilation

Les méthodes d'assimilation pour les surfaces continentales sont difficilement

comparables parce que l'infrastructure liée à l'archivage et au traitement des données est difficilement exportable et limite fortement les possibilités pour standardiser leur évaluation. De plus, un système d'assimilation est souvent construit autour du modèle et n'est pas nécessairement facilement transposable à un autre modèle. Dans le cas où plusieurs systèmes d'assimilation d'un même niveau de complexité sont disponibles dans le même centre de recherche, il reste souvent difficile de mettre en place une comparaison totalement objective car la méthode que l'on souhaite valider (et proposer) est généralement aussi celle où les développements sont les plus importants.

Une méthodologie pour comparer plusieurs systèmes d'assimilation a été proposée dans le cadre du projet européen ELDAS auquel j'ai participé. Cette méthode a consisté à comparer les sorties des analyses sur des sites de mesures communs. Cela a permis de comparer la qualité des systèmes d'analyse même si la séparation des contributions des modèles et de celles des méthodes d'assimilation reste difficile.

Jacobs et al. (2008) ont documenté les résultats des différents systèmes d'assimilation dans le projet ELDAS. Je me suis impliqué dans les travaux du projet Européen ELDAS en qualité de post-doctorant à Météo-France en 2004. J'ai ainsi adapté la méthode « 2D-Var simplifié » du modèle à aire limitée ALADIN au modèle global ARPEGE me permettant d'évaluer cette méthode sur un large domaine spatial. Pendant la préparation de la publication, j'ai interagi avec le Dr. Cor Jacobs (U. Wageningen, des Pays-Bas) pour produire les résultats nécessaires à une évaluation des méthodes LDAS.

Avec un protocole expérimental commun, consistant à choisir le domaine d'évaluation, la période considérée, et les variables d'intérêt dont on dispose ainsi que des observations de stations in-situ, ce type de projet avec des institutions ayant déjà un système LDAS serait assez facilement réalisable. Si on envisageait une suite au projet ELDAS, l'évaluation de l'apport de l'assimilation, pourrait être examinée avec une expérience de type « Open-Loop » (où les observations ne seraient pas assimilées dans le LDAS) pour chaque système participant. Ceci pourrait permettre de calculer la valeur ajoutée sous forme de performance contre des stations in-situ, et pour chaque système séparément. Le projet PILDAS (Project of Intercomparison of Land Data Assimilation Systems) proposé par les Dr. Rolf Reichle et Jean-François Mahfouf souhaite répondre aux questions concernant les choix de la méthode d'assimilation et des schémas de surface dans un cadre d'OSSE (observations parfaites).

L'apport de l'assimilation pour le réglage et l'initialisation des modèles

Les modèles utilisés pour la prévision numérique du temps à l'échelle globale contiennent de nombreux paramètres qui ne peuvent pas tous être mesurés à

part sur des courtes périodes et sur des sites bien instrumentés (donc essentiellement à l'échelle locale). De plus, ces paramètres ne sont pas nécessairement compatibles avec l'échelle de la maille d'un modèle.

Un exemple de ces paramètres est la profondeur des lacs nécessaire pour reproduire la dynamique des processus physiques, mais malheureusement non observée à l'échelle globale.

La profondeur des lacs

La profondeur des lacs est mesurée localement par des méthodes traditionnelles de sondage ou à l'aide des sonars, mais est le plus souvent basée sur des estimations de débits et du niveau hydrique à l'échelle du lac qui donnent les profondeurs moyenne et maximale. Des efforts existent actuellement au sein des consortiums météorologiques Européens (EUMETNET/SRNWP) pour la création d'une base de données globale qui permettra à l'avenir de spécifier la profondeur des principaux lacs de façon moins empirique.

En effet, des différences entre la profondeur moyenne et la bathymétrie réelle des lacs pourraient introduire des erreurs dans les simulations des températures superficielles des lacs et la durée du gel de surface.

J'ai ainsi conduit une étude en vue d'estimer la profondeur de plusieurs lacs à partir du cycle annuel de leurs températures de surface issues d'observations satellitaires. L'intérêt de cette méthode d'inversion et ses limites, qui ne constitue pas une alternative aux efforts dédiés à la consolidation des bases des données ou à l'amélioration des modèles de lacs, sont discutés dans Balsamo et al. (2010).

Ce travail représente un premier essai d'application d'une technique d'inversion basée sur un modèle physique, dans le but d'obtenir une bathymétrie des lacs à l'échelle globale en utilisant des données de télédétection.

L'approche utilisée est inspirée de l'estimation optimale et a demandé la mise en place du modèle de lacs (FLAKE, Mironov et al. 2010) forcé par des données de la ré-analyse ERA-Interim sur plusieurs lacs en utilisant les données de température superficielle du radiomètre MODIS. La profondeur du lac est obtenue par une approche variationnelle minimisant une fonction coût, et correspond à la valeur permettant la meilleure correspondance avec les observations de température de surface (Figure 32).

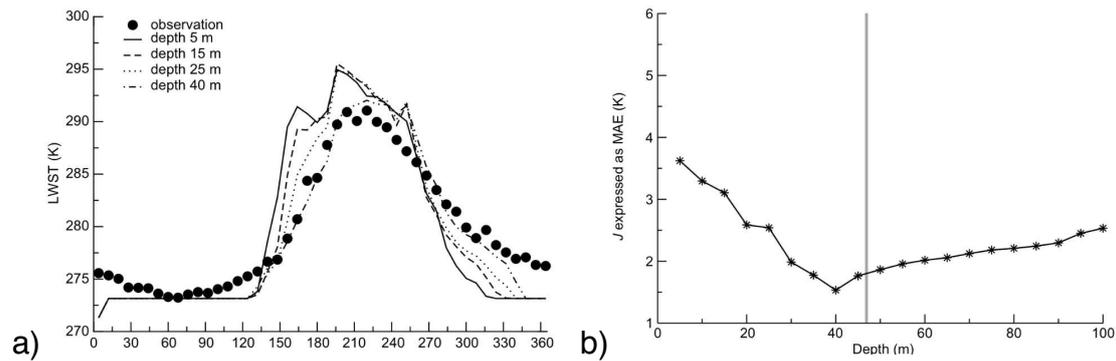


Figure 32 : Exemple de fonctionnement de la méthode d'inversion pour l'estimation de la profondeur du lac. L'écart entre la simulation forcée et les observations de température superficielle (fournies par MODIS) (a) est utilisée pour l'estimation d'une profondeur optimale (b) extrait de Balsamo et al. (2010).

Dans cette approche, les défis rencontrés liés aux erreurs des modèles et aux difficultés des radiances satellitaires à fournir une information utile au voisinage des côtes de formes complexes sont discutés.

Cependant la définition d'une profondeur ou d'une bathymétrie des lacs reste un problème ouvert pour pouvoir les introduire dans les modèles de prévision du temps et la méthode proposée pourrait être appliquée à des modèles plus détaillés (ex. considérant une discrétisation verticale plus fine de la couche de mélange) ou à des observations de meilleure qualité.

Cette approche originale, exploitant les techniques de l'assimilation de données pour le réglage de paramètres, est extrêmement prometteuse pour la recherche en modélisation dans les prochaines années.

Chapitre 4 : Défis des moyennes et longues échéances pour le suivi de l'état de la surface et la prévision du temps

Les longues échéances de temps proprement liées au climat constituent un défi pour les modèles de prévision du temps en vue de leur extension à des modèles du système Terre. Deux les axes de développement y sont rattachés : la reconstruction du temps passé et la recherche en prévisibilité aux échelles du mois aux décades.

L'étude de la prévisibilité liée aux surfaces continentales est intrinsèquement dépendante de la disponibilité d'analyses fiables de périodes passées.

Dans mes actions de recherche je me suis impliqué dans la partie surface des ré-analyses pour qualifier le fiabilité du forçage météorologique d'ERA-Interim (Dee et al. 2011, Balsamo et al. 2010, Szczypta et al. 2011) et apporter un soutien aux expériences de prévisibilité effectuées au sein du CEPMMT (Weisheimer et al. 2011) et dans un contexte d projets internationaux (Koster et al. 2009, 2010, van den Hurk et al. 2012).

Les travaux de modélisation sur l'hydrologie du sol et de la neige m'ont permis d'identifier les variables les plus pertinentes pour la prévisibilité atmosphérique (e.g. l'humidité du sol et la densité et la masse de neige).

Pour examiner la dépendance de la prévisibilité des variables atmosphériques aux variables de surface, le choix des protocoles expérimentaux (sélection des cas d'études) et la robustesse des statistiques réalisées (plusieurs réalisations indépendantes) sont déterminantes pour la fiabilité des résultats de simulations numériques.

La stratégie de recherche mise en place au CEPMMT repose sur l'expérience acquise dans les projets d'intercomparaison de modèles. L'originalité de l'approche consiste à isoler un phénomène physique de la surface dont la mémoire (définie comme l'autocorrélation d'un champ dans le temps) dans les modèles est suffisamment bien représentée, et comparable à celle observée. Si l'on considère l'eau du sol, le protocole consiste à effectuer des prévisions d'ensemble dans un cas « optimal », où l'eau du sol provient de simulations forcées, et dans un cas « dégradé », où l'eau du sol est bruitée aléatoirement, pour ensuite calculer le gain en prévisibilité entre les deux cas.

Les résultats les plus convaincants sont souvent obtenus dans le cadre d'expériences internationales de type « multi-modèles ». Pour cela, j'ai réalisé le travail nécessaire pour participer aux expériences proposées par Dr. Randal Koster, et qui ont inspiré plusieurs études sur la prévisibilité liée à l'eau du sol. Le CEPMMT n'avait pas participé aux premières initiatives à cause d'un manque de ressources à l'époque.

Le protocole mis au point pendant ces travaux a permis l'extension à l'étude de la prévisibilité liée à la neige et sera prochainement appliqué à l'état de la

végétation dans le cadre du projet Européen SPECS (« Seasonal-to-decadal climate Prediction for the improvement of European Climate Services »).

L'originalité de l'approche proposée consiste à isoler la prévisibilité provenant de l'anomalie initiale (prévisibilité conditionnelle), permettant d'identifier des conditions plus prévisibles, ce qui est particulièrement intéressant en Europe caractérisée par une prévisibilité moyenne assez faible aux longues échéances de prévision.

L'état actuel de la modélisation et de l'assimilation et les priorités à moyen terme

L'évolution de la modélisation et de l'assimilation pour les surfaces continentales en prévision numérique du temps a été discutée à l'issue de l'atelier international organisé par le CEPMMT en collaboration avec GLASS (Global Land Atmosphere System Study). Les résultats principaux de cet atelier ont été résumés dans un article d'une « Newsletter » officielle du CEPMMT par Beljaars et al. (2010). Ce court article montre mon implication dans l'animation de la recherche en modélisation de surface au sein du CEPMMT et dans le cadre d'un projet international. J'ai contribué à l'ensemble des phases de l'organisation de cet atelier. Tous les cosignataires ont joué un rôle fondamental dans la réussite de cet atelier qui a fourni d'importantes recommandations sur les directions à prendre pour la recherche dans le laboratoire.

Deux autres articles récemment parus dans une « Newsletter » officielle du CEPMMT donnent des informations sur les derniers développements relatifs aux surfaces continentales dans l'établissement.

Balsamo et al. (2011) et de Rosnay et al. (2011) ont résumé l'état actuel des développements sur les surfaces continentales. Ces articles ont pour but d'informer les états membres et les lecteurs habituels de la « Newsletter » du CEPMMT. Le langage utilisé et l'absence de formules mathématiques sophistiquées ont été motivés par l'exigence de communiquer les développements à une communauté de non spécialistes.

Ces deux articles constituent aussi un point de départ intéressant pour définir le contexte des développements du laboratoire concernant les surfaces continentales et proposer en fin de ce chapitre une prospective sur les activités futures à envisager.

L'importance des ré-analyses pour les développements de la surface

L'étude du climat de notre planète se fait par le biais d'analyses statistiques des observations météorologiques telles que la température, le vent et la pluie. L'information climatologique est souvent présentée sous la forme de moyennes sur de longues périodes: l'examen de séquences d'observations permet alors de trouver des preuves du réchauffement global, de

l'augmentation de la fréquence des violentes tempêtes, etc.

La méthode des ré-analyses utilise les moyens et les techniques de la prévision numérique du temps opérationnelle. Les ré-analyses constituent un apport clé aux démarches climatologiques classiques permettant d'intégrer simultanément des observations de natures très diverses grâce au modèle numérique et à la connaissance des erreurs des prévisions et des observations. La première ré-analyse, lancée aux Etats-Unis, au laboratoire des NCEP (Centres nationaux de prévision environnementale), couvre la période allant de 1948 jusqu'au présent (en temps légèrement différé).

Les ré-analyses conduites par le CEPMMT avec le soutien des services météorologiques nationaux européens et celui du programmes-cadre de la Commission européenne, ont permis de disposer de produits d'une richesse et d'une qualité sans précédents.

Les ré-analyses ERA-15 (1979-1993), ERA-40 (1957-2002) et ERA-Interim (1979- jusqu'au présent) ont ainsi été créées. Le Japon avec JRA-25 a traité la période allant de 1979 à 2004 récemment étendue jusqu'au présent. Un accès libre aux produits des ré analyses a permis aux utilisateurs du monde entier de profiter des résultats d'un traitement centralisé spécialisé et très évolué d'observations faites sur toute la planète.

La qualité accrue des produits de ré-analyses est le résultat des améliorations du modèle, des observations et des algorithmes d'analyse utilisés. Les produits d'ERA-40 ont montré leur utilité dans les milieux scientifiques du monde entier, avec plus de 2600 citations. Une nouvelle publication, dont je suis un des co-auteurs, qui documente les travaux d'ERA-Interim et présente des résultats de validation est parue récemment (Dee et al., 2011). Cette ré-analyse inclus un certain nombre de mes développements sur les surfaces continentales introduits dans le modèle du CEPMMT.

Qualité du forçage météorologique

J'ai participé à deux travaux indépendants visant à évaluer la qualité du forçage d'ERA-Interim et son application aux surfaces continentales. J'ai également proposé une méthode originale pour corriger l'impact du biais des précipitations qui utilise les données du « Global Precipitation Climatology Project » (GPCP) à faible résolution pour calculer un facteur de correction, tout en gardant la plus haute résolution des produits d'ERA-Interim.

G. Balsamo et al. (2010) et Szczypta et al. (2011) ont documenté la qualité du forçage des précipitations et du rayonnement solaire de la ré-analyse ERA-Interim avec divers jeux de données disponibles à l'échelle nationale (France, Etats Unis).

Ces deux travaux liés à la ré-analyse ERA-Interim ont été effectués dans le cadre du projet européen GEOLAND2 où j'ai contribué à coordonner l'activité en proposant aux partenaires d'utiliser un forçage commun (que j'ai extrait de la ré-analyse ERA-Interim) pour l'évaluation des modèles de surface. La

comparaison des forçages atmosphériques, telle que les précipitations, a été une extension des études visant à quantifier la composante la plus importante du forçage sur la qualité des simulations. C'est dans ce cadre que j'ai mis en œuvre une méthode originale de correction de biais des précipitations (Balsamo et al. 2010). La méthode utilise une procédure sélective des échelles spatiales permettant de corriger les champs de précipitations d'ERA-Interim sans supprimer les structures à petite échelle (par exemple liée à l'augmentation des précipitations orographiques).

L'information des cumuls mensuels des précipitations provenant de GPCP v2.1 est en effet disponible à une faible résolution spatiale de 2,5 degrés. Les précipitations d'ERA-Interim, disponibles à une résolution de 0.7 degrés, sont cumulées et agrégées à la même résolution de GPCP permettant d'évaluer les erreurs de « grande échelle » et de calculer un facteur de correction.

Les précipitations tri-horaires au point de grille sont corrigées en appliquant un facteur multiplicatif ré-interpolé à la résolution d'ERA-Interim, afin de retrouver les cumuls mensuels fournis par les données GPCP.

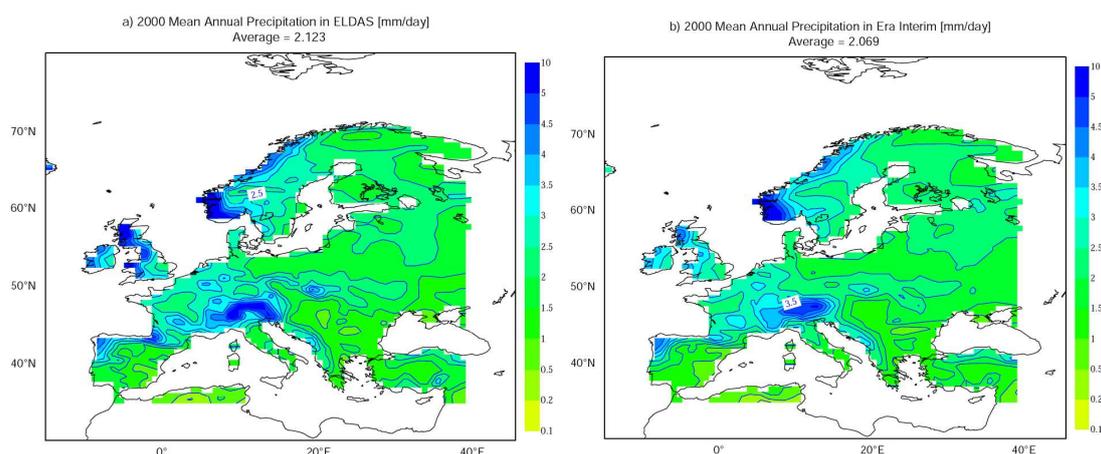


Figure 33 : Précipitations annuelles en 2000 issues du projet ELDAS (22000 pluviomètres, à gauche) et produites par ERA-Interim (à droite) d'après Balsamo et al. (2012).

Une vérification en Europe et aux Etats-Unis montre une réduction des erreurs par comparaison à des observations pluviométriques à haute densité (issues du projet ELDAS sur la Figure 33).

ERA-Interim/Land

Ensuite, afin de disposer de longues séries temporelles (pour permettre l'établissement de statistiques robustes) le lien avec les ré-analyses atmosphériques est exploité pour pouvoir produire des conditions initiales de surface avec la dernière version du schéma HTESSEL (Balsamo et al. 2011).

Le forçage météorologique d'ERA-Interim, avec une correction pour le biais de précipitation utilisant la base de données GPCP (v2.1) et la dernière

version du schéma HTESSSEL constituent le produit « ERA-Interim/Land » (Balsamo et al. 2012) utilisé opérationnellement pour l'initialisation des systèmes pour la prévision mensuelle (Vitar et al. 2008) et saisonnière (Molteni et al. 2011) du CEPMMT entre 1979 et 2010.

La disponibilité de champs de surface homogènes dans le temps (en particulier pour ce qui concerne le cycle de l'eau et les flux en surface) présente un intérêt pour toutes les applications visant à la prévision d'anomalies et à la caractérisation d'extrêmes climatiques (e.g. de température et précipitations) induites par les processus plutôt que par les changements apportés au système de prévision, ou provenant des erreurs systématiques dans les modèles.

Prochainement cette nouvelle base de données fera aussi l'objet d'une étude concernant les tendances à long terme de l'eau du sol.

L'initiative européenne du “Global Land Monitoring Core Service”

Le suivi des surfaces continentales est au cœur des activités du programme Européen GMES (« Global Monitoring for Environment and Security ») qui vise à établir un suivi opérationnel de l'état des surfaces à l'échelle planétaire.

Ce programme a pour but de fournir des éléments objectifs pour aider aux prises de décisions dans le cadre des directives générales de la Communauté Européenne.

Un groupe de travail auquel j'ai participé en qualité d'expert invité a été mis en place pour effectuer un sondage des compétences et des excellences dans le suivi opérationnel de l'état des surfaces.

Le groupe a identifié les champs de surface d'intérêt essentiel pour le suivi des surfaces continentales dans les ECVs (« Essential Climate Variables »).

Les experts des consortia GCOS (Global Climate Observing System) de l'Organisation Mondiale pour la Météorologie (OMM) et GTOS (Global Terrestrial Observing System) du FAO (« Food and Agriculture Organisation ») ainsi que ceux des centres de production opérationnels météorologiques et environnementaux ont été consultés.

Les perspectives opérationnelles pour le suivi des surfaces continentales laissent donc bien espérer des développements scientifiques en ce domaine pour une utilisation efficace de ces avancements par la société civile.

Pendant la période 2008-2010, ma contribution aux travaux du « GMES-Bureau » s'est traduite par une participation à un groupe de travail établi pour fournir du support scientifique au groupe d'implémentation du GLMCS (Global Land Monitoring Core Service) en tant que consultant externe (utilisateur scientifique). Les travaux du groupe ont conduit à l'élaboration d'un dossier contenant une revue des produits et des institutions capables de contribuer au suivi global avec une qualité assurée.

Un atelier a été organisé en 2009 à Stresa où une cinquantaine de spécialistes (provenant de ESA, EUMETSAT, CEPMMT et autres institutions) ont défini les critères nécessaires et les variables d'intérêt pour le suivi global des surfaces terrestres. La Communauté Européenne examine à présent la possibilité de fournir un support opérationnel aux institutions pour le suivi de l'état de la planète et ainsi apporter une aide aux décideurs.

Prévisibilité liée aux surfaces continentales

La prévisibilité aux longues échéances (au delà d'un mois) implique un rôle dominant de l'océan (Doblas-Reyes et al. 2011) par la température de surface surtout dans les tropiques (avec l'oscillation ENSO) et les anomalies de la couverture de glace marine dans les régions extratropicales.

Ferranti et Viterbo (2006) ont montré que pour l'épisode de canicule en Europe pendant l'été 2003 les anomalies de la température de surface marine ne peuvent pas reproduire les anomalies en température des surfaces continentales. Weisheimer et al. (2011) ont démontré que les améliorations dans la physique du modèle du CEPMMT (convection et schéma HTESSEL en particulier) étaient parmi les composantes clés pour obtenir une prévision saisonnière de l'évènement.

La couverture de neige (Cohen et Entekhabi, 1999, Orsolini, et Kvamstø, 2009, Peings et al. 2011) représente également une composante importante du système Terre pour la prévisibilité à long terme.

Mes actions de recherche en prévisibilité se sont aussi concentrées sur l'eau du sol et la couverture de neige.

Lien entre précipitations et eau du sol dans la mousson Africaine

La prévisibilité des précipitations associées à la mousson Africaine a été un des thèmes majeurs des travaux de recherches autour de la campagne internationale de mesures AMMA. Utilisant les résultats de simulations de surface obtenues en mode forcé avec deux jeux de données de précipitations, j'ai conçu une expérience de sensibilité à la condition initiale de l'eau du sol avec le modèle du CEPMMT sur l'Ouest du continent Africain en été, que j'ai en suite réalisée en collaboration avec le Dr. Anna Agustí-Panareda et le Dr. Anton Beljaars. Cela a permis d'étendre l'étude de Beljaars et al. (1996), où l'eau du sol avait été identifiée comme un facteur déterminant dans la prévision des précipitations continentales estivales au centre des Etats-Unis.

Le papier d'Agustí-Panareda et al. (2009, GRL) explore l'impact de l'eau du sol sur les précipitations pendant la mousson Africaine. Ce travail à l'aide du modèle de prévision numérique du temps du CEPMMT examine les liens entre l'eau du sol et la précipitation prévue sur l'ouest de l'Afrique dans le cadre de la campagne AMMA.

Les expériences réalisées s'appuient sur mes travaux dans le cadre du projet

ALMIP, d'où ma contribution directe. Dans cette zone géographique, l'eau du sol semble jouer un rôle important comme démontré par différentes analyses de jeux d'observations (Taylor et al. 2011). Malgré nos attentes initiales ce travail a montré que l'impact de l'eau du sol n'est pas dominant dans le déclenchement de la convection, probablement dû aussi aux difficultés du modèle de prévision à reproduire les aspects dynamiques de la mousson. Cet article discute les difficultés de la prévision des précipitations de la mousson et montre toutefois un signal encourageant mais très faible provenant d'une eau du sol de meilleure qualité.

Les projets GLACE et GLACE2

Les projets GLACE et GLACE2 (« Global Land Atmosphere Coupling Experiment ») ont fait appel à plusieurs centres de recherche pour réaliser des expériences multi-modèles avec une base commune (pour ce qui concerne les configurations des expériences et les conditions aux limites). Le système de prévision du CEPMMT le mieux adapté à cette étude est le système de prévisions mensuelles (« monthly forecasting system ») qui s'appuie sur la prévision d'ensemble du CEPMMT pour générer différentes réalisations.

Vitart et al. (2008) ont documenté les efforts de recherche pour établir un système de prévision mensuelle au CEPMMT, connecté au système de prévision d'ensemble. Ce système est devenu opérationnel en Janvier 2008.

J'ai contribué à ce travail au CEPMMT en implémentant, en collaboration avec le Dr. Frédéric Vitart, un schéma d'évolution de la température de la surface océanique basé sur la tendance climatologique journalière estimée à partir de la ré-analyse (ERA-Interim). Ce travail a permis d'établir d'excellentes collaborations qui ont favorisé la suite des activités du CEPMMT dans les projets GLACE2.

La première initiative GLACE (à laquelle le CEPMMT n'avait pas participé), avait conduit à d'importantes discussions scientifiques sur le rôle des surfaces continentales dans la prévision long terme, suite à un article paru dans la revue *Science* par le Dr. Randall Koster et les collègues GLACE.

Les résultats principaux de ce projet concernaient la prévisibilité de la température à 2 mètres (T2m) et des précipitations (P) exprimées sous forme de prévisions d'anomalies par rapport au climat mensuel moyen (Koster et al. 2004).

Une faiblesse de l'étude était l'impossibilité de quantifier le degré de prévisibilité (la période étant trop courte pour avoir des résultats statistiquement significatifs), donc les modèles participants n'avaient pas pu extraire des informations concluantes sur la capacité prévisionnelle.

Le projet GLACE2 auquel j'ai participé a été conçu dans le but de quantifier le gain en prévisibilité (des anomalies de T2m et P), si une condition initiale de meilleure qualité était disponible pour décrire l'état de la surface (en particulier pour l'eau du sol).

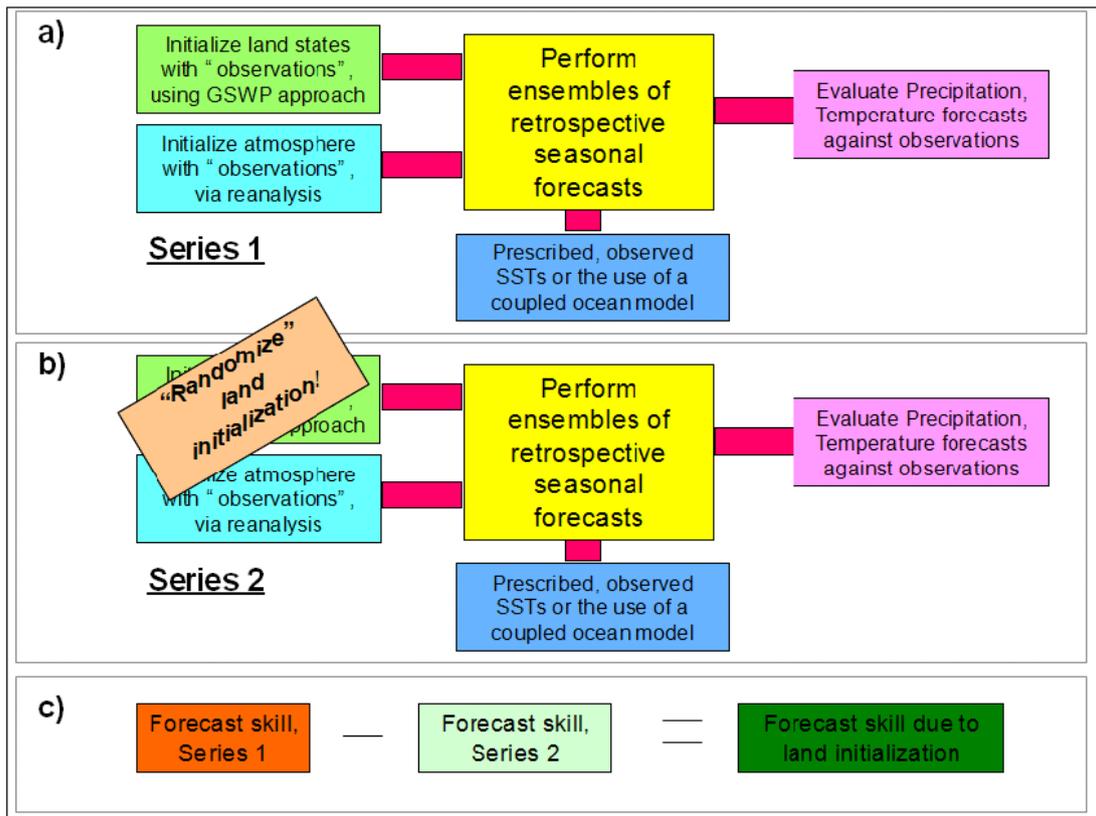


Figure 34 : Illustration du protocole GLACE2 pour l'étude de l'impact de l'initialisation des surfaces continentales dans la prévision long-terme (jusqu'à 2-mois d'échéance) : a) Série 1, b) Série 2 et, c) calcul du gain en prévisibilité.

Le fonctionnement du protocole expérimental est schématisé sur la Figure 34. Les bases de données utilisées pour évaluer la performance des modèles dans la prévision des températures à 2m et des précipitations journalières sont décrites dans Caesar et al. (2006) et Higgins et al. (2000), respectivement. Pour l'Europe, la base de données de Haylock et al. (2008) est utilisée.

Trois publications parues récemment et focalisées respectivement sur les Etats-Unis, l'Europe et le globe, sont référencées par la suite.

Koster et al. (2009, GRL, en annexe), van den Hurk et al. (2012), Koster et al. (2010) ont montré la valeur ajoutée provenant d'initialisations réalistes de la surface en terme de prévisibilité de la température à 2m et des précipitations sur les Etats Unis (Figure 35) et l'Europe (Figure 36) aux échéances allant de 16 à 60 jours.

Il est intéressant de noter que, pour la température à 2m en Europe, le gain en prévisibilité provenant d'une meilleure initialisation de l'eau du sol, soit significatif bien au delà des échéances typiquement considérées en prévision numérique du temps, même s'il est inférieur aux valeurs obtenues aux Etats-Unis.

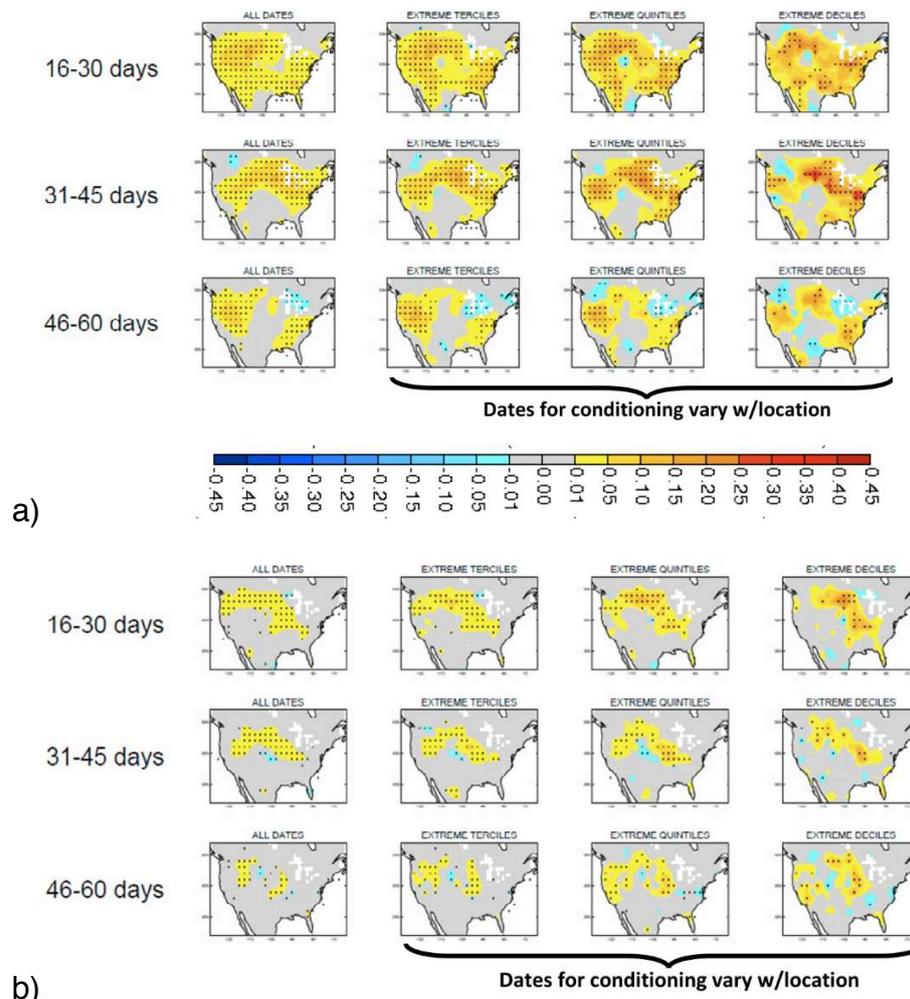


Figure 35 : Gain en prévisibilité (mesuré en r^2) pour (a) la température à 2 mètres et (b) les précipitations suite à une initialisation de l'eau du sol réaliste (définie selon le protocole GLACE2 proposé par Koster et al. (2009). Les quatre colonnes reportent les résultats pour (i) toutes les dates, (ii) date dans les terciles extrêmes, (iii) dates dans les quintiles extrêmes (iv) dates dans les déciles extrêmes, sélectionnées en fonction de la distribution d'eau du sol à l'état initial.

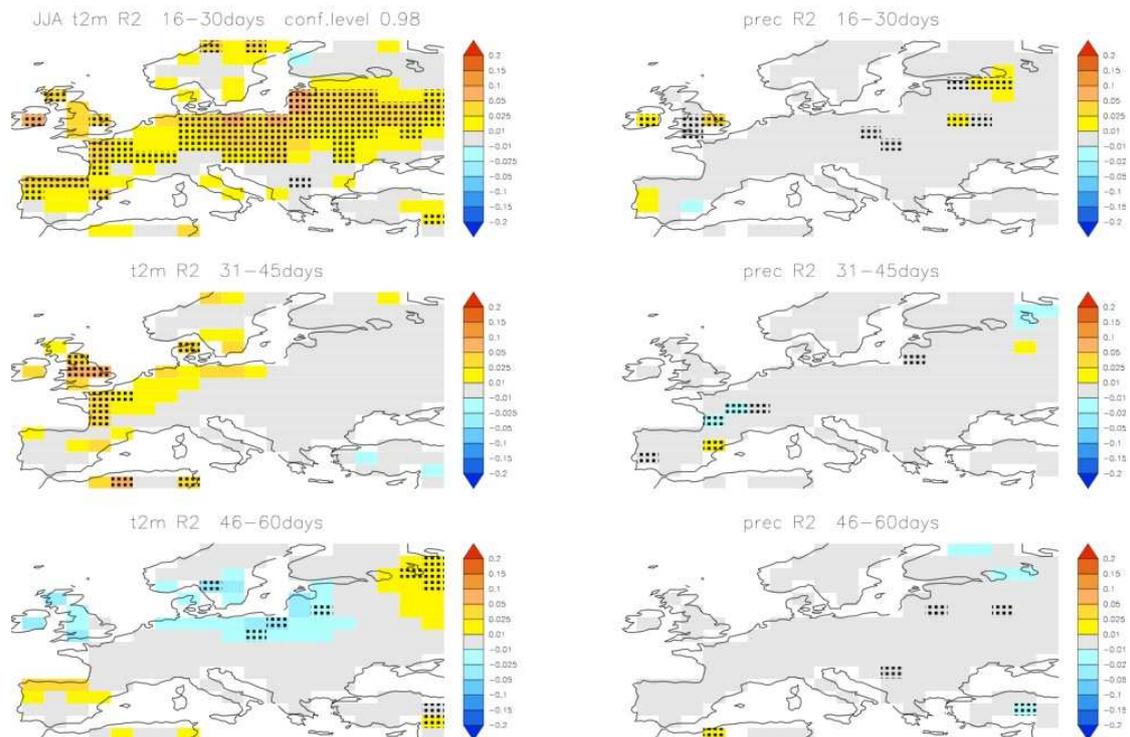


Figure 36 : Gain en prévisibilité (mesuré en R^2) pour l'Europe et la température à 2 mètres (à gauche) et les précipitations (à droite) extraits de van den Hurk et al., (2012). Chaque ligne représente le gain en prévisibilité pour différentes échéances : (i) 16-30 jours, (ii) 31-45 jours (iii) 46-60 jours de prévision.

Ces trois travaux constituent une tentative pour quantifier statistiquement la prévisibilité liée à l'eau du sol aux échéances de prévisions comprises entre 2 et 8 semaines, et mettre en évidence les différences entre la prévisibilité des longues échéances en Europe et aux Etats-Unis. J'ai contribué à ces projets dans la préparation des expériences au CEPMMT, que j'ai ensuite réalisées et dont j'ai assuré le suivi.

Prévisibilité liée aux autres composantes de la surface

Comme démontré pour l'eau du sol, il semble raisonnable que de fortes anomalies présentes dans d'autres réservoirs de la planète ayant une évolution lente par rapport à la variabilité des phénomènes météorologiques puissent jouer un rôle sur la prévision du temps. Ceci est lié à l'effet « mémoire » que les surfaces continentales peuvent jouer dans la prévision du temps aux moyennes et longues échéances.

Par exemple, la neige couvre une fraction assez large de l'hémisphère nord en hiver. La représentation de la neige est très importante pour pouvoir décrire le degré de découplage entre la surface, en particulier le sol, et l'atmosphère.

En hiver, le gel de l'eau du sol retarde les processus thermodynamiques de

refroidissement de surface. La neige, avec son fort pouvoir isolant, inhibe ce processus et permet à l'air de se refroidir plus rapidement.

Le refroidissement radiatif nocturne en présence de neige est donc beaucoup plus efficace (car appliqué quasi uniquement pour refroidir la couche de neige).

En présence d'un grand cumul de neige, sa densité est une variable ayant une évolution lente qui dépend de l'historique du manteau de neige et peu jouer un rôle dans la prévision à longue échéance (effet mémoire).

Il est donc très plausible de faire l'hypothèse que la neige joue un rôle clé pour la prévision globale du temps à toutes les échéances. Plusieurs études (Cohen et Entekhabi, 1999, Orsolini, et Kvamstø, 2009, Peings et al. 2011) ont déjà montré une telle sensibilité, mais la quantification de la prévisibilité associée à la neige reste un défi pour la communauté scientifique.

Le succès des projets GLACE et GLACE2 a amené à en proposer de nouveaux dans lesquels je me suis investi, dont le projet « SNOWGLACE » conduit en collaboration avec le laboratoire NILU et inspiré du projet GLACE2 et avec une publication soumise (Orsolini et al. 2012). Ma contribution était dans la définition du protocole et dans la préparation des expériences.

Perspectives pour la recherche en surface

De façon générale, il est toujours assez difficile de prévoir les développements futurs de la recherche (en surface), car ils dépendent d'un ensemble de « conditions initiales » : la créativité des jeunes chercheurs, l'ouverture d'esprit des laboratoires d'accueil vis-à-vis des aspects interdisciplinaires liés à l'étude de la surface, la disponibilité des financements, et l'état de développement des sociétés sont tous des éléments fondamentaux pour stimuler les avancements mais leur « combinaison optimale » n'est pas un objectif facile à atteindre ni à maintenir dans le temps.

L'étude des écosystèmes terrestres va sans doute devenir une priorité dans la recherche scientifique ainsi que son suivi opérationnel car le développement durable des sociétés en dépend fortement de même que les économies de plusieurs pays.

Les énergies solaire, hydraulique et éolienne vont recevoir beaucoup d'attention car il s'agit de sources renouvelables et déjà exploitées dans plusieurs pays. La biomasse, qui intègre énergie solaire et la disponibilité hydrique du sol, est aussi un élément important pour la production d'énergie (méthanol).

Donc en support au développement durable, la modélisation des cycles globaux de l'eau, d'énergie (rayonnement et quantité de mouvement), et de la biomasse en surface à des résolutions spatiales suffisamment élevées pour représenter les principaux processus physiques peut être identifiée comme une perspective plausible de la recherche en modélisation numérique du système Terre (Earth-System-Modelling).

L'agriculture et la biodiversité sont deux axes de développements de recherche qui reposent sur la qualité de la modélisation de la biosphère et car ils constituent les écosystèmes en interaction la plus directe avec la société.

L'homme même fait partie d'un écosystème (urbain pour la majorité) qui a été largement négligé dans les modèles globaux, car les zones urbanisées occupent une fraction minoritaire des surfaces continentales mais la modélisation à l'échelle globale devrait bientôt considérer les diverses modifications anthropiques affectant les cycles naturels, et pas seulement à l'échelle du climat (où l'effet serre est déjà pris en compte de façon simplifiée dans plusieurs modèles), mais à toutes les échelles spatio-temporelles.

D'un point de vue plus général, les systèmes d'assimilation vont fournir une énorme quantité d'informations intégrées qui vont renseigner sur la qualité des modèles. Une distinction entre les erreurs systématiques (ex. biais dans le cycle annuel, saisonnier ou journalier) qui devrait faire l'objet de travaux de modélisation (calibration, et développement de nouveaux schémas), et les erreurs aléatoires (liées aux limites de la prévisibilité) que les analyses quotidiennes devraient corriger, est importante pour exploiter le potentiel des systèmes modernes d'assimilation où des millions d'observations sont assimilées.

Du point de vue des observations, les satellites pour la surface (e.g. ceux des programmes ESA-Sentinel, et NASA-SMAP) vont continuer à fournir une couverture globale et continue dans le temps pour le suivi des stocks d'eau et d'énergie. Il est aussi probable que la cryosphère recevra beaucoup plus d'attention à cause des forts changements climatiques dans l'Arctique et aux hautes latitudes en général, et ainsi qu'aux importantes chutes de neiges aux moyennes latitudes qui ont caractérisées les hivers récents associés à des situations de blocage atmosphérique, dont la prévision à moyenne échéance reste un défi. La modélisation de la glace de mer, et de la neige sur les surfaces gelées va donc recevoir plus d'attention ainsi que l'assimilation des données satellitaires pour contraindre les erreurs de la modélisation.

La modélisation intégrée des processus de surface

Les modèles de surface vont évoluer en considérant les différentes composantes « sous-maille » et incluant le traitement des zones urbaines (e.g. Oleson et al. 2008) pour les processus de réchauffement liés aux canyons urbains, suite aux résultats des intercomparaisons entre les schémas urbains (Grimmond et al. 2010, 2011) qui ont confirmé la faisabilité des approches simplifiées, donc bien adaptées à la prévision numérique du temps. Ainsi il est envisageable qu'une meilleure discrétisation horizontale et verticale sera bénéfique pour l'interaction avec l'atmosphère et les couches profondes de sol. Les paramétrisations de la surface continentale vont évoluer vers des schémas plus complets où les processus bio-géo-chimiques de la végétation seront considérés et où les cycles du carbone, de l'eau et de l'énergie seront en interactions mutuelles. Un nouveau schéma de surface où

le nombre de niveaux verticaux dans la couche de neige et de sol est augmenté considérablement et les processus sous-maille sont « géo-référencés » (ou de « *nesting* ») seront développés au CEPMMT sous ma proposition pour pouvoir traiter différents types de surfaces (e.g. différents types de forêts et terrains agricoles, différents lacs avec leur profondeurs, différents zones urbaines, différents élévations pour les zones orographiques, etc.). L'avantage possible d'une telle approche par rapport au traitement du type dominant ou à l'approche des paramètres effectifs sera l'objet d'un sujet de recherche.

L'assimilation couplée surface-atmosphère

Les systèmes d'assimilation vont considérer le couplage entre les surfaces continentales, la surface des océans, et l'atmosphère. C'est un sujet de recherche au CEPMMT dû au fait que la séparation des échelles temporelles qui a déterminée le choix d'un traitement découplé n'est plus valable avec des schémas de surface visant à caractériser de nombreuses échelles temporelles (processus lents et processus rapides). Le couplage ne promet pas de se substituer aux LDAS (« Land Data Assimilation Systems ») mais permettra une meilleure analyse atmosphérique près de la surface (par exemple les radiances satellitaires sensibles à la surface), en autorisant des perturbations des variables à l'interface (comme la température de peau) pour une meilleure convergence de l'analyse atmosphérique près de la surface.

Au contraire les LDAS vont évoluer vers des SDAS (« Surface Data Assimilation Systems ») suite à l'introduction des schémas de couche limite océanique et des lacs en considérant aussi la présence de glace, qui nécessitent d'une initialisation propre.

Les méthodes d'assimilation adaptées aux systèmes non-linéaires et au réglage des paramètres

Les systèmes d'assimilation non linéaires (par exemple les filtres particulaires) ont de plus en plus d'intérêt pour la communauté scientifique météorologique et hydrologique comme en témoignent le nombre croissant des publications parues dans ce domaine. Ceci est lié à la complexité croissante de modèles numériques pour la prévision du temps et de ses applications directes (prévisions de qualité de l'air, prévision des débits en rivières, des sécheresses, pour ne mentionner que quelques exemples) en évolution vers des modèles environnementaux.

Un travail de comparaison des méthodes d'assimilation (Monte-Carlo, filtres de Kalman, filtre particulaires) étendues aux paramètres des modèles (e.g. Yang and Delsole, 2009) sur des sites de mesure sera intéressant pour les tester sans considérer des contraintes de temps calcul. Dans un deuxième temps, la méthode présentant le meilleur compromis « coût-performance » pourrait être mise en oeuvre.

Les méthodes d'optimisation des statistiques d'erreurs dans les systèmes d'assimilation de surface

Les systèmes d'assimilation ont constamment besoin d'être évalués par l'examen de leur optimalité, suite aux développements des schémas de surface et aux nouvelles observations. Cela demande le réglage des statistiques d'erreurs de l'ébauche et des observations, ainsi qu'une correction des biais systématiques. Dans le cadre de l'assimilation de surface, les erreurs de la température et de l'humidité à 2m ainsi que des données de télédétection peuvent être spécifiées selon les connaissances du contenu en information de chaque source.

La fonction d'analyse peut être étendue avec l'inclusion des termes de correction de biais pour les erreurs systématiques (correction de biais variationnelle proposée par Dee, 2005) et par la spécification des erreurs aléatoires selon les techniques des réglages d'erreurs pour le suivi de l'optimalité et du contenu en information (Desroziers and Ivanov, 2001, Desroziers et al. 2009), pouvant être étendues aux systèmes non-Gaussiens (Fowler and van Leeuwen, 2012).

Bibliographie

Atlas R., N. Wolfson, and J. Terry, 1993: The effect of SST and soil moisture anomalies on GLA model simulations of the 1998 U.S. summer drought. *J. Climate*, 6, 2034–2048.

Baldocchi, D. D. 2008. 'Breathing' of the Terrestrial Biosphere: Lessons Learned from a Global Network of Carbon Dioxide Flux Measurement Systems. *Australian Journal of Botany*. 56, 1-26.

Bélair S., Crevier L.-P., Mailhot J., Bilodeau B., and Delage Y. 2003. Operational implementation of the ISBA land surface scheme in the Canadian regional weather forecast model. Part I: Warm season results. *J. Hydromet.*, 4, 352-370.

Beljaars A., Viterbo P., Miller M. and Betts A. 1996. The anomalous rainfall over the United States during July 1993: Sensitivity to land surface parameterization and soil anomalies. *Mon. Weather Rev.*, 124, 362-383.

Brasnett, B. 1999 : A global analysis of snow depth for numerical weather prediction. *J. Appl. Met.*, 38, 726-740.

Brun, E., Z. Yang, R. Essery, and J. Cohen, 2008: Snow-cover parameterization and modeling. *Snow and Climate*, R. L. Armstrong and E. Brun, Eds., Cambridge University Press, 125–180.

Caesar, J., L. Alexander, and R. Vose, 2006 : Large-scale changes in observed daily maximum and minimum temperatures: Creation and analysis of a new gridded data set, *J. Geophys. Res.*, 111, D05101, doi:10.1029/2005JD006280.

Cansado, A., C. Martín and B. Navascués: 2004: Optimum interpolation New Snow Depth Analysis in HIRLAM, *Hirlam Newsletter* 65.

Cardinali, C., S. Pezzulli, and E. Andersson, 2004: Influence matrix diagnostic of a data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 130, 2767–2786.

Cohen, J. L., and D. Entekhabi, Eurasian snow cover variability and Northern Hemisphere climate predictability, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 345 – 348, 1999.

Cook, B. I., G. B. Bonan, S. Levis, and H. E. Epstein, 2008: The thermoinsulation effect of snow cover within a climate model. *Climate Dyn.*, 31, 107–124.

Cressman, G. P., 1959 : An operational objective analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, 87, 367-374.

Daley, R., 1991 : *Atmospheric Data Analysis*. Cambridge Atmospheric and Space Science Series, Cambridge University Press. ISBN 0-521-38215-7, 457 pages.

Delworth T. L., and S. Manabe, 1988 : The influence of potential evaporation on the variability of simulated soil wetness and climate. *J. Climate*, 1, 523–547.

Desroziers, G. and S. Ivanov, 2001 : Diagnosis and adaptive tuning of observation-error parameters in a variational assimilation. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 127, 1433–1452.

Desroziers, G., L. Berre, V. Chabot, and B. Chapnik, 2009 : A posteriori diagnostics in an ensemble of perturbed analyses. *Mon. Wea. Rev.*, 137:3420–3436.

Dirmeyer, P. A. 2011 : A history and review of the Global Soil Wetness Project (GSWP). *Journal of Hydrometeorology* 12:5, 729-749.

Douville, H., 2010: Relative contribution of soil moisture and snow mass to seasonal climate predictability: a pilot study, *Clim Dyn.* 34, 797-818, doi : 10.1007/s00382-008-0508-1.

Drusch, M., Wood, E. F., & Jackson, T. J., 2001 : Vegetative and atmospheric corrections for soil moisture retrieval from passive microwave remote sensing data: Results from the Southern Great Plains Hydrology Experiment 1997. *J. Hydromet.*, 2, 181–192.

Drusch, M., D. Vasiljevic and P. Viterbo, 2004: ECMWF's global snow analysis: Assessment and revision based on satellite observations. *J. Appl. Met.*, 43(9), 1282-1294.

Drusch M, and Viterbo P., 2007: Assimilation of screen-level variables in ECMWF's Integrated Forecast System: A study on the impact on the forecast quality and analyzed soil moisture. *Mon. Wea. Rev.*, 135, 300-314.

Entekhabi D., Njoku E., O'Neill P.E., Kellog K., Crow W., Edelstein W., Entin J., Goodman S., Jackson T., Johnson J., Kimball J., Piepmeier J., Koster R., Martin N., McDonald K., Moghaddam M., Moran S., Reichle R., Shi J., Spencer M., Thurman S., Tsang L., Van Zyl J., 2010: The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission. *Proceedings of the IEEE*, 98, No. 5, 704-716.

Entekhabi D., Asrar G. R., Betts A., Beven K., Bras R., Duffy C., Dunne T., Koster R., Lettenmaier D., McLaughlin D., Shuttleworth W., van Genuchten M., Wei M. and Wood, E., 1999: An agenda for land surface hydrology research and a call for the second international hydrological decade. *Proceedings of the IEEE*, 80, 20432058, doi: 10.1175/1520-0477(1999).

Etchevers, P., and Coauthors, 2004: Validation of the energy budget of an alpine snowpack simulated by several snow models (SnowMIP project). *Ann. Glaciol.*, 38, 150–158, doi:10.3189/ 172756404781814825.

Fowler, A., and P. van Leeuwen, 2012: Measures of observation impact in

non-Gaussian data assimilation. *Tellus A*, 64. doi:10.3402/tellusa.v64i0.17192.

Ge, Y., and G. Gong, 2010: Land surface insulation response to snow depth variability. *J. Geophys. Res.*, 115, D08107, doi:10.1029/2009JD012798.

Grimmond, C. S. B., M. Blackett, M. J. Best, J. Barlow, J.-J. Baik, S. E. Belcher, S. I. Bohnenstengel, I. Calmet, F. Chen, A. Dandou, K. Fortuniak, M. L. Gouvea, R. Hamdi, M. Hendry, T. Kawai, Y. Kawamoto, H. Kondo, E. S. Krayenhoff, S.-H. Lee, T. Loridan, A. Martilli, V. Masson, S. Miao, K. Oleson, G. Pigeon, A. Porson, Y.-H. Ryu, F. Salamanca, L. Shashua-Bar, G.-J. Steeneveld, M. Tombrou, J. Voogt, D. Young, N. Zhang. (2010) The International Urban Energy Balance Models Comparison Project: First Results from Phase 1. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49:6, 1268-1292.

Grimmond, C. S. B., M. Blackett, M. J. Best, J.-J. Baik, S. E. Belcher, J. Beringer, S. I. Bohnenstengel, I. Calmet, F. Chen, A. Coutts, A. Dandou, K. Fortuniak, M. L. Gouvea, R. Hamdi, M. Hendry, M. Kanda, T. Kawai, Y. Kawamoto, H. Kondo, E. S. Krayenhoff, S.-H. Lee, T. Loridan, A. Martilli, V. Masson, S. Miao, K. Oleson, R. Ooka, G. Pigeon, A. Porson, Y.-H. Ryu, F. Salamanca, G.J. Steeneveld, M. Tombrou, J. A. Voogt, D. T. Young, N. Zhang. (2011) Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison. *International Journal of Climatology* 31:2, 244-272.

Groisman, P. Ya., T. R. Karl, R. W. Knight, and G. L. Stenchikov, 1994: Changes of snow cover, temperature, and radiative heat balance over the Northern Hemisphere. *J. Climate*, 7, 1633–1656.

Guenther, A., Kulmala, M., Turnipseed, A., Rinne, J., Suni, T. and Reissell, A. 2011: integrated land eco-system-atmosphere processes study (ileaPs) assessment of global observational networks. *Boreal Env. Res.* 16: 321–336.

Habets, F., A. Boone, J. L. Champeaux, P. Etchevers, L. Franchistéguy, E. Leblois, E. Ledoux, P. Le Moigne, E. Martin, S. Morel, J. Noilhan, P. Quintana Seguí, F. Rousset-Regimbeau, and P. Viennot, 2008: The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France, *J. Geophys. Res.*, 113, D06113, doi:10.1029/2007JD008548.

Haylock, M.R., N. Hofstra, A.M.G. Klein Tank, E.J. Klok, P.D. Jones and M. New, 2008 : A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res* 113, D20119, doi:10.1029/2008JD10201.

Hazeleger, Wilco, and Coauthors, 2010: EC-Earth: A Seamless Earth-System Prediction Approach in Action. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 1357–1363. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2010BAMS2877.1>

Higgins, R.W., W. Shi, E. Yarosh and R. Joyce, 2000 : Improved United States Precipitation Quality Control System and Analysis. NCEP/Climate Prediction Center ATLAS No. 7, 40 pp., Camp Springs, MD 20746, USA.

Hirschi, M., P. Viterbo and S. I. Seneviratne, 2006: Basin-scale water-balance estimates of terrestrial water storage variations from ECMWF operational forecast analysis. *Geophysical Research Letters*, 33, doi:10.1029/2006GL027659.

Horton, R., 1937 : Determination of infiltration-capacity for large drainage basins. *Transactions, American Geophysical Union*, 18, 317-385.

Kerr, Y. and Co-Authors, 2010. The SMOS Mission : New tool for monitoring key elements of the global water cycle. *Proceedings of the IEEE*, 98, No. 5, 666-687.

Immerzeel, W. W., L. P. H. van Beek, and M. F. P. Bierkens, 2010: Climate change will affect the Asian water towers. *Science*, 328, 1382–1385, doi:10.1126/science.1183188.

Koster R. D. and Suarez, M. J., 1992 : Relative contributions of land and ocean processes to precipitation variability *J. Geophys. Res.*, 100(D7), 13775-13790

Koster RD, Dirmeyer PA, Guo Z, Bonan G, Cox P, Gordon C, Kanae S, Kowalczyk E, Lawrence D, Liu P, Lu C, Malyshev S, McAvaney B, Mitchell K, Mocko D, Oki T, Oleson K, Pitman A, Sud Y, Taylor C, Versegny D, Vasic R, Xue Y and Yamada T., 2004 : Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, 305.

Kourzeneva, E. ,2010 : External data for lake parameterization in Numerical Weather Prediction and climate modeling. *Boreal Env. Res.* 15, 165–177.

Mahfouf J-F., 1991 : Analysis of soil moisture from near-surface parameters: A feasibility study. *J. Appl. Meteor.*, 30, pp 1534-1547.

Mahfouf, J.F., and J. Noilhan, 1991 : Comparative study of various formulations from bare soil using in situ data. *J. Appl. Meteor.*, 30, 1354-1365.

Mahfouf J-F, Viterbo P, Douville H, Beljaars A and Saarinen S., 2000 : A Revised land-surface analysis scheme in the Integrated Forecasting System. *ECMWF Newsletter*, 88.

Mahfouf J-F, Bergaoui K, Draper C, Bouyseel F, Taillefer F and Taseva L. 2008. A comparison of two off-line soil analysis schemes for assimilation of screen level observations. *J. Geophys. Res.*, 114, D08105, doi:10.1029/2008JD011077.

Mahfouf J-F, 2010. Assimilation of satellite-derived soil moisture from ASCAT in a limited-area NWP- model. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 136, pp 784-798. DOI:

10.1002/qj.602.

Mahfouf, J. F. and Bližňák, V., 2011 : Combined assimilation of screen-level observations and radar derived precipitation for soil moisture analysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 137, 709-722.

Manabe S., 1969 : Climate and ocean circulation: 1. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. *Mon. Wea. Rev.*, 97, 739–774.

Mironov, D., Heise, E., Kourzeneva, E., Ritter, B., Schneider, N. and co-authors. 2010. Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO. *Boreal Env. Res.* 15, 218–230.

Noilhan, J., and S. Planton, 1989 : A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 536-549.

Ngo-Duc, T., T. Oki, S. Kanae, 2007 : A variable streamflow velocity method for global river routing model: model description and preliminary results. *Hydrology and Earth System Sciences Discussion* 4: 4389–4414.

Oleson, K. W., G. B. Bonan, J. Feddema, M. Vertenstein, C. S. B. Grimmond, 2008: An Urban Parameterization for a Global Climate Model. Part I: Formulation and Evaluation for Two Cities. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 1038–1060.

Orsolini, Y.J. and N. Kvamstø, 2009 : The role of the Eurasian snow cover upon the wintertime circulation: decadal simulations forced with satellite observations. *J. Geophys. Res.*, 114, D19108, doi:10.1029/2009JD012253.

Pirazzini, R., 2004 : Surface albedo measurements over Antarctic sites in summer. *J. Geophys. Res.*, 109, D20118, doi:10.1029/2004JD004617.

Peings, Y., H. Douville, R. Alkama, and B. Decharme, 2011 : Snow contribution to springtime atmospheric predictability over the second half of the twentieth century, *Clim Dyn*, 37(5-6), 985.

Rooney, G. and Jones, I. D., 2010 : Coupling the 1-D lake model FLake to the community land-surface model JULES. *Boreal Env. Res.* 15, 501–512.

de Rosnay P., M. Drusch, J.-P. Wigneron, T. Holmes, G. Balsamo, A. Boone, C. Rüdiger, J.-C. Calvet, Y. Kerr, 2008 : "Soil moisture remote sensing for numerical weather prediction: L-band and C-band emission modeling over land surfaces, the Community Microwave Emission Model (CMEM)" IGARRS IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, pp563-566, 978-1-4244-2808-3/08, Boston, 6-11 July 2008

Rouse, W. R., Oswald, C. J., Binyamin, J., Spence, C., Schertzer, W. M. and co-authors, 2005 : The role of northern lakes in a regional energy balance. *J.*

Hydrometeor. 6(3), 291–305.

Rüdiger, C., C. Albergel, J.-F. Mahfouf, J.-C. Calvet, and J. P. Walker, 2010: Evaluation of the observation operator Jacobian for leaf area index data assimilation with an extended Kalman filter, *J. Geophys. Res.*, 115, D09111, doi:10.1029/2009JD012912.

Rutherford I.D., 1972 : Data assimilation by statistical interpolation of forecast error fields, *J. Atmos. Sci.* 29, 809-815.

Rutter, N., and Coauthors, 2009: Evaluation of forest snow processes models (SnowMIP2). *J. Geophys. Res.*, 114, D06111, doi:10.1029/2008JD011063.

Salgado, R. and Le Moigne, P., 2010 : Coupling of the FLake model to the Surfex externalized surface model. *Boreal Env. Res.* 15, 231–244.

Samuelsson, P., Kourzeneva, E. and Mironov, D., 2010 : The impact of lakes on the European climate as simulated by a regional climate model. *Boreal Env. Res.* 15, 113–129.

Stepanenko, V. M., Goyette, S., Martynov, A., Perroud, M., Fang, X. and co-authors, 2010 : First steps of a Lake Model Intercomparison Project: LakeMIP. *Boreal Env. Res.* 15, 191–202.

Shukla J and Mintz Y., 1982 : Influence of land-surface evaporation on the earth's climate, *Science* 215, 1498-1501.

Seuffert G, Wilker H, Viterbo P, Drusch M and Mahfouf J-F, 2004 : The usage of screen-level parameters and microwave brightness temperature for soil moisture analysis. *J. Hydromet.*, 5, pp 516531.

Taylor, C.M., Gounou, A., Guichard, F., Harris, P.P. Ellis, R.J., Couvreur, F., De Kauwe, M., 2011 : Frequency of Sahelian storm initiation enhanced over mesoscale soil-moisture patterns. *Nature Geosci.*, 4(7), 430-433. Doi: 10.1038/ngeo1173.

Uppala S. M. and Co-Authors, 2005 : The ERA-40 re-analysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* , 131, 2961-3012, DOI: 10.1256/qj.04.176.

van den Hurk B, Ettema J and Viterbo P., 2008 : Analysis of Soil Moisture Changes in Europe during a Single Growing Season in a New ECMWF Soil Moisture Assimilation System. *J. Hydromet.*, 9, 116-131.

van den Hurk, B. J. J. M., 2002: European LDAS established. *GEWEX News*, No. 12, International GEWEX Project Office, Silver Spring, MD, 9. [Available online at <http://www.knmi.nl/samenw/eldas>.]

van den Hurk, B.J.J.M., P. Viterbo and S. Los, 2003 : Impact of Leaf Area Index seasonality on annual land surface evaporation in a Global Circulation

Model. J. Geophys. Res., 108, 4191-4199.

van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Collatz, G. J., Mu, M., Kasibhatla, P. S., Morton, D. C., DeFries, R. S., Jin, Y., van Leeuwen, T. T., 2010: Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009), *Atm. Chem. And Phys.*, 10, [doi:10.5194/acp-10-11707-2010](https://doi.org/10.5194/acp-10-11707-2010).

Viterbo P and Beljaars ACM., 1995: An improved land surface parameterization scheme in the ECMWF model and its validation *J. Climate*, 8, 2716-2748.

Viterbo, P., and A. K. Betts, 1999: Impact on ECMWF forecasts of changes to the albedo of the boreal forests in the presence of snow. *J. Geophys. Res.*, 104 (D22), 27 803–27 810.

Viterbo, P., A. Beljaars, J.-F. Mahfouf, and J. Teixeira, 1999: The representation of soil moisture freezing and its impact on the stable boundary layer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125, 2401– 2426, [doi:10.1002/qj.49712555904](https://doi.org/10.1002/qj.49712555904).

Wang W., and A. Kumar, 1998: A GCM assessment of atmospheric seasonal predictability associated with soil moisture anomalies over North America. *J. Geophys. Res.*, 103, 28637–28646.

Weisheimer A, Doblus-Reyes P, Jung T and Palmer T. 2011. On the predictability of the extreme summer 2003 over Europe, *Geophys. Res. Lett.*, 38, [doi:10.1029/2010GL046455](https://doi.org/10.1029/2010GL046455).

Wood, E., D. Lettenmaier, and V. Zartarian, 1992: A land- surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models. *J. Geophys. Res.*, 97, 2717–2728.

Xue, Y., H.G. Bastable, P. A. Dirmeyer, and P.J. Sellers, 1996a: Sensitivity of simulated surface fluxes to changes in land surface parameterization -- a study using ABRACOS data. *J. Appl. Meteor.*, 35, 386-400.

Xue, Y., M.J. Fennessy, and P.J. Sellers, 1996b: Impact of vegetation properties on U.S. summer weather prediction. *J. Geophys. Res.*, 101, D3, 7419-7430.

Xue, Y. and J. Shukla, 1996: The influence of land surface properties on Sahel climate. Part II: Afforestation. *J. Climate*, 9, 3260-3275.

Yang, X. and T. Delsole, 2009: Using the ensemble Kalman filter to estimate multiplicative model parameters, *Tellus*, 61A, 601-609.

Bibliographie des travaux

Par ordre chronologique

G. **Balsamo** (1999): Initialisation of soil surface data in numerical models of atmospheric circulation. Thèse de DEA (en Italien) déposé à L'Université des Etudes de Turin (Italie), Département de Physique, Via Pietro Giuria, 1, Torino.

C. Cassardo, G. **Balsamo**, C. Cacciamani, D. Cesari, T. Paccagnella and R. Pelosini, 2002: Impact of soil surface moisture initialization on rainfall in a limited area model: a case study of the 1995 South Ticino flash flood. *Hydrol. Process.*, 16, 1301-1317.

G. **Balsamo** (2003): Analysis of soil moisture in a mesoscale weather prediction model. Thèse de doctorat (PhD-Thesis) déposé à Météo-France/CNRM/GMAP, 42 Av. G. Coriolis, Toulouse, France.

G. **Balsamo**, 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, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 130, 895-915.

G. **Balsamo**, F. Bouyssel, J. Noilhan, J.-F. Mahfouf, S. Bélair, S., and G. Deblonde: 2005. A simplified variational analysis scheme for soil moisture: Developments at Météo-France and MSC. Proc. ECMWF/ELDAS workshop on Land Surface Assimilation, ECMWF, Reading, UK, 79-96.

S. Bélair, G. **Balsamo**, J.-F. Mahfouf, and G. Deblonde, 2005: Towards the inclusion of Hydros soil moisture measurements in forecasting systems of the meteorological service of Canada. Proc. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 25-29 July 2005, 4, 2741-2743.

G. **Balsamo**, J.-F. Mahfouf, S. Bélair, and G. Deblonde, 2006: A Global Root-Zone Soil Moisture Analysis Using Simulated L-band Brightness Temperature in Preparation for the Hydros Satellite Mission. *J. Hydromet.*, 7, 1126-1146 .

M. Drusch, K. Scipal, E. Andersson, G. **Balsamo**, and P. de Rosnay, 2007: Use of satellite data for land surface assimilation. Proc. of ECMWF Seminar on Recent Developments in the Use of Satellite Observations in Numerical Weather Prediction, 3-7, Sept 2007.

Beljaars, A., G. **Balsamo**, A. Betts and P. Viterbo, 2007: Atmosphere/surface interactions in the ECMWF model at high latitudes. Proc. of ECMWF Seminar

on Polar meteorology, 4-8 September 2006, ECMWF, 153-168.

G. **Balsamo**, J.-F. Mahfouf, S. Bélair, and G. Deblonde, 2007: A Land Data Assimilation System for soil moisture and temperature: An information content study. *J. Hydromet.*, 8, 1225-1242 .

C. Rüdiger, J.-C. Calvet, J.-F. Mahfouf, L. Jarlan, G. **Balsamo**, and J. Muñoz Sabater, 2007: Assimilation of land surface variables for model initialisation at Meteo-France. L. Oxley and D. Kulasiri (Eds.), Proc. 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.

Jarlan, L., G. **Balsamo**, S. Lafont, A. Beljaars, J.C. Calvet and E. Mougin, 2008: Analysis of Leaf Area Index in the ECMWF land surface scheme and impact on latent heat and carbon fluxes: Applications to West Africa, *J. Geophys. Res.*, 113, D24117. also available as ECMWF Tech. Memo. 544 .

F. Vitart, A. Bonet, M. Balmaseda, G. **Balsamo**, J.-R. Bidlot, R. Buizza, M. Fuentes, A. Hofstadler, F. Molteni, and T. Palmer, 2008: Merging VarEPS with the monthly forecasting system: a first step towards seamless prediction. *ECMWF Newsletter* 115, 35-43.

M. Drusch, K. Scipal, P. de Rosnay, G. **Balsamo**, E. Andersson, P. Bougeault and P. Viterbo, 2008: Exploitation of satellite data in the surface analysis, *ECMWF Tech. memo.* 576.

M. Drusch, T. Holmes, P. de Rosnay and G. **Balsamo**, 2009: Comparing ERA-40 based L-band brightness temperatures with Skylab observations: A calibration / validation study using the Community Microwave Emission Model. *J. Hydromet.* 10, 213-225, DOI: 10.1175/2008JHM964.1, *ECMWF Tech. memo.* 566.

C. Cassardo, N. Loglisci, M. W. Qian, S. Ferrarese, A. Longhetto, and G. **Balsamo**, 2008: Numerical simulation of the 1999 Christmas day storms in Europe (in Chinese), *Meteorology and disaster reduction research*, 32(2), pp. 1-8.

P. de Rosnay, M. Drusch, J.-P. Wigneron, T. Holmes, G. **Balsamo**, A. Boone, C. Rüdiger, J.-C. Calvet, and Y. Kerr, 2008: Soil moisture remote sensing for numerical weather prediction: L-band and C-band emission modeling over land surfaces, the community microwave emission model (CMEM). *IGARRS IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, pp563-566, 978-1-4244-2808-3/08, Boston, 6-11 July 2008.

C.M.J. Jacobs, E.J. Moors, H.W. Ter Maat, A.J. Teuling, G. **Balsamo**, J.-C. Calvet, J. Ettema, M. Lange, B.J.J.M. Van Den Hurk, P. Viterbo and W. Wergen 2008: Evaluation of European Land Data Assimilation System

(ELDAS) products using in situ observations. *Tellus*, 60A, 1023-1037.

Bechtold, P., M. Köhler, T. Jung, F. Doblas-Reyes, M. Leutbecher, M. J. Rodwell, F. Vitart, and G. **Balsamo**, 2008: Advances in simulating atmospheric variability with the ECMWF model: from synoptic to decadal time-scales. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 134, 1337-1351, also available as ECMWF Tech. Memo. 556 .

F. Vitart, A. Bonet, M. Balmaseda, G. **Balsamo**, J.-R. Bidlot, R. Buizza, M. Fuentes, A. Hofstadler, F. Molteni, and T. Palmer, 2008: The new VarEPS-monthly forecasting system: a first step towards seamless prediction. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 134, 1789-1799.

P. De Rosnay, M. Drusch, T. Holmes, G. **Balsamo**, K. Scipal, E. Andersson, and P. Bougeault, 2008: ECMWF's contribution to the SMOS project. *ECMWF Newsletter* 115, 5-6.

M. Drusch, K. Scipal, E. Andersson, G. **Balsamo**, T. Holmes and P. de Rosnay, 2008: Use of satellite data for land surface assimilation. *Proc. of ECMWF seminar on recent developments in the use of satellite observations in numerical weather prediction*, 3-7 September 2007, 187-200.

A. Boone, P. de Rosnay, G. **Balsamo**, A. Beljaars, F. Chopin, B. Decharme, C. Delire, A. Ducharme, S. Gascoïn, M. Grippa, F. Guichard, Y. Gusev, P. Harris, L. Jarlan, L. Kergoat, E. Mougïn, O. Nasonova, A. Norgaard, T. Orgeval, C. Ottlé, I. Pocard-Leclercq, J. Polcher, I. Sandholt, S. Saux-Picart, C. Taylor, and Y. Xue, 2009: The AMMA Land Surface Model Intercomparison Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90, 1865–1880. DOI: 10.1175/2009BAMS2786.1.

P. de Rosnay, M. Drusch, A. Boone, G. **Balsamo**, B. Decharme, P. Harris, Y. Kerr, T. Pellarin, J. Polcher and J-P. Wigneron, 2009: The AMMA Land Surface Model Intercomparison Experiment coupled to the Community Microwave Emission Model: ALMIP-MEM. *J. Geophys. Res.*, Vol 114, doi:10.1029/2008JD010724.

F. Guichard, N. Asencio, C. Peugeot, O. Bock, J.-L. Redelsperger, X. Cui, M. Garvert, B. Lamptey, E. Orlandi, J. Sander, F. Fierli, M. A. Gaertner, S. Jones, J.-P. Lafore, A. Morse, M. Nuret, A. Boone, G. **Balsamo**, P. de Rosnay, B. Decharme, P. P. Harris and J.-C. Bergès, 2009 : An intercomparison of simulated rainfall and evapotranspiration associated with a mesoscale convective system over West Africa, *Weather and Forecasting*, 25, 37-60. doi : 10.1175/2009WAF2222250.1

G. **Balsamo**, P. Viterbo, A. Beljaars, B. van den Hurk, M. Hirschi, A.K. Betts, and K. Scipal, 2009: A Revised Hydrology for the ECMWF Model: Verification from Field Site to Terrestrial Water Storage and Impact in the Integrated Forecast System. *J. Hydrometeor.*, 10, 623-643, also available as ECMWF

Tech. memo. 563.

M. Drusch, K. Scipal, P. de Rosnay, G. **Balsamo**, E. Andersson, P. Bougeault, P. Viterbo, 2009: Towards a Kalman filter based soil moisture analysis system for the operational ECMWF Integrated Forecast System, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L10401, doi:10.1029/2009GL037716.

T. Jung, G. **Balsamo**, P. Bechtold, A. Beljaars, M. Köhler, M. Miller, J.-J. Morcrette, A. Orr, M. Rodwell and A.M. Tompkins, 2009: The ECMWF model climate: Recent progress through improved physical parametrizations. *Proc. of ECMWF seminar on Parametrization of Subgrid Physical Processes*, 4-8 September 2008, 233-250.

F. Rabier, A. Bouchard, E. Brun, A. Doerenbecher, S. Guedj, V. Guidard, F. Karbou, V.-H. Peuch, L. El Amraoui, D. Puech, C. Genthon, G. Picard, M. Town, A. Hertzog, F. Vial, P. Cocquerez, S. A. Cohn, T. Hock, J. Fox, H. Cole, D. Parsons, J. Powers, K. Romberg, J. VanAndel, T. Deshler, J. Mercer, J. S. Haase, L. Avallone, L. Kalnajs, C. R. Mechoso, A. Tangborn, A. Pellegrini, Y. Frenot, J.-N. Thépaut, A. McNally, G. **Balsamo**, and P. Steinle, 2009: The Concordiasi project in Antarctica, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 10.1175/2009BAMS2764.1.

F. Pappenberger, H. Cloke, G. **Balsamo**, T. Ngo-Duc, T. Oki, 2009: Global runoff routing with the hydrological component of the ECMWF NWP system, *Int. J. Climatol.*, doi:10.1002/joc.2028 .

R. D. Koster, S. Mahanama, T. Yamada, G. **Balsamo**, M. Boissarie, P. Dirmeyer, F. Doblas-Reyes, T. Gordon, Z. Guo, J.-H. Jeong, D. Lawrence, Z. Li, L. Luo, S. Malyshev, W. Merryfield S. I. Seneviratne, T. Stanelle, B. van den Hurk, F. Vitart, and E. F. Wood, 2009: The Contribution of Land Surface Initialization to Subseasonal Forecast Skill: First Results from the GLACE-2 Project, *Geophys. Res. Lett.*, 2009GL041677R.

A. Agustí-Panareda, G. **Balsamo**, and A. Beljaars, 2009: Impact of improved soil moisture on the ECMWF precipitation forecast in West Africa, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L20808, doi:10.1029/2010GL044748, also available as ECMWF Tech. memo. 611.

A. Agustí-Panareda, A. Beljaars, M. Ahlgrimm, G. **Balsamo**, O. Bock, R. Forbes, A. Ghelli, F. Guichard, M. Köhler, R. Meynadier and J.-J. Morcrette, 2009: The ECMWF re-analysis for the AMMA observational campaign, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* (in press), doi:10.1002/qj.662 , also available as ECMWF Tech. memo. 612.

J.-C. Calvet, G. **Balsamo**, M. Balzarolo, A. Barbu, A. Cescatti, F. Chevallier, N. Delbart, J. de Vries, A.-L. Gibelin, A. Horanyi, L. Kullmann, S. Lafont, J.-F. Mahfouf, F. Maignan, D. Papale, G. Seufert and H. The, 2009: Monitoring soil and vegetation fluxes of carbon and water at the global scale: the land carbon

core information service of GEOLAND2, Proc. of ECMWF/GLASS workshop on Land Surface Modelling, Data Assimilation and the implications for predictability, 9-12 November 2009, Reading, UK.

G. **Balsamo**, E. Dutra, S. Boussetta, A. Beljaars, P. Viterbo, and B. van den Hurk, 2010: Recent advances in land surface modelling at ECMWF, Proc. of ECMWF/GLASS workshop on Land Surface Modelling, Data Assimilation and the implications for predictability, 9-12 November 2009, Reading, UK.

A. Beljaars, G. **Balsamo**, P. de Rosnay, B. van den Hurk, and M. Best: 2010: Land surface modelling, data assimilation and implications for predictability, ECMWF Newsletter, 112, pp. 9-10.

G. **Balsamo** and A. Beljaars, 2010: Contribution to land surface evaporation from canopy interception, bare ground, vegetation transpiration and open water in a global land surface model using FLUXNET data. Disponible en ligne : [http://www.fluxdata.org/DataInfo/Paperwriting Proposals/Balsamo Contribution to land surface evaporation.pdf](http://www.fluxdata.org/DataInfo/Paperwriting%20Proposals/Balsamo%20Contribution%20to%20land%20surface%20evaporation.pdf)

C. Albergel, J.-C. Calvet, P. de Rosnay, G. **Balsamo**, W. Wagner, S. Hasenauer, V. Naeimi, E. Martin, E. Bazile, F. Bouyssel, and J.-F. Mahfouf, 2010: Cross-evaluation of modelled and remotely sensed surface soil moisture with in situ data in Southwestern., Hydrol. and Earth Syst. Sci., 14, 2177-2191, doi:10.5194/hess-14-2177-2010.

G. **Balsamo**, S. Boussetta, P. Lopez, and L. Ferranti, 2010: A new 1989-2009 global precipitation dataset for land surface modelling applications, ECMWF ERA Report Series, n. 5, pp10.

Y. Takaya, F. Vitart, G. **Balsamo**, M. Balmaseda, M. Leutbecher, and F. Molteni, 2010: Implementation of an ocean mixed layer model in the ECMWF Integrated Forecast System. ECMWF Tech. memo. 622.

G. **Balsamo**, F. Pappenberger, E. Dutra, P. Viterbo, and B. van den Hurk, 2010: A revised land hydrology in the ECMWF model: A step towards daily water flux prediction in a fully-closed water cycle., Special issue on large scale hydrology of Hydrological Processes, doi:10.1002/hyp.7808.

T. Jung, G. **Balsamo**, P. Bechtold, A. Beljaars, M. Köhler, M. Miller, J.-J. Morcrette, A. Orr, M. Rodwell, and A. Tompkins, 2010: The ECMWF model climate: Recent progress through improved physical parametrizations. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 136(650), 1145-1160, doi: 10.1002/qj.63 also available as ECMWF Tech. memo. 623.

E. Dutra, V.M. Stepanenko, G. **Balsamo**, P. Viterbo, P.M. Miranda, D. Mironov, and C. Schär, 2010: Global offline lake simulations: Validation and Impact on ERA-Interim, Bor. Env. Res., 15, 100-112, also available as ECMWF Tech. Memo. 608.

G. **Balsamo**, E. Dutra, V.M. Stepanenko, P. Viterbo, P.M. Miranda, and D. Mironov, 2010: Deriving an effective lake depth from satellite lake surface temperature data: A feasibility study with MODIS data, *Bor. Env. Res.*, 15, 178-190, also available as ECMWF Tech. memo. 609.

A. Beljaars, G. **Balsamo**, P. de Rosnay, B. van den Hurk, and M. Best: 2010: Land surface modelling, data assimilation and implications for predictability, *ECMWF Newsletter*, 112, pp. 9-10.

B. van den Hurk, F. Doblas-Reyes, G. **Balsamo**, R. Koster, S. Seneviratne and H. Camargo Jr, 2010: Soil moisture effects on seasonal temperature and precipitation forecast scores in Europe, *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-010-0956-2.

G. **Balsamo**, S. Boussetta, P. Lopez, and L. Ferranti, 2010: Evaluation of ERA-Interim and ERA-Interim-GPCP-rescaled precipitation over the U.S.A., *ERA Report Series*, n. 5, pp10.

M.J. Rodwell, T.Jung, P. Bechtold, P. Berrisford, N. Bormann, C. Cardinali, L. Ferranti, T. Hewson, F. Molteni, N. Wedi, M.A. Balmaseda, G. **Balsamo**, M. Bonavita, R. Buizza, M. Dahoui, A. Garcia-Mendez , M. Leutbecher, P. Lopez, Y. Trémolet and F. Vitart, 2010: Developments in diagnostics research, *ECMWF Tech. Memo.* 637.

G. **Balsamo**, E. Dutra, S. Boussetta, A. Beljaars, P. Viterbo, and B. van den Hurk, 2010: Recent advances in land surface modelling at ECMWF, *Proc. of ECMWF/GLASS workshop on Land Surface Modelling, Data Assimilation and the implications for predictability*, 9-12 November 2009, Reading, UK.

R. D. Koster, S. P. P. Mahanama, T. J. Yamada, G. **Balsamo**, A. A. Berg, M. Boisserie, P. A. Dirmeyer, F. J. Doblas-Reyes, G. Drewitt, C. T. Gordon, Z. Guo, J.-H. Jeong, W.-S. Lee, Z. Li, L. Luo, S. Malyshev, W. J. Merryfield, S. I. Seneviratne, T. Stanelle, B. J. J. M. van den Hurk, F. Vitart, and E. F. Wood, 2010: The Second Phase of the Global Land-Atmosphere Coupling Experiment: Soil Moisture Contributions to Subseasonal Forecast Skill, *J. Hydrometeor.*, doi: 10.1175/2011JHM1365.1.

J. Muñoz Sabater, P. de Rosnay, and G. **Balsamo**, 2011: Sensitivity of L-band NWP forward modelling to soil roughness, *Int. J. Rem. Sens.*, doi: 10.1080/01431161.2010.507260.

P. de Rosnay, M. Drusch, G. **Balsamo**, C. Albergel, and L. Isaksen, 2011: Extended Kalman Filter soil moisture analysis in the IFS, *ECMWF Newsletter*, 127, 12-16.

G. **Balsamo**, S. Boussetta, E. Dutra, A. Beljaars, P. Viterbo, and B. Van den Hurk, 2011: Evolution of land surface processes in the IFS, ECMWF Newsletter, 127, 17-22.

C. Jiménez, C. Prigent, B. Mueller, S. I. Seneviratne, M. F. McCabe, E. F. Wood, W. B. Rossow, C. D. Kummerow, G. **Balsamo**, A. K. Betts, G. B. Bonan, M. G. Bosilovich, P. A. Dirmeyer, M. B. Ek, J. B. Fisher, M. Jung, M. Kanamitsu, R. D. Koster, R. H. Reichle, M. Reichstein, M. Rodell, J. Sheffield, K. Tu, and K. Wang, 2011: Global comparison of 12 land surface heat fluxes, *J. Geophys. Res.*, 116, D02102, doi: 10.1029/2010JD014545.

C. Szczypta, J.-C. Calvet, C. Albergel, G. **Balsamo**, S. Boussetta, D. Carrer, S. Lafont, and C. Meurey, 2011: Verification of the new ECMWF ERA-Interim reanalysis over France, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 647-666, doi:10.5194/hess-15-647-2011, 2011.

S. Boussetta, G. **Balsamo**, A. Beljaars, T. Kral, L. Jarlan, 2011: Impact of a satellite-derived Leaf Area Index monthly climatology in a global Numerical Weather Prediction model, *Int. J. Remote Sensing* (in press), also available as ECMWF Tech. Memo. 640.

R. Lacaze, F. Baret, F. Camacho, R. d'Andrimont, S. C. Freitas, P. Pacholczyk, H. Poilvé, B. Smets, K. Tansey, W. Wagner, J.-C. Calvet, G. **Balsamo**, R. Kidd, H. Makhmara, M. Weiss, and A. Bradley, 2011: geoland2 - Towards an operational GMES Land Monitoring Core Service: the Biogeophysical Parameter Core Mapping Service, *Proc. of the International Symposium of Remote Sensing of Environment (ISRSE)*.

E. Dutra, G. **Balsamo**, P. Viterbo, P.M.A. Miranda, A. Beljaars, C. Schär, and K. Elder, 2010: An improved snow scheme for the ECMWF land surface model: description and offline validation. *J. Hydrometeor.*, 11, 899-916. doi: 10.1175/2010JHM1249.1., also available as ECMWF Tech. Memo. 607.

D. P. Dee, S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. A. Balmaseda, G. **Balsamo**, P. Bauer, P. Bechtold, A. C. M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A. J. Geer, L. Haimberger, S. Healy, H. Hersbach, E. V. Hólm, L. Isaksen, P. Kållberg, M. Köhler, M. Matricardi, A. P. McNally, B. M. Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavolato, J.-N. Thépaut, and F. Vitart, 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, doi: 10.1002/qj.828, also available as ERA Report Series, n. 9, pp. 71.

Mueller, B., S.I. Seneviratne, C. Jimenez, T. Corti, M. Hirschi, G. **Balsamo**, P. Ciais, P. Dirmeyer, J.B. Fisher, Z. Guo, M. Jung, F. Maignan, M.F. McCabe, R. Reichle, M. Reichstein, M. Rodell, J. Sheffield, A. J. Teuling, K. Wang, E.F. Wood, and Y. Zhang, 2011: Evaluation of global observations-based evapotranspiration datasets and IPCC AR4 simulations. *Geophysical*

Research Letters, 38, L06402, doi:10.1029/2010GL046230.

F. Molteni, T. Stockdale, M. Balmaseda, G. **Balsamo**, R. Buizza, L. Ferranti, L. Magnusson, K. Mogensen, T. Palmer and F. Vitart, 2011: The new ECMWF seasonal forecast system (System 4), ECMWF Tech. memo 656.

E. Dutra, S. Kotlarski, P. Viterbo, G. **Balsamo**, P. M. A. Miranda, C. Schär, P. Bissolli, and T. Jonas, 2011: Snow cover sensitivity to horizontal resolution, parameterizations and atmospheric forcing in a land surface model, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2011JD016061.

G. **Balsamo**, R. Salgado, E. Dutra, S. Boussetta, T. Stockdale, and M. Potes, 2012: On the contribution of lakes in predicting near-surface temperature in a global weather forecasting model, *Tellus-A*, 64, 15829, DOI: 10.3402/tellusa.v64i0.15829, also available as ECMWF Tech. Memo. 648.

E. Dutra, P. Viterbo, P. M. A. Miranda, G. **Balsamo**, 2012: Complexity of snow schemes in a climate model and its impact on surface energy and hydrology. *J. Hydrometeor.*, 13, 521-538. doi:10.1175/JHM-D-11-072.1

G. **Balsamo**, C. Albergel, M. Balzarolo, A. Beljaars, S. Boussetta, J.C. Calvet, E. Dutra, T. Kral, D. Papale, P. de Rosnay, and I. Sandu, "Usefulness of Benchmarking for Global Land Surface Model Development." from the 26th Conference on Hydrology, 22-26 January, 2012, New Orleans, Louisiana. BAMS note June 2012.

C. Albergel, P. de Rosnay, G. **Balsamo**, L. Isaksen, J. Muñoz Sabater, 2012: Soil moisture analyses at ECMWF: evaluation using global ground-based in-situ observations, *J. Hydrometeor.* 3, 1442-1460, 2012, doi: 10.1175/JHM-D-11-0107.1.

C. Albergel, G. **Balsamo**, P. de Rosnay, J. Muñoz-Sabater, and S. Boussetta, 2012: A bare ground evaporation revision in the ECMWF land-surface scheme: evaluation of its impact using ground soil moisture and satellite microwave data, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3607-3620, doi: 10.5194/hess-16-3607-2012.

P. de Rosnay, G. **Balsamo**, C. Albergel, J. Muñoz Sabater, and L. Isaksen, 2012: Initialization of land surface variables for Numerical Weather Prediction, *Surveys in Geophysics*, Springer Ed., doi: 10.1007/s10712-012-9207-x.

G. **Balsamo**, C. Albergel, A. Beljaars, S. Boussetta, E. Brun, H. Cloke, D. Dee, E. Dutra, F. Pappenberger, P. de Rosnay, J. Muñoz-Sabater, T. Stockdale, F. Vitart, 2012: ERA-Interim/Land: A global land-surface reanalysis based on ERA-Interim meteorological forcing, ERA-Report series, n. 13, pp. 25.

Orsolini, Y. J., R. Senan, G. **Balsamo**, F.J. Doblas-Reyes, F. Vitart, A.

Weisheimer, A. Carrasco, R.E. Benestad, 2012: Impact of snow initialization on sub-seasonal forecasts, *Clim. Dyn.* (en révision).

Appendice

Les publications suivantes sont en annexe du manuscrit :

Support au Chapitre 2

G. Balsamo, P. Viterbo, A. Beljaars, B. van den Hurk, M. Hirschi, A.K. Betts, and K. Scipal, 2009: A Revised Hydrology for the ECMWF Model: Verification from Field Site to Terrestrial Water Storage and Impact in the Integrated Forecast System. *J. Hydrometeor.*, 10, 623-643.

E. Dutra, G. Balsamo, P. Viterbo, P.M.A. Miranda, A. Beljaars, C. Schär, K. Elder, 2009: An improved snow scheme for the ECMWF land surface model: description and offline validation. *J. Hydrometeor.*, 11, 899-916. doi: 10.1175/2010JHM1249.1.

Support au Chapitre 3

G. Balsamo, J.-F. Mahfouf, S. Bélair, G. Deblonde, 2007: A Land Data Assimilation System for soil moisture and temperature: An information content study. *J. Hydromet.*, 8, 1225-1242.

G. Balsamo, E. Dutra, V.M. Stepanenko, P. Viterbo, P.M. Miranda, D. Mironov, 2010: Deriving an effective lake depth from satellite lake surface temperature data: A feasibility study with MODIS data, *Bor. Env. Res.*, 15, 178-190

Support au Chapitre 4

R. Koster, S. Mahanama, T. Yamada, G. Balsamo, M. Boisserie, P. Dirmeyer, F. Doblas-Reyes, T. Gordon, Z. Guo, J.-H. Jeong, D. Lawrence, Z. Li, L. Luo, S. Malyshev, W. Merryfield¹³, S. I. Seneviratne, T. Stanelle, B. van den Hurk, F. Vitart, and E. F. Wood, 2009: The Contribution of Land Surface Initialization to Subseasonal Forecast Skill: First results from the GLACE-2 Project, *Geophys. Res. Lett.*, 2009GL041677R.