



HAL
open science

Modélisation des Processus de Surface pour les Modèles de Prédiction Numérique du Temps et de Climat, et Réanalyses de Surface pour les Etudes d'Impact en Hydrologie

Patrick Le Moigne

► **To cite this version:**

Patrick Le Moigne. Modélisation des Processus de Surface pour les Modèles de Prédiction Numérique du Temps et de Climat, et Réanalyses de Surface pour les Etudes d'Impact en Hydrologie. Sciences de l'environnement. Institut national polytechnique de Toulouse (INPT), 2024. tel-04548056

HAL Id: tel-04548056

<https://theses.hal.science/tel-04548056>

Submitted on 16 Apr 2024

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.

Public Domain

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.



MÉMOIRE

En vue de l'obtention de

Habilitation à diriger des recherches DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par : *l'Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)*

Présentée et soutenue le 29/03/2024 par :

Patrick Le Moigne

**Modélisation des Processus de Surface pour les Modèles de Prédiction Numérique du Temps
et de Climat, et Réanalyses de Surface pour les Etudes d'Impact en Hydrologie**

JURY

Gianpaolo Balsamo	OMM, Genève, Suisse
Yves Brunet	INRAE, Bordeaux, France
Agnès Ducharne	IPSL, Paris, France
Florence Habets	ENS, Paris, France
Lionel Jarlan	CESBIO, Toulouse, France
Christine Lac	CNRM, Toulouse, France
Eric Martin	INRAE, Aix-en-Provence, France
Jean-Philippe Vidal	INRAE, Lyon, France

École doctorale et spécialité :

SDU2E : Surface et Interfaces Continentales, Hydrologie

Unité de Recherche :

Centre National de Recherches Météorologiques (UMR 3589)

Correspondante:

Christine Lac

Rapporteurs :

Gianpaolo Balsamo, Lionel Jarlan et Jean-Philippe Vidal

**Modélisation des Processus de Surface pour les
Modèles de Prévision Numérique du Temps et de
Climat, et Réanalyses de Surface pour les Études
d'Impact en Hydrologie.**

Patrick Le Moigne

Table des matières

1	Introduction	5
1.1	La modélisation des surfaces continentales	7
1.2	Les réanalyses de surface	8
1.3	Démarche scientifique	9
1.4	Cursus et parcours professionnel	10
2	La modélisation des surfaces continentales	13
2.1	La plateforme de modélisation SURFEX	14
2.1.1	Principe général	14
2.1.2	Les bases de données de surface	15
2.1.3	Modélisation des surfaces	15
2.1.4	Couplage avec l’atmosphère et l’hydrologie	17
2.2	Le modèle de lac FLake	18
2.3	Apport du modèle FLake dans CNRM-CM	21
2.4	Implémentation d’un bilan de masse des lacs pour l’hydrologie	23
2.5	Modélisation du bilan d’énergie en Antarctique	24
2.6	Ennuagement et formation de nuages de couche limite	28
2.7	Amélioration des bases de données de surface	31
3	Réanalyses régionales de surface	33
3.1	La réanalyse SAFRAN sur la France	34
3.1.1	Description	34
3.1.2	Analyse des précipitations	35
3.1.3	Impact de la densité du réseau d’observations	38
3.2	Usage de la réanalyse pour les études d’impact en hydrologie	39

3.2.1	Suivi de la ressource en eau en France	39
3.2.2	Projet UERRA et étude d'impact sur l'hydrologie en Europe	41
4	Travaux en cours et perspectives	47
4.1	Modélisation du lac Ivars pendant la campagne de mesures LIAISE	47
4.2	Impact du changement climatique sur les retenues d'eau	50
4.3	Rôle de l'irrigation dans le couplage surface-atmosphère	55
4.4	Couplage Mésio-NH et modèle de feux de forêt Blaze	59
4.5	Vers le remplacement de SAFRAN à Météo-France	60
4.6	Impact du changement d'occupation des sols sur la réanalyse	63
4.7	Conclusion générale	64
5	Glossaire	67
6	Annexes	81
6.1	Enseignement, Encadrement, Animation	81
6.1.1	Enseignement	81
6.1.2	Encadrement de thèse	81
6.1.3	Encadrement de post-doctorants	82
6.1.4	Encadrement de stages M2 ou 3 ^e année d'école d'ingénieur	82
6.1.5	Comité de suivi de thèse	82
6.1.6	Participation à des projets nationaux et internationaux	83
6.1.7	Organisation d'ateliers	84
6.2	Publications	84
6.2.1	Sélection d'articles	84
6.2.2	Publications dans des revues de rang A	85
6.2.3	Publications dans des revues à comité de lecture	89
6.2.4	Communications lors de congrès	90
6.2.5	Production de documentation technique	94

CHAPITRE 1

Introduction

Les surfaces continentales représentent environ 30% de la surface terrestre et constituent un acteur important du système climatique. Leurs caractéristiques physiques variées vont moduler les échanges dynamiques avec l'atmosphère à cause des frottements générés par la topographie, la végétation et les bâtiments sur la couche limite atmosphérique. Par ailleurs les surfaces continentales constituent un lieu d'échanges de matière et d'énergie dont l'intensité va être régulée par la présence de végétation, de neige, d'eau de surface ou d'humidité dans les sols. Les échanges d'eau quant à eux vont fortement dépendre de la diversité des paysages, en particulier la topographie et les propriétés des sols pour les surfaces naturelles, mais aussi les propriétés morphologiques et physiques des surfaces d'eaux intérieures, ou encore des surfaces urbaines.

La grande diversité des surfaces continentales fait que les travaux de recherche abordés dans ce domaine sont variés par essence. Ils s'appuient sur des modèles mathématiques permettant de représenter les processus à l'interface surface-atmosphère et aussi ceux qui sont intrinsèques au milieu considéré. Ces modèles ont besoin d'observations, comme par exemple les mesures in situ ou les observations satellitaires, qui sont des éléments indispensables pour la mise au point des paramétrisations et la validation. Ces observations peuvent être pérennes (c'est le cas de celles issues du réseau d'observations de Météo-France) ou ponctuelles lorsqu'elles proviennent de campagnes de mesures. La combinaison entre observations et modèles est un des aspects incontournables du travail de modélisation, et constitue également la base des réanalyses de surface qui ont pour but de reconstruire des variables proches de la surface sur de longues périodes temporelles passées, y compris dans des endroits où la densité des observations est faible. Elles peuvent être utilisées pour étudier les tendances climatiques ou comme données d'entrée de la modélisation, avec par exemple un modèle de surface pour comprendre le fonctionnement de certaines paramétrisations physiques. Ce type de simulations, dit "offline" correspond à un mode sans rétroaction de la surface vers l'atmosphère et permet entre autres de s'affranchir au mieux des biais systématiques des modèles atmosphériques.

La surface est une des composantes essentielles des modèles atmosphériques, au même titre que les schémas de turbulence, de rayonnement ou de microphysique. Par ailleurs, les surfaces, qui constituent la condition à la limite inférieure des modèles atmosphériques, sont complexes par nature et requièrent une représentation la plus fidèle possible, c'est-à-dire capable de distinguer les zones naturelles, urbaines et marines. La grande variété des écosystèmes terrestres nécessite

de les cartographier et d'en définir les caractéristiques physiques principales attendues par les schémas de surface.

Parmi les surfaces continentales considérées, les lacs comme les villes constituent des milieux qui ont gagné en intérêt au fil du temps. En effet, les premiers modèles de prévision numérique du temps, dont les résolutions étaient de quelques dizaines de kilomètres, se sont intéressés aux surfaces naturelles et aux océans parce qu'à ces résolutions la surface qu'elles occupaient dans une maille du modèle était majoritaire. La représentation des villes dans les modèles s'est considérablement développée depuis les années 2000. En effet, les problématiques émergentes liées à la santé ou au confort des personnes vivant dans les villes ont donné lieu au développement de modèles adaptés, permettant entre autres de représenter des phénomènes d'îlot de chaleur urbain, caractérisant des gradients forts de température entre les zones urbaines et péri-urbaines et étant à l'origine de circulations de méso-échelle (Michau et al., 2023).

Plus récemment, vers les années 2010, les lacs ont également suscité un intérêt croissant, pour plusieurs raisons. Tout d'abord, l'augmentation des moyens d'observations a permis d'en observer un plus grand nombre (Verpoorter et al., 2014), en particulier grâce aux données satellitaires, et donc de les cartographier finement. De plus, les lacs sont des milieux qui permettent de suivre l'amplification du changement climatique, grâce à des indicateurs comme la période d'enlèvement des lacs boréaux, la prolifération des algues ou encore l'augmentation continue de la température de l'eau. Les lacs ont des caractéristiques physiques particulières, à savoir un albédo faible lorsqu'ils ne sont pas gelés et donc une capacité à stocker de la chaleur, une grande inertie, c'est-à-dire une grande capacité à conserver leur température, ce qui explique que les variations journalières de la température de surface de l'eau des lacs sont faibles par rapport à celle des continents. Quand les lacs gèlent et qu'ils sont recouverts de neige, leur albédo augmente et ils vont avoir tendance à stabiliser l'atmosphère qui les surplombe. Un des paramètres clé qui gouverne l'évolution de la thermique des lacs est la profondeur. En effet, plus les lacs sont profonds plus ils vont avoir tendance à répartir l'énergie reçue sur un grand volume, par opposition aux lacs peu profonds qui seront sujet à de plus fortes variations de température, en surface comme en profondeur.

La dynamique saisonnière des lacs dépend de leur nature. Les lacs peuvent se mélanger plusieurs fois par an suivant leur morphologie et les conditions climatiques. Certains lacs sont dits monomictiques, c'est-à-dire qu'ils se mélangent de haut en bas une seule fois par an. Les lacs monomictiques chauds présentent une stratification marquée en été, alors que les monomictiques froids, présents la plupart du temps en montagne, ont une stratification inverse avec une température de surface ne dépassant pas les 4° C, température de densité maximale. Lorsque deux circulations distinctes existent, les lacs sont dimictiques et la stratification est facilement détruite sous l'effet du vent. La dynamique d'un lac monomictique peut être résumée de la façon suivante. En été, le soleil chauffe la surface et la couche d'eau superficielle peut former une stratification, c'est-à-dire une barrière à l'interface entre les eaux chaudes de surface et les eaux plus froides des couches plus profondes. Lorsqu'arrive l'automne, les conditions météorologiques plus froides refroidissent les eaux en surface et progressivement en profondeur jusqu'à ce que le lac soit entièrement mélangé. Ce refroidissement est dû à la plongée des eaux froides plus denses sous l'effet du stress de surface qui peut renforcer ce phénomène en accentuant la convection. Quand vient l'hiver, les eaux sont froides et lorsque du gel se forme, la température de surface diminue. Une couche de neige permet en plus de renforcer le caractère isolant de ces lacs. Enfin, au printemps, lorsque neige et glace fondent, l'eau froide se mélange avec l'eau libre plus chaude jusqu'à obte-

nir un mélange complet du lac. La structure verticale des lacs qui peuvent être stratifiés présente généralement trois couches distinctes : l'épilimnion qui comprend la couche chaude supérieure, la thermocline ou métalimnion qui peut changer de profondeur tout au long de l'année et l'hypolimnion, plus froid et qui s'étend jusqu'au fond du lac.

Actuellement, les lacs ne sont pas systématiquement représentés dans les modèles de climat ou de prévision numérique du temps. Les températures de surface des lacs sont alors imposées via des climatologies de température de sol ou des zones océaniques les plus proches du lac considéré. Par exemple, la température des grands lacs américains est généralement prescrite égale à la température de la mer du Labrador. Ensuite, les flux de chaleur sensible et latente calculés à l'interface lac-atmosphère utilisent ces températures, ainsi que leurs propriétés radiatives. On comprendra bien ici tout l'enjeu qu'il y a à vouloir introduire une modélisation des lacs dans les modèles de climat ou de prévision du temps, et être en mesure de représenter leur cycle diurne. Depuis une dizaine d'années, des modèles de lacs de complexités variables ont été développés, tous basés sur une approche par bilan d'énergie par opposition à une approche par bilan de masse où les quantités d'eau seraient explicitement prises en compte. On retrouve ainsi des modèles simples comme FLake (Mironov et al., 2010), basé sur la théorie de similitude, des modèles basés sur le concept de couche de mélange comme Minlake (Riley and Stefan, 1988), mais également des modèles plus complexes destinés à représenter au mieux la structure thermique d'un lac, comme par exemple des modèles d'eddy-diffusion (Hostetler and Bartlein, 1990) ou enfin des modèles avec une fermeture de la turbulence en $k-\epsilon$ comme Simstrat (Goudsmit et al., 2002) et LAKE (Stepanenko and Lykosov, 2005). Ces différents modèles ont permis de mener des études de sensibilité ou d'impact, comme par exemple celle conduite par Samuelsson et al. (2010) qui montre l'impact des lacs sur le climat européen, avec le modèle de climat régional du Rossby Center, ou encore l'étude de Krinner and Boike (2010) sur l'impact du changement climatique si les lacs de haute latitude devaient disparaître. Le modèle VIC (Bowling and Lettenmaier, 2010) quant à lui est un modèle hydrologique de macro-échelle (développé à l'université de Washington), qui résout les bilans d'eau et d'énergie. Ce modèle de recherche a été appliqué à de nombreux bassins versants, incluant par exemple le fleuve Columbia, la rivière Ohio, ou le Mississippi, et a également fait l'objet d'études à l'échelle globale. Le CNRM a choisi l'option d'implémenter le modèle de lacs FLake (Salgado and Le Moigne, 2010) puisque les modèles de méso-échelle comme de climat ont besoin de bien représenter la température de surface et pas forcément de connaître de façon détaillée le profil thermique jusqu'au fond du lac. De plus, ce modèle a également été implémenté dans les schémas de surface du Centre Européen pour la Prévision à Moyenne Echéance (CEPMNT), du UK Met-Office, il est utilisé opérationnellement au service météorologique allemand (DWD), et il est couplé avec les modèles régionaux de climat CLM en Allemagne et RCA en Suède. Ces diverses utilisations montrent l'intérêt croissant de la communauté scientifique de mieux représenter les étendues de lacs afin d'améliorer les variables thermodynamiques et les flux de surface à l'interface lac-air et d'étudier le couplage avec l'atmosphère à méso-échelle ainsi qu'à l'échelle régionale.

1.1 La modélisation des surfaces continentales

La modélisation des surfaces continentales à Météo-France date de la fin des années 1990 avec en particulier le développement du modèle Interaction Soil Biosphere Atmosphere (ISBA, Noilhan and Planton (1989)). Le modèle propose alors une approche intéressante, nommée «force-

restore» qui modélise les transferts de chaleur et d’humidité dans le sol et est basée sur les travaux de Deardorff (1977). Celle-ci fait place en mode recherche dans les années 2000 à une approche permettant de diffuser chaleur et humidité dans le sol (Boone et al., 1999). L’ensemble des évolutions du modèle ISBA et de ses composantes est décrite dans Decharme et al. (2019). ISBA a été intégré aux modèles globaux ARPEGE pour la prévision numérique du temps (PNT) et pour le climat, ainsi qu’au modèle à aire limitée ALADIN dans les années 2000 (Giard and Bazile, 2000). Il est également couplé au modèle de recherches à méso-échelle Méso-NH (Lac et al., 2018) dès les années 1990 (Lafore et al., 1998) et au modèle de prévision numérique du temps à méso-échelle AROME opérationnel à Météo-France (Seity et al., 2011).

Le modèle AROME, remplaçant du modèle déterministe ALADIN pour la PNT sur la France, possède les caractéristiques suivantes : le cœur dynamique d’ALADIN et certaines paramétrisations physiques du modèle Méso-NH, en particulier, la turbulence unidimensionnelle, la microphysique et les paramétrisations des surfaces continentales, ces dernières étant regroupées dans une plateforme de modélisation appelée SURFEX (Masson et al., 2013) dès les années 2000.

Au CNRM, les travaux sur la modélisation des surfaces continentales concernent plusieurs groupes : le GMAP (Groupe de Modélisation et d’Assimilation pour la Prévision), qui a en charge la prévision numérique du temps, met en œuvre l’assimilation de données pour la prévision des modèles opérationnels (ARPEGE PNT et AROME), le GMGEC (Groupe de Météorologie de Grande Échelle et Climat), dont l’activité est concentrée sur l’étude et la prévision du climat, opère le modèle ARPEGE climat, le CEN (Centre d’Études de la Neige) est spécialisé sur l’étude de la neige et la prévision du risque d’avalanches et le GMME (Groupe de Météorologie de Moyenne Échelle) qui travaille plus sur les processus de surface à méso-échelle et le développement de nouvelles paramétrisations. C’est le cas en particulier du modèle ISBA, mais aussi du modèle TEB (Tow Energy Balance, (Masson, 2000)) qui modélise les surfaces urbaines. Un peu plus tard, dans les années 2010, la plateforme de modélisation SURFEX s’est enrichie d’un nouveau modèle, le modèle de lac FLake (Mironov et al., 2010), pour représenter les échanges lac-atmosphère et permettre entre autres de représenter le cycle diurne des lacs. En 2016, le couplage d’ARPEGE avec SURFEX a ouvert des voies intéressantes pour l’opérationnel, comme l’activation du modèle FLake pour améliorer le cycle diurne de la température de surface dans les régions où la densité de lacs est forte (bouclier canadien, Scandinavie,...). FLake a également été utilisé dans le modèle CNRM-CM6 qui a contribué à l’exercice d’intercomparasion CMIP6 dans le cadre de l’AR6.

1.2 Les réanalyses de surface

L’existence du modèle ISBA a ouvert la voie à des travaux de recherches en hydrologie, en particulier pour étudier et assurer le suivi des débits des grands fleuves ainsi que les variations de la ressource en eau de certains bassins versants au cours du temps, pour les grands bassins français dans un premier temps, mais aussi plus généralement en Europe et à travers le monde. Les travaux menés par Joël Noilhan sur ISBA ont permis d’aborder des disciplines comme l’hydrologie, en particulier le cheminement de l’eau de l’atmosphère vers la surface, le sol et le sol profond avant de rejoindre les aquifères et les rivières. Cette eau, issue des précipitations, de la fonte de la neige de montagne, de la condensation de la vapeur atmosphérique, comme du ruissellement de surface a fait l’objet d’études de recherche à travers plusieurs thèses qu’il a encadrées. Ainsi Habets (1998) a étudié l’évolution hydrométéorologique du bassin de l’Adour, Etchevers (2001)

s'est focalisé sur le bassin du Rhône, influencé par la neige, Voirin (2003) sur le sud-ouest de la France et en particulier le bassin Adour-Garonne, avec des travaux orientés vers l'agriculture et la modélisation de l'irrigation, et enfin Rousset (2010) s'est intéressée au bassin de la Seine, en y étudiant la prévision d'ensemble des débits. Ces études hydrométéorologiques reposent sur des simulations longues offline, guidées par des variables atmosphériques proches de la surface (température et humidité de l'air, pression de surface, vent, rayonnements solaire et infrarouge et taux de précipitations liquides et solides), et permettant d'étudier la climatologie des débits des grands fleuves français et des composantes hydrologiques de surface et du sous-sol. Lors de ces simulations, le modèle ISBA est couplé au modèle hydrologique MODCOU (Ledoux et al., 1989) qui assure un transfert de l'eau en surface grâce à un réseau de routage adapté ainsi que son transfert vers les couches aquifères plus profondes et les rivières. MODCOU calcule l'évolution des débits en rivière ainsi que les variations des hauteurs de nappes. L'ensemble de ces thèses a bénéficié de la mise en place d'une réanalyse de surface SAFRAN pour alimenter le modèle ISBA en données météorologiques, d'abord sur le massif alpin (Durand et al., 1993), puis sur la France (Le Moigne, 2002; Quintana-Segui et al., 2008) et ayant également contribué à des études hydro-climatiques (Vidal et al., 2010; Le Moigne et al., 2020). En effet, les réanalyses atmosphériques et de surface permettent de disposer d'un jeu de données grillées proches de la surface, à haute résolution et très utiles pour les études climatologiques, le débiaisage des modèles de climat, la reconstruction de variables lorsqu'il n'y a pas d'information disponible.

1.3 Démarche scientifique

Mes travaux de recherche, réalisés par moi-même ou par l'encadrement de doctorants, post-doctorant·e·s ou stagiaires, se sont concentrés sur les surfaces continentales, en essayant de les aborder de façon intégrée, c'est-à-dire en étudiant les aspects de modélisation, mais également la préparation en amont des forçages atmosphériques permettant la mise au point et la validation des modèles, pour aller jusqu'aux applications aval, comme ce qui avait été initié par Joël Noilhan lors de ses travaux de recherche. J'ai contribué à des travaux spécifiques sur les bases de données de paramètres de surface qui sont nécessaires aux modèles et leurs paramétrisations. J'ai également contribué significativement au développement de la plateforme de modélisation des surfaces continentales SURFEX. En particulier une partie importante de mes travaux de recherche a été axée sur la modélisation des lacs et l'étude de leur rôle dans les échanges surface-atmosphère. Pour cela j'ai eu l'occasion d'organiser une campagne de mesures internationale sur les lacs dans le sud de la France, qui a permis de valider le modèle localement en mode offline, mais aussi d'en évaluer l'impact dans une simulation régionale en mode couplé avec le modèle Mésos-NH, avant d'étendre l'évaluation à l'échelle globale en vue d'une utilisation dans le modèle de climat CNRM-CM. J'ai la plupart du temps travaillé avec des simulations offline pour étudier les processus de surface ou la sensibilité de certaines paramétrisations aux forçages atmosphériques ou aux options choisies et ai donc été amené à travailler dès les années 2000, sous l'impulsion de Joël Noilhan, sur une réanalyse des paramètres de surface (SAFRAN) pour alimenter les modèles de surface (comme ISBA par exemple). J'ai complété cette approche offline par des simulations couplées à haute résolution (de l'ordre de quelques centaines de mètres) avec Mésos-NH et à plus basse résolution (quelques dizaines de kilomètres) lors de simulations couplées entre SURFEX, incluant son modèle de lacs, et le modèle de climat CNRM-CM. Lors de chaque étude que j'ai pu réaliser, je me suis attaché à disposer des observations nécessaires pour pouvoir confronter les résultats

des simulations numériques avec la réalité. Le plan du mémoire est basé sur cette démarche : le chapitre 1 présente mes sujets de recherche et comment je les ai abordés, le chapitre 2 traite de la modélisation des surfaces continentales et comment j'y ai contribué, le chapitre 3 présente mes travaux sur les réanalyses de surface. Enfin, mes travaux en cours et mes perspectives en matière de recherche sont présentés dans le chapitre 4.

1.4 Cursus et parcours professionnel

Je suis responsable de l'équipe CNRM/GMME/SURFACE depuis 2015, j'ai 57 ans et suis Ingénieur Hors Classe des Travaux de la Météorologie, Chef d'Unité Technique. Je suis entré à Météo-France en 1988 par le « concours ingénieur externe ». J'ai effectué mon stage de recherche de fin de scolarité ITM dans l'équipe EAC du groupe climat CNRM/GMGEC sous la direction de Michel Déqué et Serge Planton, où j'ai travaillé pendant 6 mois sur la modélisation et la réalisation de cartes globales de paramètres de surface pour le modèle ISBA. En sortie d'école j'ai fait un court passage en tant que responsable de la station militaire de Cognac, avant de rejoindre 8 mois plus tard, soit en 1993, le CNRM/GMAP pour travailler sur le modèle ALADIN. J'ai en particulier travaillé sur la réalisation de cartes de paramètres de surface pour ALADIN et de leur utilisation opérationnelle, dans la continuité de mes travaux de stage d'approfondissement. En 1999, j'ai rejoint le groupe CNRM/GMME et l'équipe MC2 dirigée par J Noilhan pour travailler, en tant qu'ingénieur de recherche, à la mise en place et l'évaluation de la réanalyse SAFRAN sur la France à l'origine de la chaîne hydrométéorologique SAFRAN-ISBA-MODCOU (Habets et al., 2008; Le Moigne et al., 2020). Quelques années plus tard j'ai contribué au développement de la plateforme de modélisation SURFEX, dont j'ai assuré, la maintenance, la formation et une partie des développements. J'ai rejoint le groupe des chercheurs de Météo-France en 2012, avec une activité de recherche plus spécifique sur la modélisation des lacs et les réanalyses de surface.

A ce jour, l'équipe CNRM/GMME/SURFACE est composée de 9 personnels permanents, dont 4 chercheurs (CNRS, CRDD, Météo-France), 5 ingénieurs techniciens administratifs, 3 docteur-e-s, 1 visiteur scientifique et 6 post-doctorant-e-s. L'objectif principal de l'équipe est d'améliorer la connaissance, la compréhension et la modélisation des processus de surface. L'activité se décline en 4 thèmes complémentaires : le développement de la plateforme de modélisation SURFEX et le soutien aux utilisateurs, l'étude des processus couplés surface-atmosphère, les réanalyses de surface, l'hydrologie et l'impact du changement climatique sur la ressource en eau. J'ai un rôle de coordination des différentes activités permettant d'être en phase avec les objectifs du laboratoire, qui sont discutés et validés chaque année. Je coordonne également les évolutions du modèle SURFEX qui est utilisé par un nombre croissant d'utilisateurs, en particulier par les membres du consortium ACCORD¹, mais bien sûr en priorité par l'ensemble des modèles de Météo-France. Cette coordination, que j'anime, s'effectue au travers d'un comité de pilotage international de SURFEX. Mes travaux de recherche sont plus spécifiquement orientés vers la modélisation des lacs à différentes échelles, et concernent des activités de recherche à méso-échelle avec Méso-NH comme à l'échelle globale dans ARPEGE pour la PNT et le climat. Mes travaux en matière de réanalyses de surface ont contribué à proposer la réanalyse SAFRAN sur la France métropolitaine, à travailler sur son remplacement et à contribuer à des projets structurants de réanalyses à l'échelle européenne dans le cadre du programme Copernicus.

1. <https://www.umr-cnrm.fr/accord/?Edito>

J'ai co-encadré 3 thèses et j'en co-encadre actuellement 2. J'ai encadré ou co-encadré 5 post-doctorants. Je suis auteur de 43 publications dont 38 de rang A et 28 depuis que je suis chercheur. Le détail de mes publications est donné en section 7.

Points clés :

- Responsable d'organiser la recherche au sein de l'équipe SURFACE du CNRM
- Encadrement de doctorants et post-doctorant-e-s
- Activité de recherche dans le domaine de la modélisation des surfaces
- Activité de recherche dans le domaine de la réanalyse de surface

CHAPITRE 2

La modélisation des surfaces continentales

Depuis plusieurs décennies, la modélisation des échanges à l'interface surface-atmosphère représente un enjeu important pour la compréhension et l'étude des processus à l'interface, leurs rôles dans l'occurrence d'événements extrêmes, mais aussi pour le suivi du changement climatique, et la recherche de stratégies d'adaptation. Par ailleurs, la demande globale en eau, en énergie, ainsi que la production de gaz à effet de serre représentent des enjeux sociétaux majeurs auxquels les modèles de type système Terre peuvent apporter des éléments de réponse (Decharme et al., 2019; Balsamo and Mahfouf, 2020). Une demande croissante d'études des impacts du changement climatique sur la ressource en eau, incluant l'hydrologie, la fonte des glaciers arctiques, et les possibles conséquences sur les phénomènes de surcôtes a vu le jour ces dernières années. En parallèle, la résolution croissante des modèles nécessite une description fine des surfaces et des paramétrisations physiques adaptées pour simuler les échanges entre la surface et l'atmosphère. Les années 1990 ont fait l'objet de recherches et développements importants pour modéliser les flux à l'interface surface-atmosphère (Planton et Mahfouf, 2020). Un peu plus tard, dans les années 2000, à la création du modèle de méso-échelle AROME (Seity et al., 2011) pour la prévision numérique du temps sur la France, certaines paramétrisations physiques du modèle de recherche Meso-NH (Lac et al., 2018) ont été intégrées à AROME, comme le schéma microphysique (ICE3), le schéma de turbulence (unidimensionnel en énergie cinétique turbulente) ou le schéma de convection peu profonde en flux de masse. D'autres ont été entièrement externalisées comme ce fut le cas du modèle de surface, donnant naissance à la plateforme de modélisation SURFEX (Masson et al., 2013; Le Moigne and Minvielle, 2020). Au-delà du modèle de prévision AROME, le but de SURFEX est de mutualiser les efforts de recherche et développement pour permettre l'utilisation de modèles scientifiques identiques pour une grande variété d'applications. SURFEX peut être utilisé en mode couplé avec l'atmosphère, comme dans le cas des modèles de prévision numérique du temps (AROME, ARPEGE) et de climat (Voldoire et al., 2019, CNRM-CM), ou non couplé, c'est-à-dire sans rétroaction de la surface vers l'atmosphère. SURFEX est alors guidé par des séries temporelles de variables proches de la surface, générées à partir d'observations, de sorties de modèles ou encore de réanalyses. C'est le cas par exemple de la chaîne de prévision du risque d'avalanches dont l'élément central est le schéma de neige Crocus (Vionnet et al., 2012). SURFEX décrit les flux de surface et leur évolution pour quatre types de surface : la nature, la ville, les eaux intérieures et l'océan. SURFEX simule les flux de quantité de mouvement, de chaleur et d'eau et

peut simuler les flux de dioxyde de carbone, d'espèces chimiques, d'aérosols continentaux, de sels marins et de particules de neige à l'interface avec l'atmosphère. SURFEX simule ainsi les bilans d'énergie et d'eau en surface, et pour les surfaces continentales, calcule l'évolution des stocks d'eau dans le sol en fonction des précipitations, du ruissellement de surface, de l'infiltration de l'eau dans les couches de sol et de l'évaporation incluant la transpiration des plantes. Dès lors, SURFEX peut être couplé à des modèles hydrogéologiques pour simuler les débits des rivières et les variations de hauteur des nappes, et être comparé à des observations à des fins de validation par des observations indépendantes.

2.1 La plateforme de modélisation SURFEX

Depuis son origine, j'ai contribué au développement de la plateforme SURFEX et ai assuré support et formation scientifiques et techniques aux utilisateurs.

2.1.1 Principe général

La plateforme de modélisation SURFEX a été conçue de manière modulaire afin de faciliter l'implémentation de nouveaux développements techniques et scientifiques inhérents à la préparation des champs physiographiques, à l'initialisation des variables pronostiques des différents schémas, aux paramétrisations physiques ainsi qu'aux algorithmes d'assimilation de données. SURFEX se base sur une approche de type mosaïque (ou par tuiles) pour représenter les hétérogénéités de surface et prendre en compte la grande variabilité des types de surfaces à l'échelle de la maille des modèles. Ainsi quatre tuiles principales sont définies correspondant aux surfaces naturelles (composées de sol nu, rochers, neige permanente et végétation), aux surfaces urbanisées (incluant bâtiments, routes et aéroports), aux eaux intérieures (comme les lacs, les réservoirs et les rivières) et aux mers et océans. SURFEX prend aussi en compte l'hétérogénéité au sein des surfaces naturelles continentales. Cette approche permet en particulier de séparer les surfaces non végétalisées des surfaces végétales, chacune de ces dernières ayant des caractéristiques différentes en termes de profondeur de sol, de longueur de rugosité, d'albédo ou d'indice foliaire et donc des comportements potentiellement différents lorsqu'elles sont soumises aux mêmes forçages climatiques. Concernant les surfaces végétalisées, SURFEX considère également différents types fonctionnels de plante (TFP), permettant ainsi de représenter les différents modes d'évolution de la végétation à l'intérieur d'une même maille du modèle. Cette séparation des surfaces végétales en TFP est importante car elle permet de mieux simuler les flux de surface en général. Elle est nécessaire pour simuler le cycle du carbone et représenter correctement l'assimilation du CO₂ par les plantes, car les différents types de végétaux sont caractérisés par des paramètres distincts (indice foliaire, profondeur racinaire, albédo, etc.) correspondant à des valeurs observées. Cependant de nombreuses applications utilisent une tuile unique pour représenter la végétation, c'est le cas des modèles de prévision numérique du temps, où les paramètres des TFP sont alors regroupés selon des règles spécifiques (Noilhan et al., 1997) pour définir des paramètres effectifs représentatifs d'une végétation moyenne sur chaque maille du modèle. À l'échelle internationale, SURFEX est à l'état de l'art pour ses applications de recherche depuis plusieurs années pour de nombreuses paramétrisations, comme par exemple, le schéma de diffusion de température et de vapeur dans le sol ou les schémas de neige multicouches, ainsi que la paramétrisation des sur-

faces urbaines. Il n'en est pas de même pour les applications opérationnelles de Météo-France mais des efforts pour améliorer la représentation de la physique de surface sont en cours. Les autres grands centres de prévisions météorologiques ont des schémas de surface qui évoluent aussi vers des physiques proches de celle de SURFEX. À titre d'exemple, HTESSEL du CEPMMT, JSBACH du DWD, NOAH-MP du NCEP ou JULES du UKMO ont développé ces dernières années des schémas multicouches pour le sol et la neige à des fins opérationnelles.

2.1.2 Les bases de données de surface

La caractérisation des types de surface est obtenue via la base de données d'occupation des sols ECOCLIMAP (Faroux et al., 2013; Calvet and Champeaux, 2020) avec laquelle SURFEX est interfacé. Cette base de données, globale et kilométrique, est composée de plus de 550 écosystèmes différents. Cette classification des écosystèmes combine cartes d'occupation des sols et informations satellitaires sur la période 1999-2006, et prend en compte la variabilité géographique et phénologique de la végétation. En complément, des tables de correspondance dans SURFEX associent aux différents écosystèmes d'ECOCLIMAP les paramètres des modèles physiques nécessaires (longueur de rugosité, albédo, indice foliaire, etc.). Afin d'améliorer le réalisme des cartes de surface, représentatifs de la végétation et des zones urbanisées d'il y a une vingtaine d'années, de nouveaux algorithmes ont été développés dans l'équipe SURFACE pour prendre en compte des données satellitaires plus récentes et à plus haute résolution. Ainsi de nouvelles cartes de paramètres de surface à 300m de résolution horizontale ont été produites et sont directement utilisables par les modèles de SURFEX. À titre d'exemple, la figure 2.1 montre un zoom (en (b)) sur la région parisienne de la nouvelle carte d'occupation des sols élaborée à partir des données de l'agence spatiale européenne (projet « initiative sur le changement climatique » ESA-CCI¹).

2.1.3 Modélisation des surfaces

L'évolution des variables biophysiques du sol et de la végétation et leurs interactions avec l'atmosphère sont calculées par le modèle de surface terrestre ISBA (Noilhan and Planton, 1989, Interactions Sol Biosphère Atmosphère), qui intègre aujourd'hui des schémas explicites de sol et de neige multicouches (Decharme et al., 2011, 2016), qui permettent une représentation plus précise des échanges de chaleur et d'eau au sein de ces milieux. De nombreux travaux sur la représentation des variables de végétation et de carbone ont également été menés et ont contribué à mieux simuler l'évapotranspiration grâce notamment à une représentation simplifiée de la photosynthèse des plantes (Calvet et al., 1998) mais aussi à la prise en compte de l'évolution de la biomasse et du cycle du carbone terrestre (Delire et al., 2020). Enfin, le réalisme de certains processus hydrologiques sous-maille a été amélioré (Habets et al., 1999a,b; Decharme et al., 2019), comme le ruissellement de surface sur zones saturées, le ruissellement par excès d'infiltration d'eau dans le sol, ou à plus grande échelle l'impact des hétérogénéités causées par la variabilité spatiale de l'intensité des précipitations.

L'évolution des variables des surfaces urbaines est calculée par le modèle de ville TEB (Town Energy Balance) (Lemonsu et al., 2004). Dans TEB, la ville est représentée par un canyon (Masson, 2000) composé d'un toit, d'une route et de deux murs se faisant face, pour lesquels des bilans

1. <https://www.esa-landcover-cci.org/>

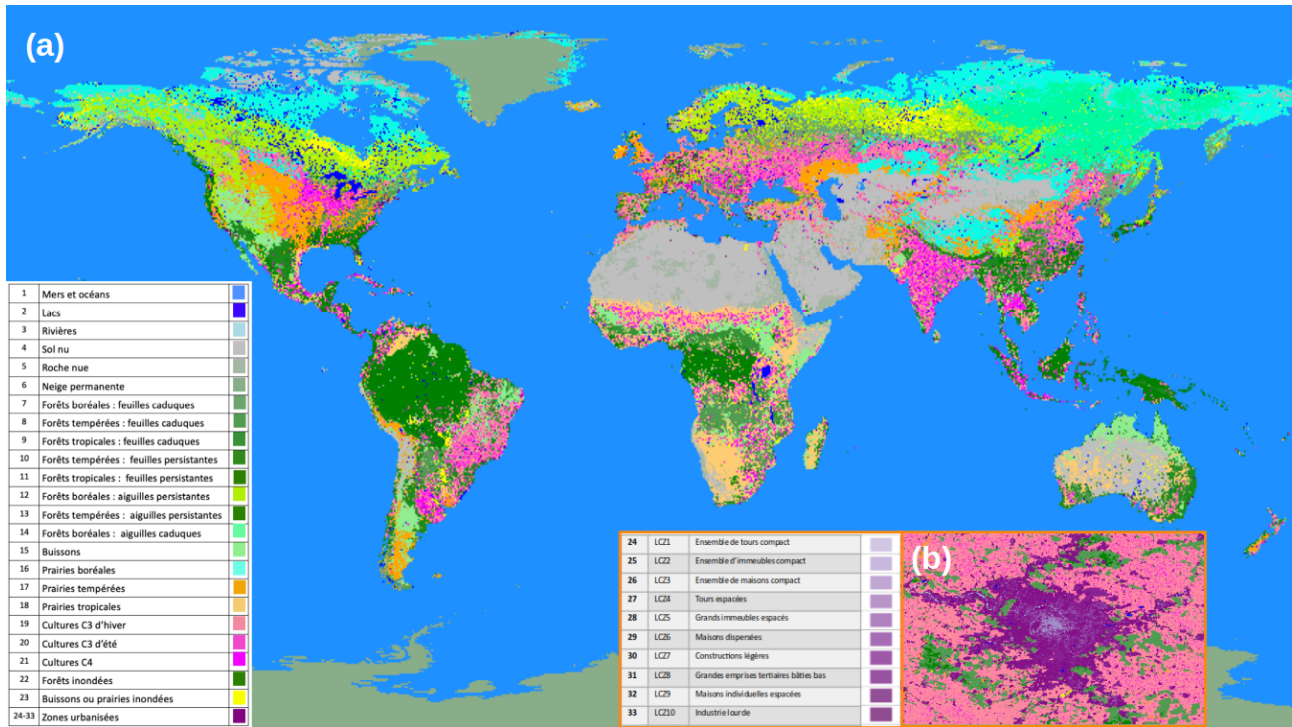


FIGURE 2.1 – Classification globale de l'occupation des sols (a) et zoom sur Paris (b), à 300m de résolution utilisable dans SURFEX.

d'énergie séparés sont calculés. Les principaux processus pris en compte dans TEB sont le piégeage de l'énergie radiative dans le canyon, la représentation des flux de chaleur anthropiques, l'interception de l'eau et de la neige par les toits et les routes, les interactions entre les surfaces bâties et l'air du canyon. Par ailleurs, TEB modélise le stockage de chaleur à l'intérieur des bâtiments (Bueno et al., 2012), et l'effet des surfaces naturelles dans la ville, comme les toits végétalisés ou les arbres dans les rues, dont l'évolution est calculée par le modèle ISBA (De Munck, 2013).

Sur mers, océans et lacs, SURFEX offre plusieurs possibilités pour le calcul des flux et de la température de surface (SST pour Sea Surface Temperature). Pour des simulations de quelques jours, la prise en compte de l'évolution du cycle diurne de température de surface devient importante en particulier dans le cas de couplages marqués entre la surface et la couche limite atmosphérique. Sur mers et océans, un modèle de couche de mélange océanique unidimensionnel permet de calculer l'évolution de la SST, de la salinité, des courants, le mélange vertical turbulent étant calculé à partir des transferts verticaux d'énergie cinétique turbulente dans l'eau (Lebeaupin-Brossier et al., 2009). Par contre, pour des simulations climatiques couvrant plusieurs années, SURFEX doit être couplé avec un modèle tridimensionnel d'océan et de glace de mer afin de reproduire la circulation océanique et les transferts de chaleur associés. Ce couplage nécessite l'utilisation d'un coupleur (OASIS-MCT disponible dans SURFEX) pour prendre en compte des grilles différentes entre atmosphère et océan (Voltaire et al., 2019).

Pour les lacs, il est également important de représenter le cycle diurne de température dans les modèles de prévision numérique du temps et de climat, en particulier dans les régions à forte densité de lacs. C'est donc pour ces raisons que le modèle de lac FLake (Mironov et al., 2010) a été implémenté dans SURFEX, grâce à un travail collaboratif avec Rui Salgado de l'Université d'Evora. FLake est un modèle simple à deux couches, la thermocline, zone stratifiée dont la forme

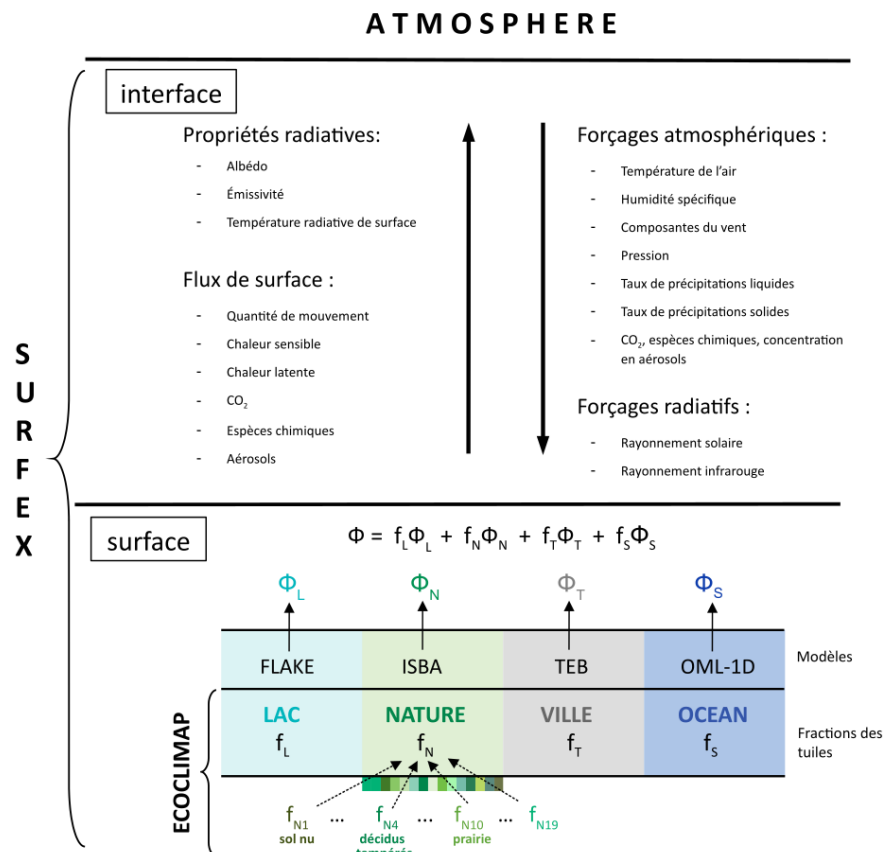


FIGURE 2.2 – Principe de couplage surface-atmosphère de SURFEX (figure tirée de Le Moigne and Minvielle (2020)).

est paramétrée, surmontée de la couche de mélange qui s'étend jusqu'à la surface. L'extension verticale de la couche de mélange est calculée dans le modèle par une équation d'entraînement et les températures du fond du lac, de surface ainsi que la forme de la thermocline sont mises à jour à chaque pas de temps. La surface du lac est constituée d'eau libre, de glace lorsque celui-ci gèle, ou de neige en hiver si celle-ci se dépose sur la glace déjà formée.

2.1.4 Couplage avec l'atmosphère et l'hydrologie

Un des intérêts majeurs de SURFEX est de pouvoir être couplé avec différents modèles atmosphériques. Le principe du couplage, illustré sur la figure 2.2, repose sur une interface standard des échanges surface-atmosphère, où chaque parcelle d'air échange avec une parcelle de surface unique. À chaque pas de temps du modèle couplé, le niveau le plus bas de l'atmosphère contraint donc la surface en température, humidité, précipitations, vent et rayonnements solaire et infrarouge. Le couplage entre la surface et l'atmosphère est unidimensionnel et est réalisé par l'échange de quantités moyennes au niveau des mailles du modèle couplé. SURFEX calcule donc les bilans d'énergie pour chacune des quatre tuiles principales, nature, ville, lac, océan, et le cas échéant des TFP, puis agrège ces flux au niveau de la surface en tenant compte de la fraction de chaque tuile. L'ensemble de ces flux moyens de chaleur, d'humidité, de quantité de mouvement, d'espèces chimiques est alors renvoyé à l'atmosphère. En complément, la température de surface

radiative, l'albédo et l'émissivité moyens sont également retournés à l'atmosphère et servent de conditions à la limite inférieure aux schémas de rayonnement et de turbulence.

En complément du couplage avec l'atmosphère, le couplage de SURFEX à l'hydrologie permet d'étudier le cycle de l'eau aux échelles régionale et globale. En effet, au niveau des surfaces continentales, SURFEX simule le ruissellement de surface et l'infiltration de l'eau dans le sol. Ces deux flux d'eau peuvent alors alimenter des modèles hydrogéologiques, respectivement au niveau du réseau de routage en surface et dans les aquifères, afin d'estimer les débits des rivières et l'évolution des hauteurs des nappes. Ces estimations s'avèrent très importantes car, dans de tels systèmes complexes, qui combinent les effets de l'atmosphère et de la surface, la validation par des comparaisons de données indépendantes comme les débits, permet d'évaluer objectivement les performances des modèles, en particulier de SURFEX lorsqu'il est forcé par des observations. A l'échelle régionale, SURFEX est utilisé dans la chaîne hydrométéorologique SIM (Habets et al., 2008; Le Moigne et al., 2020) pour le suivi de la ressource en eau, guidée par la réanalyse SAFRAN et dont le ruissellement de surface et l'infiltration de l'eau dans le sol calculés par ISBA alimentent le modèle hydrogéologique MODCOU (Ledoux et al., 1989) pour le calcul des débits journaliers. Enfin, à l'échelle globale, SURFEX est couplé avec le modèle CTRIP (Decharme et al., 2019; Munnier and Decharme, 2022) et est utilisé pour étudier la partie continentale du cycle hydrologique global. En particulier, le couplage avec un aquifère profond permet de simuler les inondations à l'échelle de la saison et de quantifier leur impact sur le bilan d'énergie et en particulier le flux d'évapotranspiration.

2.2 Le modèle de lac FLake

À partir de 2008, je me suis intéressé plus particulièrement aux lacs, à leur représentation dans les modèles et leur effet sur le développement de la couche limite. Le fonctionnement dynamique des lacs est régi principalement par la température et le vent. En été, le réchauffement de la température de l'eau des couches proches de la surface va favoriser l'évaporation et stabiliser le milieu en augmentant la stratification et en créant une couche mélangée plus chaude que la thermocline qu'elle surplombe. À l'automne, le refroidissement de l'air et l'action du vent favorisent le mélange des masses d'eau, et généralement la stratification disparaît au profit de profils verticaux plus uniformes, car les eaux plus froides vont plonger et initier le déclenchement de la convection. L'hiver est caractérisé par un refroidissement sensible de la température de l'eau sur toute la verticale qui atteint un minimum de $3,98^{\circ}\text{C}$ au fond, correspondant à la température de densité maximale de l'eau pure de densité 1000 kg/m^3 . À partir de $3,98^{\circ}\text{C}$ le froid ne peut plus descendre en profondeur, car l'eau se dilate en se refroidissant, il reste donc bloqué car la convection est stoppée et permet ainsi la formation de glace. La glace moins dense que l'eau reste en surface et de la neige peut s'y déposer si les conditions météorologiques le permettent, et ainsi renforcer le caractère isolant d'un lac gelé enneigé. Le profil thermique est alors inversé avec une température de surface proche de zéro degré et une température au fond limitée à la température de densité maximale. Au printemps, le réchauffement fait fondre neige et glace et le vent va remélanger les eaux. Jusque dans les années 2010, les lacs étaient représentés de façon assez simple dans les modèles, ils n'avaient en particulier pas la possibilité de représenter les variations journalières de température. Or la température des lacs peut varier assez fortement au cours d'une journée, c'est le cas par exemple aux intersaisons lorsque les lacs gèlent ou fondent, processus physiques qui modifient sensiblement les caractéristiques des lacs (albédo, longueur de



FIGURE 2.3 – Dispositif instrumental déployé sur une table à huîtres sur l'étang de Thau pendant la campagne de mesures Thaumex.

rugosité) et donc les échanges à l'interface avec l'air. J'ai donc travaillé avec Rui Salgado, professeur à l'université d'Évora au Portugal, sur l'implémentation d'un modèle de lac dans SURFEX. À cette époque, plusieurs centres météorologiques testaient le modèle FLake (Mironov et al., 2010), car il présentait l'avantage d'être un modèle physique simple à deux couches et peu coûteux, ce qui était un pré-requis pour une utilisation en prévision numérique du temps. Nos travaux de modélisation ont consisté à interfacier FLake dans SURFEX (Salgado and Le Moigne, 2010) en y intégrant toutes les spécificités requises, c'est-à-dire dans un premier temps le calcul des paramètres intrinsèques aux lacs (profondeur totale, coefficient d'extinction du rayonnement, etc.), à la résolution du modèle, à partir de bases de données existantes, ensuite, l'initialisation des variables pronostiques du modèle, et enfin l'appel au modèle physique permettant de calculer les évolutions temporelles de ces variables. Le modèle a été évalué grâce à des simulations offline guidées par des mesures climatiques acquises sur le lac d'Alqueva au Portugal, le plus grand réservoir artificiel d'Europe, en comparant des profils de températures de l'eau à des observations in situ. Cette première évaluation unidimensionnelle constituait une étape nécessaire avant une utilisation plus systématique dans les modèles. L'année suivant la publication des résultats sur Alqueva, j'ai organisé une campagne de mesures internationale, sur l'étang de Thau dans le sud de la France, afin de comprendre le fonctionnement du modèle dans un environnement différent de celui d'Alqueva et de réaliser les premières simulations couplées à méso-échelle avec FLake dans SURFEX (Le Moigne et al., 2013). En effet, l'étang de Thau est peu profond (4 m) comparé à Alqueva (27 m) et il est influencé par la Méditerranée, en termes de salinité et de circulations estivales de brises de mer. Un lac peu profond va avoir tendance à être mélangé la plupart du temps, surtout si l'eau est peu turbide, favorisant ainsi la pénétration du rayonnement solaire jusqu'au fond du lac. La campagne de mesures a consisté à acquérir des données météorologiques dites lentes grâce à notre collaboration avec l'IFREMER de Sète, en charge de la surveillance de la lagune de Thau, et qui disposait d'une station d'acquisition située sur une table à huîtres. Le soutien de l'équipe CNRM/4M en charge des mesures au sol a permis de renforcer le dispositif et d'y adjoindre des mesures de rayonnement, de flux par eddy-covariance, et de profil de température dans l'eau à l'aplomb de la table (Fig. 2.3).

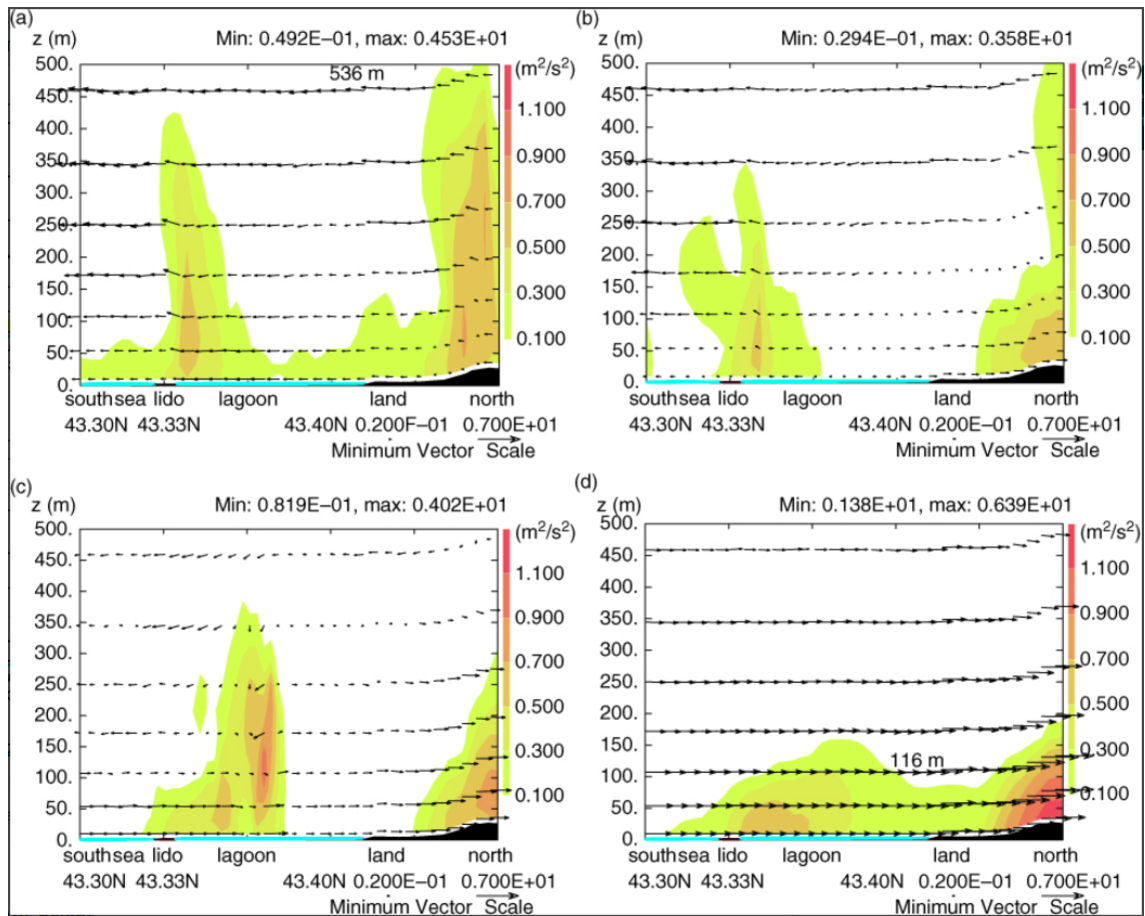


FIGURE 2.4 – Coupe verticale d'énergie cinétique turbulente et vent pendant la POI2 de THAUMEX. (a), (b), (c) and (d) correspondent respectivement à 09, 10, 11 et 12 TU.

Par ailleurs, la participation de Rui Salgado et de son doctorant Miguel Potes de l'université d'Évora a permis de compléter le dispositif par des mesures spectrométriques pour essayer de déterminer les propriétés optiques de l'eau et en déduire comment la lumière était atténuée en profondeur. Potes et al. (2013) ont mis au point un dispositif basé sur une fibre optique intégrée à un ensemble de tubes en PVC afin d'étudier la pénétration du rayonnement solaire dans l'eau. L'ensemble de ce dispositif était complété par le lancer de radiosondages toutes les 3 heures lors de Périodes d'Observations Intensives (POI) visant à documenter les profils de température, humidité et vent en altitude lors de situation de brise. En tout 3 POIs, correspondant à des journées calmes, peu nuageuses et pendant lesquelles une brise de mer était prévue, ont été sélectionnées grâce à la prévision locale des prévisionnistes de Montpellier, avec lesquels j'étais en contact permanent. La campagne THAUMEX a été l'occasion de valider le modèle localement sur l'étang de Thau, de réaliser le couplage de FLake avec le modèle Méso-NH pour modéliser les circulations de brises, et a permis en particulier lors de la POI2 de mettre en évidence le rôle de la lagune dans le déclenchement de circulations très locales avant l'arrivée de la brise de mer régionale (Fig. 2.4). Ce travail a fait l'objet d'une publication scientifique (Le Moigne et al., 2013).

2.3 Apport du modèle FLake dans CNRM-CM

L'étude numérique avec Méso-NH sur l'étang de Thau a validé les travaux de couplage de SURFEX et FLake et nous a naturellement poussé à aller plus loin, c'est-à-dire tester l'impact d'utiliser un modèle de lac dans des simulations climatiques (Le Moigne et al., 2016). En effet, les lacs dans la plupart des modèles de PNT et de climat sont représentés assez sommairement. En particulier, leur température est initialisée avec la température de la mer du point de mer le plus proche et n'évolue pas au cours d'une simulation. Utiliser FLake dans le modèle de climat ARPEGE CNRM-CM permet de représenter le cycle diurne de la température de surface des lacs. L'impact attendu concerne essentiellement les plus grands lacs qui sont résolus par le modèle ayant une résolution horizontale d'environ 0.5 degrés. En effet à ces résolutions, les mailles couvertes par une petite surface d'eau ont très peu d'impact sur le couplage avec l'atmosphère car c'est la partie surface naturelle qui domine les échanges en matière de flux. Le modèle global de climat étant déjà interfacé avec SURFEX, l'activation du modèle de lacs FLake était donc simple, mais a quand même nécessité un travail d'adaptation du code avec Bertrand Decharme (GM-GEC) pour vérifier la bonne conservation de l'énergie, élément indispensable dans un modèle de climat. Cependant avant de lancer des simulations longues (de type AMIP i.e. avec une SST prescrite) il était nécessaire d'ajuster les paramètres de FLake. Des simulations offline ont donc été réalisées, guidées par la réanalyse ERA-Interim (Dee et al., 2011) sur un nombre limité de lacs pour lesquels des mesures satellitaires de température de surface et de durée d'englacement étaient disponibles. La calibration a permis de limiter à 60 m la profondeur totale utilisable par FLake (comme FLake est un modèle simplifié à deux couches, il n'est pas capable de représenter correctement les profils de température lorsque la profondeur totale dépasse 60 m). Par ailleurs, l'albédo du lac a également été calibré pour les périodes froides, c'est-à-dire quand le lac est gelé ou couvert de neige. En effet, les comparaisons aux observations ont montré que le gel était bien trop tardif, avec pour certains lacs boréaux un décalage pouvant atteindre 2 mois. Les raisons sont de plusieurs ordres. Tout d'abord, le module de neige de FLake n'a jamais fait vraiment l'objet de validations poussées. L'auteur du modèle l'a bien documenté et encourage les utilisateurs à être prudents quant à son utilisation, allant même jusqu'à recommander de ne pas l'utiliser. Dans ce cas la paramétrisation de la neige se fait au travers de l'albédo de la glace de surface. Par ailleurs, dans le modèle, pour dégeler une maille couverte de glace il faut lui apporter l'énergie suffisante pour faire fondre de manière homogène une certaine épaisseur, ce qui est loin de représenter la réalité. En effet, les lacs commencent généralement à dégeler lorsque la glace devient suffisamment fine par endroit et qu'elle se craquelle, le dégel se propage alors progressivement partout et il y a un mélange glace/eau qui accélère le dégel. Pour essayer de représenter la cohabitation entre glace et eau au sein d'une même maille, j'ai proposé de baisser l'albédo de la glace à 0.4 au lieu de 0.7, ce qui en facilite la fonte. Le dernier paramètre à régler est le coefficient d'extinction de la lumière dans l'eau, qui régule la quantité d'énergie solaire qui va pénétrer suivant une loi de Beer-Lambert. Le dernier changement que j'ai apporté au modèle FLake a consisté à implémenter une paramétrisation de la température de peau afin de mieux représenter les échanges avec la couche d'air avec laquelle un lac est en contact. L'idée était de résoudre l'équation unidimensionnelle du transfert de chaleur dans un lac, dans lequel la dérivée totale de la température est en équilibre avec la somme d'un terme de diffusion de la température et d'un terme source généré par la divergence du flux de rayonnement solaire (en ayant négligé la divergence du flux de rayonnement infrarouge, hypothèse classique). L'impact de cette paramétrisation du calcul de la température de surface est visible sur la figure 2.5 qui indique une baisse de l'erreur quadratique

moyenne de 0.1°C en moyenne sur l'ensemble des 200 lacs de l'étude, par rapport à l'expérience la mieux calibrée.

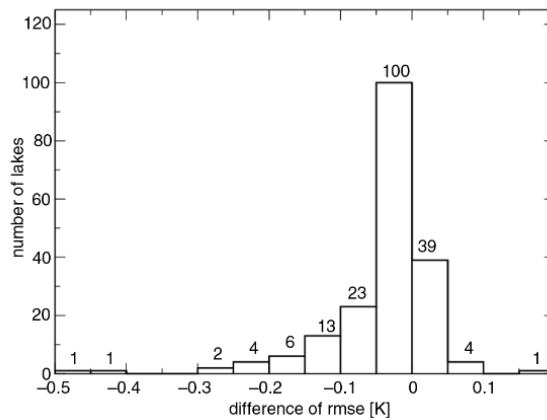


FIGURE 2.5 – Histogramme des différences d'erreur quadratique moyenne entre la simulation optimale avec et sans la paramétrisation de la température de peau activée.

Les résultats ont montré que FLake simulait correctement les températures de surface et arrivait à corriger la durée pendant laquelle les lacs étaient gelés. Cette configuration optimale a ensuite été utilisée dans des simulations couplées avec le modèle de climat CNRM-CM5. Afin d'évaluer l'impact potentiel du modèle FLake, des simulations avec et sans l'activation du modèle ont été réalisées. Dans les simulations sans le modèle FLake, les surfaces de lacs ont été remplacées par de la végétation. Les principaux résultats, conformes à ce qui était attendu, sont décrits ci-après et illustrés sur la figure 2.6.

La prise en compte des lacs dans les simulations CNRM-CM5 affecte principalement les variables thermodynamiques, température et humidité, dans la couche limite. En hiver, lorsqu'un lac n'est pas gelé alors que son environnement l'est ou est couvert de neige, la température de surface est plus élevée. C'est le cas des Grands Lacs au Canada qui accumulent beaucoup d'énergie pendant la saison chaude. Lorsqu'un lac est gelé, voire couvert de neige, l'effet de les simuler dépend de la végétation qu'ils remplacent. Si c'est de la végétation basse comme la toundra, elle sera couverte de neige et l'effet sera très limité. Par contre en présence d'arbre, comme dans la taïga, les lacs gelés remplacent des surfaces naturelles couvertes de forêts, donc ont un albédo plus fort qui peut impacter directement le bilan d'énergie. En hiver, les différences sur la température de surface (avec et sans lac) impactent directement les températures de l'air à 2 m, et constituent une amélioration lorsque FLake est activé, grâce à une diminution de certains biais. Au printemps et en automne, les résultats sont plus mitigés, dans certaines régions les biais de température sont réduits alors qu'ils sont augmentés dans d'autres. Au printemps, le fait que les lacs restent gelés trop longtemps dans le modèle génère un biais froid sur la température à 2 m du modèle, comme par exemple dans la région des Grands Lacs au Canada. En été, l'impact principal de modéliser les lacs est un refroidissement de la température maximale de l'air, visible sur la région des Grands Lacs, une grande partie du Canada et l'ouest de la Russie. Les processus mis en jeu sont simples : pendant le jour, la température de l'eau est plus basse que son environnement, ceci réduit le flux de chaleur sensible et donc le réchauffement de l'atmosphère. Comme ces régions sont sujettes à un fort biais chaud, utiliser FLake a un effet positif puisqu'il réduit sensiblement ce biais. En automne, la présence des lacs réchauffe et humidifie nettement l'air, en

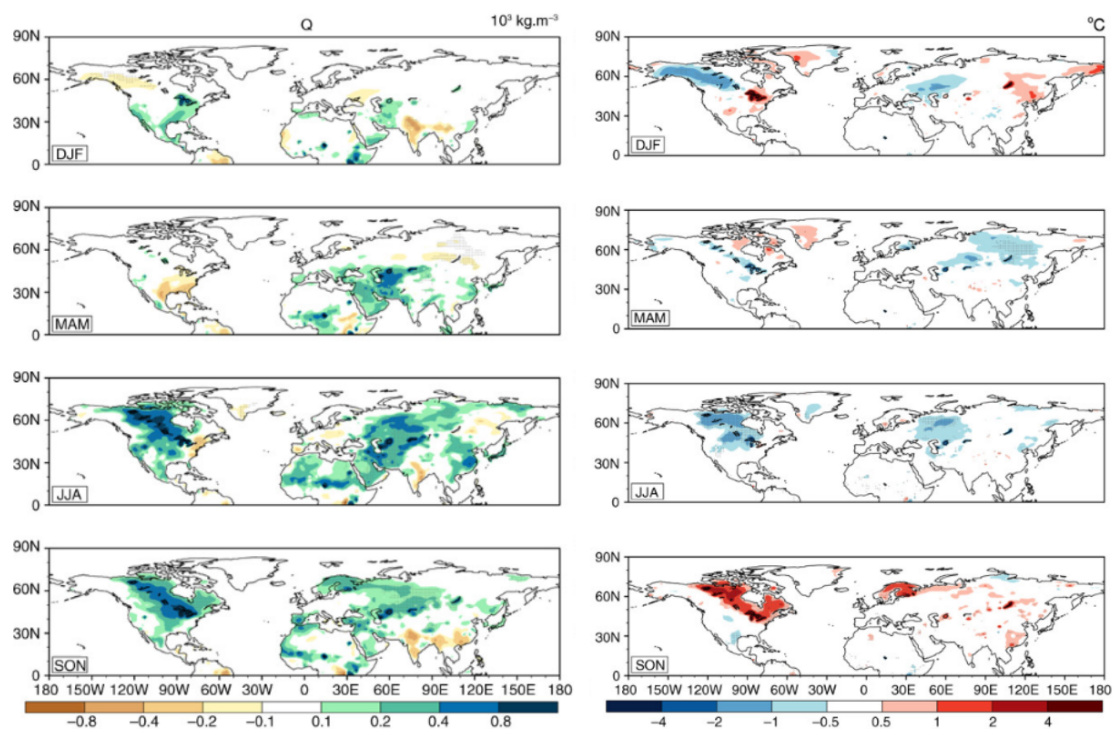


FIGURE 2.6 – Différences des moyennes saisonnières entre CNRM-CM couplé avec et sans FLake de températures de surface (à droite, en K) et d'humidité spécifique (à gauche, en kg/m^3). Extrait de Le Moigne et al. (2016)

particulier au Canada et en Scandinavie. La simulation avec FLake est plus humide partout, mais même si le flux de chaleur latente augmente, il ne suffit pas à empêcher le réchauffement et dans les régions où un biais chaud existe, celui-ci est renforcé.

2.4 Implémentation d'un bilan de masse des lacs pour l'hydrologie

Comme on l'a vu dans les sections précédentes, le modèle FLake est un modèle thermodynamique qui ne prend pas en compte les variations de volume, c'est-à-dire qu'il n'inclut pas de bilan de masse. La mission spatiale altimétrique SWOT, opérationnelle depuis décembre 2022, sera capable de discriminer des surfaces d'eau à haute résolution spatiale et de mesurer leurs variations en matière d'extension et de hauteur, donnant ainsi accès à des mesures de variations de volume d'eau des lacs. Par ailleurs, pour améliorer la représentation du cycle de l'eau à l'échelle globale, il était important d'intégrer la dynamique des lacs dans les échanges déjà existants entre surfaces naturelles et rivières. Ce travail a fait l'objet de la thèse de Thibault Guinaldo au CNRM que j'ai co-encadrée avec Aaron Boone, avec l'aide précieuse de Simon Munier. L'idée était d'implémenter un module permettant de calculer les variations de volumes d'eau des lacs dans un système hydrométéorologique existant. Ce dernier est composé du modèle de surface ISBA qui simule les flux d'énergie et d'eau à l'interface surface-atmosphère et qui alimente en eau le modèle de routage de surface CTRIP. Le nouveau module développé (Guinaldo, 2019, MLake) a été intégré au

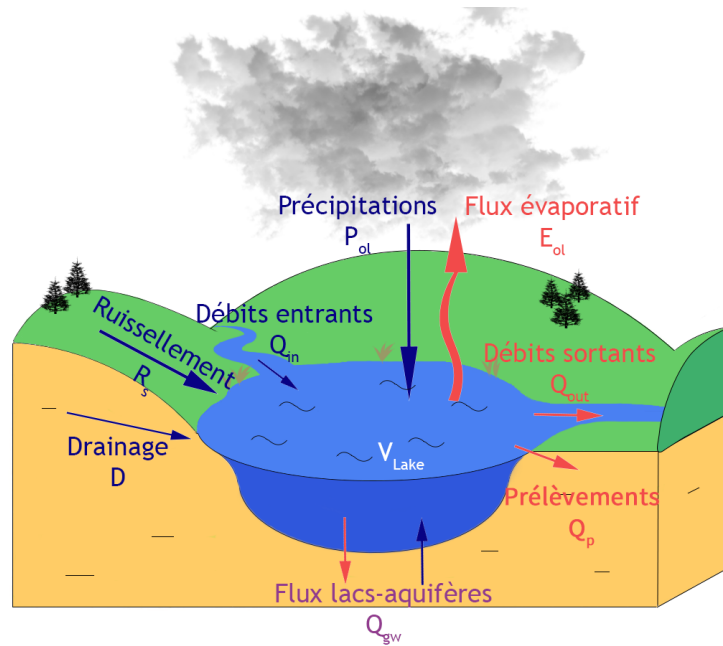


FIGURE 2.7 – Schéma de principe du module de bilan de masse MLake.

réseau hydrographique afin d'assurer une continuité dans le transfert de l'eau en surface. Ce nouveau module prend en compte l'ensemble des processus qui contribuent à la variation de volume d'eau, à savoir les précipitations, l'évaporation, le ruissellement de surface, la connexion avec les rivières par un flux entrant et un flux sortant, le lien avec le souterrain et enfin les prélèvements pour l'irrigation (Fig. 2.7). Il a été interfacé au réseau hydrographique français afin d'évaluer son impact sur la circulation de l'eau en rivière. Les premiers résultats ont été obtenus sur le bassin du Rhône et ont montré une nette amélioration de la simulation ISBA-CTRIP, en particulier en mettant en évidence le fait que la présence de lacs avait un effet tampon, qui permettait un écrêtement des débits en période de fortes crues ainsi qu'un soutien aux étiages. Un second aspect important concerne le marnage des lacs, i.e. ses variations de niveau d'eau, et donc la capacité du modèle MLake à le représenter. Des mesures de marnage du lac Léman ont permis de comparer les réalisations du modèle et ont montré son aptitude à les représenter correctement. Ce travail ouvre la voie à des travaux de recherche à venir, en particulier, le couplage de ce module avec FLake à travers le calcul de l'évaporation pour en améliorer le réalisme, et contribuer à l'amélioration de la représentation du cycle de l'eau. Par ailleurs, ce module a été utilisé pour prendre en compte les effets anthropiques de type barrage et règles de gestion des ouvrages dans la représentation du cycle de l'eau (Sadki et al., 2023).

2.5 Modélisation du bilan d'énergie en Antarctique

La neige est une composante essentielle du système climatique terrestre. Elle joue un rôle majeur dans la régulation du climat, comme ressource en eau et comme élément clé du paysage, pour les sociétés humaines et les milieux naturels. La couverture neigeuse a un effet profond sur la surface de la Terre, principalement en modifiant l'albédo de la surface, la rugosité et en isolant thermiquement le sol sous-jacent et l'atmosphère. En outre, la couverture neigeuse varie

considérablement dans le temps et l'espace et module les flux radiatifs et les flux de chaleur, de quantité de mouvement et d'humidité entre la surface et l'atmosphère. L'échange de chaleur entre l'atmosphère et la surface se fait par des flux non radiatifs, à savoir les flux de chaleur latente et sensible. En Antarctique, et plus particulièrement à l'intérieur du continent, comme au Dôme Charlie (Dome C ci-après), les conditions sont très différentes, car la neige est le paysage, et elle présente relativement peu de variations spatiales et temporelles. De plus, les conditions sont très sèches et froides, ce qui empêche la neige de fondre et les précipitations sont rares. Au Dôme C, les températures très froides, qui rendent l'air sec et l'humidité spécifique faible, induisent des flux de chaleur latente (sublimation ou condensation solide) très faibles. En raison de la forte réflexion du rayonnement solaire incident et de la perte de chaleur par rayonnement thermique la surface du manteau neigeux est généralement plus froide que l'atmosphère (van den Broeke, 2005). Dans ce cas, c'est l'atmosphère qui fournit l'énergie à la surface de la neige. Le caractère isolant de la neige joue un rôle important dans le couplage surface-atmosphère dans les régions enneigées, que ce soit dans les zones temporairement recouvertes de neige par des événements de précipitations, en plaine ou en montagne, ou dans les régions couvertes de neige toute l'année, comme les calottes glaciaires des régions polaires. En haute altitude et dans les régions polaires, la couverture neigeuse s'accumule pour former des névés et se transforme en glace. Pour ces raisons, la modélisation de la neige dans ces conditions est très importante pour le climat. En outre, l'amélioration des processus physiques liés à la neige dans les modèles numériques de prévision météorologique et de climat a toujours été un domaine de recherche important en raison des défis qu'ils représentent.

Dans le cadre de GABLS (Global Energy and Water Exchanges (GEWEX) Atmospheric Boundary Layer Study), des études d'intercomparaison sont menées pour les schémas de couche limite utilisés par les modèles numériques de prévision numérique du temps et de climat. Pour les stratifications stables, les modèles présentent encore des biais importants, qui dépendent des paramétrisations de la couche limite et de la surface utilisées (Holtslag et al., 2013). Les trois premières études comparatives GABLS réalisées (Cuxart et al., 2006; Svensson et al., 2011; Bosveld, Baas, Meijgaard, Bruijn, Steeneveld, and Holtslag, 2014) ne portaient que sur des conditions modérément stables. Dans GABLS4 (Bazile et al. 2014), l'objectif était d'étudier l'interaction d'une couche limite stable avec une surface enneigée à faible conductivité et à fort potentiel de refroidissement. Dans ce contexte, j'ai proposé et piloté un exercice d'intercomparaison de modèles de neige forcés par des observations sur le plateau antarctique au Dôme C. Cette comparaison complétait les simulations couplées unidimensionnelles surface-atmosphère et les Large Eddy Simulations (Couvreur et al., 2020). En effet, la journée du 11 décembre 2009 a été choisie comme journée de référence ("golden day") pour les simulations couplées car elle présentait des conditions favorables, en particulier une faible advection de grande échelle. Les variables des modèles de surface et de manteau neigeux dans ces simulations couplées ont été initialisées avec une même simulation non couplée et ayant les mêmes caractéristiques que dans les modèles couplés. La présente étude visait à évaluer la capacité des modèles de neige participant à simuler la température de surface, ainsi que les températures dans le manteau neigeux pour les modèles les plus sophistiqués, et à évaluer la capacité des modèles à représenter le bilan énergétique de surface à Dôme C, c'est-à-dire dans des conditions de froid assez extrêmes, même si la période d'étude se situe en été en Antarctique. Il s'agit d'un exercice assez difficile pour des modèles qui ont essentiellement été développés et validés aux latitudes moyennes et pas nécessairement de manière exhaustive aux pôles. Ces modèles sont utilisés dans les centres météorologiques de prévision numérique du temps ou dans les laboratoires qui étudient le climat. La période de temps couvre quelques

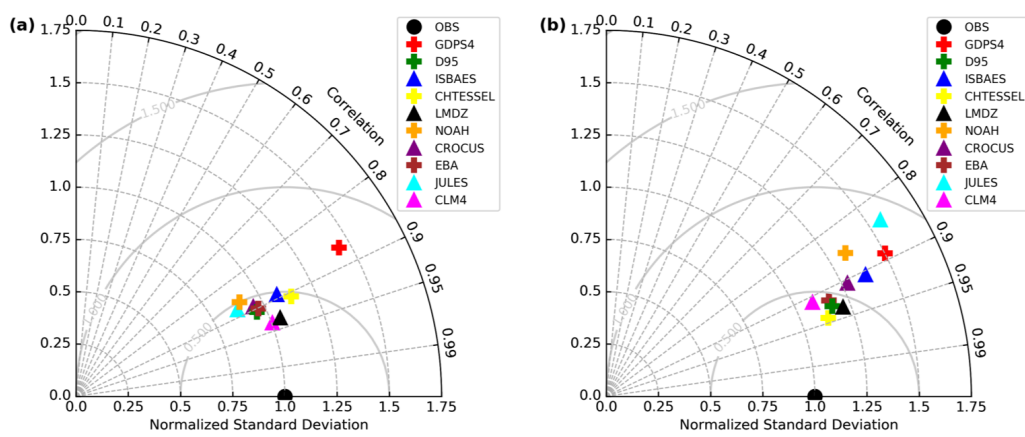


FIGURE 2.8 – Diagramme de Taylor comparant les scores de température de surface des différents modèles (a) le jour et (b) la nuit. Les croix correspondent aux modèles monocouches et les triangles pleins aux modèles multicouches. Extrait de Le Moigne et al. (2022).

semaines en décembre 2009 et les simulations sont faites en mode offline guidées par les observations disponibles sur place. Des modèles de complexité variable participent à cette comparaison et ils utilisent différents paramètres de surface qui ont un fort impact sur les simulations dans cette région. Il s'est agit tout d'abord de positionner l'expérience GABLS4 par rapport aux exercices passés d'intercomparaison des modèles de neige. En effet, par le passé, de nombreux exercices d'intercomparaison ont été menés avec pour objectif d'évaluer des paramétrisations des modèles de neige et de les améliorer si possible. GABLS4 est une intercomparaison internationale qui s'inscrit dans cette lignée. Le premier enseignement est la grande variabilité des simulations en matière de température de surface et plus généralement en bilan énergétique de surface. En effet, l'ensemble des dix modèles participants ont mis en évidence une tendance à surestimer de 2 à 5K la température la nuit et de la sous-estimer le jour d'environ 2K. Les diagrammes de Taylor de la figure 2.8 montrent la dispersion des modèles et mettent en évidence que certains modèles ont plus de mal que d'autres à bien simuler la température de surface.

Ces différences sont en partie dues à un flux turbulent de chaleur sensible simulé trop fort de jour comme de nuit (le flux turbulent de chaleur latente quant à lui est très faible) et mettent en évidence les difficultés des modèles à modéliser les couches stables nocturnes et leur transition vers des couches convectives sur des surfaces froides. Les modèles les plus simples (comme le modèle monocouche D95 de SURFEX), quant à eux, ont été en mesure de simuler correctement la température de surface à Dôme C, au moins aussi bien que les modèles plus complexes (comme CROCUS ou ISBA-ES de SURFEX), lorsque l'albédo et la capacité thermique de la neige étaient bien spécifiés. En plus de l'albédo, les paramètres de surface des modèles (longueur de rugosité, émissivité, etc.) étaient très variables et les modèles ont montré une forte sensibilité à ces paramètres. L'aspect incertitude sur les paramètres et sur les flux turbulents en surface m'a conduit à approfondir les tests de sensibilité. Dans SURFEX, le rapport des longueurs de rugosité dynamique et thermique a une valeur fixée à 10. Mais la littérature indique une large de gamme de variations de ce rapport, entre 1 et 10 dans la plupart des modèles de PNT. Certains auteurs ont proposé des paramétrisations originales de ce rapport, pour tenter d'introduire une dépendance à la stabilité de l'air. À Dome C, une longueur de rugosité dynamique de l'ordre de 10^{-3} m est raisonnable et en accord avec les observations (Vignon et al., 2017). Cependant, la valeur de la longueur de rugosité thermique z_{0h} est plus difficile à déterminer. J'ai voulu tester la dépendance

de z_{0h} à la stabilité, en utilisant la formulation proposée par Andreas (1987) reprise par Zilitinkevich (1995). Cette formulation, basée sur le nombre de rugosité de Reynolds, exprime z_{0h} comme fonction de la longueur de rugosité dynamique z_{0m} pondérée par une exponentielle décroissante dont l'intensité diminue lorsque que la stabilité diminue. Chen et al. (1997) ont implémenté cette paramétrisation dans le modèle NCEP et Zilitinkevich l'a utilisé pour un modèle de dispersion de polluants. Cette paramétrisation fait intervenir une constante C qui doit être calibrée. Une valeur de $C = 0.1$ a été utilisée dans le modèle NCEP alors que pour l'aspect pollution, Zilitinkevich a utilisé $C = 2.0$. Une augmentation de C diminue z_{0h} et atténue le cycle diurne du flux de chaleur sensible. J'ai donc testé cette formulation offline dans le modèle de neige D95 (Douville et al., 1995) développé pour le modèle de climat du CNRM en 1995, en calibrant C sur les données de température de surface du BSRN collectées à Dome C. Il en a résulté un coefficient $C = 3.5$, une amélioration du flux de chaleur sensible, avec une réduction de son amplitude diurne, ainsi qu'une réduction de l'amplitude diurne de la température de surface entre le modèle de référence avec un rapport constant et sa version modifiée. Cette paramétrisation a ensuite été testée dans le modèle unidimensionnel ARPEGE qui a montré une dégradation des résultats, en particulier, un réchauffement de la couche limite la nuit et une modification sensible du profil de vent, en particulier le jet de basses couches la nuit, avec un vent maximum plus fort. L'analyse des profils de température a montré une forte baisse à cause du refroidissement radiatif la nuit ainsi qu'un réchauffement rapide de la couche limite le jour dû à un réchauffement rapide de la couche limite de surface et un développement vertical rapide, l'intrusion d'air chaud étant compensé par la formation d'une poche froide. La combinaison de simulations offline et couplées montre qu'elles sont complémentaires lors de la mise au point d'une paramétrisation.

Finalement, les modèles multicouches les plus avancés ont bien simulé la stratification thermique dans le manteau neigeux comme l'illustre la figure 2.9, qui montre la différence de température dans le manteau neigeux simulé par Crocus comparé aux observations, sur la période de quinze jours modélisée. Les faibles écarts quelle que soit la profondeur montrent que la propagation de l'onde diurne dans le manteau neigeux est correctement simulée. SURFEX/CROCUS dont la complexité est plus grande qu'ISBA-ES a été utilisé pour combler certaines données manquantes, principalement entre le 7 et le 11 décembre 2009. Cependant, en dehors de ces périodes, SURFEX/ISBA-ES donne des résultats très bons et comparables à SURFEX/CROCUS.

Les bénéfices d'avoir mené cette intercomparaison sont multiples. Le premier est bien sûr une meilleure connaissance de la neige et de son comportement en interaction avec l'atmosphère, en particulier dans un milieu assez extrême comme le plateau antarctique. En effet, réaliser des simulations relativement longues du manteau neigeux nécessite une bonne appropriation des processus physiques qui s'y rapportent. Le deuxième apport réside dans une meilleure connaissance des modèles de neige de SURFEX puisque j'ai été amené à réaliser les simulations pour les modèles monocouches et les modèles plus complexes comme CROCUS. Le troisième point important à mes yeux est le travail en collaboration avec les chercheurs des autres laboratoires ayant participé à cet exercice. Enfin, le dépouillement, l'analyse des résultats et leur publication se sont étalées sur quelques années mais ont été passionnants et ont permis de renforcer mes connaissances sur les interactions surface-atmosphère en conditions convectives le jour et fortement stables la nuit, et de voir les limites des modèles qu'ils soient simples ou plus complexes, mais aussi la difficulté de disposer de mesures fiables dans des conditions aussi extrêmes. En particulier, l'observation et la simulation des flux de surface a été un exercice difficile mettant en évidence l'incertitude des mesures et les limitations des paramétrisations des flux de surface.

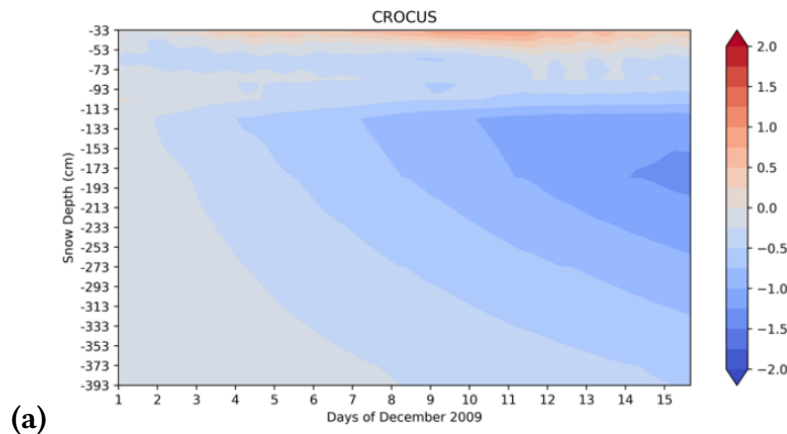


FIGURE 2.9 – Évolution temporelle de l'écart du profil vertical de température simulé par Crocus comparé aux observations.

2.6 Ennuagement et formation de nuages de couche limite

Le schéma de végétation ISBA a été développé au CNRM depuis des années (Noilhan and Planton, 1989; Mahfouf, Manzi, Noilhan, Giordani, and Déqué, 1995), et continue d'évoluer grâce à l'expertise de chercheurs du CNRM (Boone, Samuelsson, Gollvik, Napoly, Jarlan, Brun, and Decharme, 2017; Decharme, Boone, Delire, and Noilhan, 2011; Decharme et al., 2019). La thèse de Gaëtan Noual (Noual et al., 2023) que j'ai co-encadrée avec Yves Brunet (INRAE) et Christine Lac (CNRM) visait à étudier, grâce à la modélisation, les interactions entre les surfaces forestières et les nuages de couche limite à l'échelle de la forêt des Landes dans le sud-ouest de la France. Un des objectifs était de mieux comprendre le rôle de la forêt sur la formation de nuages et donc son impact sur le climat régional. Ce travail de thèse s'est appuyé sur l'étude de Teuling et al. (2017) qui a montré, grâce aux observations satellitaires, une plus forte occurrence de couverture nuageuse au-dessus de la forêt des Landes par rapport à son environnement proche. Il a également montré que cette occurrence avait diminué sensiblement après le passage de la tempête Klaus de 2009, qui avait détruit près d'un tiers de la forêt dans sa partie centrale. La première partie de la thèse s'est focalisée sur le choix de la configuration optimale du modèle Méso-NH couplé à SURFEX, avec une résolution horizontale de 500 m (Fig. 2.10). Celle-ci a été obtenue grâce à l'étude de 2 situations contrastées en termes d'humidité des sols et de dynamique de développement nuageux. La modélisation de nuages de couche limite au-dessus de la forêt pour ces 2 cas s'est avérée très sensible au choix des conditions initiales et de forçage de grande échelle, et ce sont les analyses opérationnelles du Centre Européen qui ont été choisies. Un cas de convection sèche tiré de la campagne Carbo-Europe et donc bien documenté en observations a également été simulé pour comparer les flux de surface et le développement de la couche limite entre modèle et mesures. L'ensemble des simulations a permis de faire deux choix décisifs. Premièrement l'activation du module ISBA-A-gs (Calvet et al., 1998) prenant en compte le stress des plantes a été préférée à l'approche empirique de Jarvis (1976) qui a le défaut de surestimer la fermeture des stomates et donc de limiter fortement les échanges gazeux au niveau des feuilles, favorisant ainsi une évaporation trop faible au profit d'un flux de chaleur sensible trop important. Deuxièmement, l'activation du schéma de convection peu profonde à la résolution de 500 m a conduit à une surestimation du transport total, ce qui a eu pour effet de diminuer sensiblement l'occurrence des nuages de couche limite. Les thermiques ont donc été représentés explicitement en désactivant

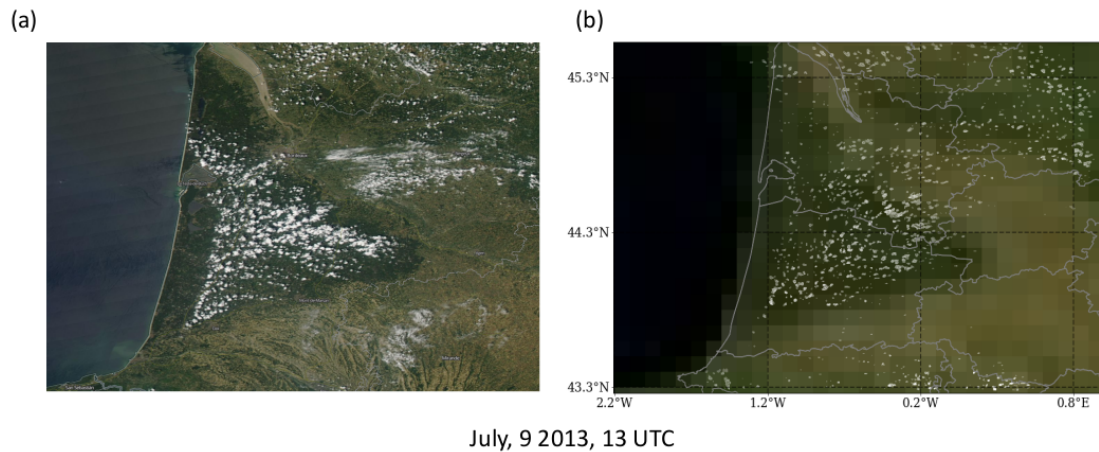


FIGURE 2.10 – (a) Image satellitaire prise par MSG et (b) fraction nuageuse moyenne entre 500 et 3000 m simulée avec la configuration optimale, le 9 juillet 2013 à 13 UTC.

cette option, ce qui a montré au passage que la résolution effective de Méso-NH à 500 m était suffisante pour s'affranchir de la paramétrisation des thermiques.

L'analyse des processus à l'origine du contraste d'ennuage entre la forêt et son environnement, basée sur les bilans des variables pronostiques, comme la température potentielle, la TKE et le rapport de mélange, a mis en avant les différences notables entre les bilans d'énergie de la forêt et de la non-forêt : la forêt produit des flux de chaleur sensible plus importants qui chauffent l'air à proximité de la surface, générant des ascendances et de la turbulence, principalement thermique dans les 300 premiers mètres de la couche limite. Inversement le flux de chaleur latente est réduit au-dessus de la forêt et l'augmentation du flux de chaleur sensible au-dessus de la forêt prévaut sur la diminution du flux de chaleur latente. La couche limite est plus sèche et plus chaude au-dessus de la forêt que celle de son environnement pendant la période convective de la journée. Par ailleurs, la longueur de rugosité de la forêt, qui est plus élevée que celle de la végétation plus basse des parcelles qui l'entourent, est à l'origine d'un cisaillement de vent plus fort dans la couche limite et donc de turbulence d'origine dynamique. La dynamique et la thermodynamique de couche limite modifiées par la forêt constituent le moteur de la formation des nuages de couche limite.

Les hétérogénéités de surface favorisent la mise en place de circulations locales, en particulier dans la région de la forêt des Landes bordée par l'océan atlantique, les Pyrénées et le bassin de la Garonne essentiellement dédié à l'agriculture. La proximité de l'océan génère des brises de mer fréquentes l'été à cause du contraste thermique important entre l'eau et le continent et celles-ci sont d'autant plus fortes que la couverture de forêt est importante. En effet, sur la zone de forêt, caractérisée par une forte ascendance et où se forment les nuages de couche limite, le front de brise progresse de plusieurs dizaines de kilomètres à l'intérieur des terres et le courant de retour de la brise de mer est assez fort pour assécher et stabiliser la couche résiduelle au-dessus de l'océan. En diminuant la fraction de forêt au profit de la prairie, l'intensité de la brise est plus faible et donc la progression du front de brise est moindre. Le contraste entre la forêt et la végétation plus basse de type culture sur les bords nord-est et sud-est de la forêt est aussi à l'origine d'un contraste thermique assez marqué près de la surface et source d'une circulation locale. Cette brise de forêt (Mahrt and Ek, 1993) est moins forte que la brise de mer et le front de brise se trouve à l'interface entre les types de végétation, c'est-à-dire à la lisière de la forêt.

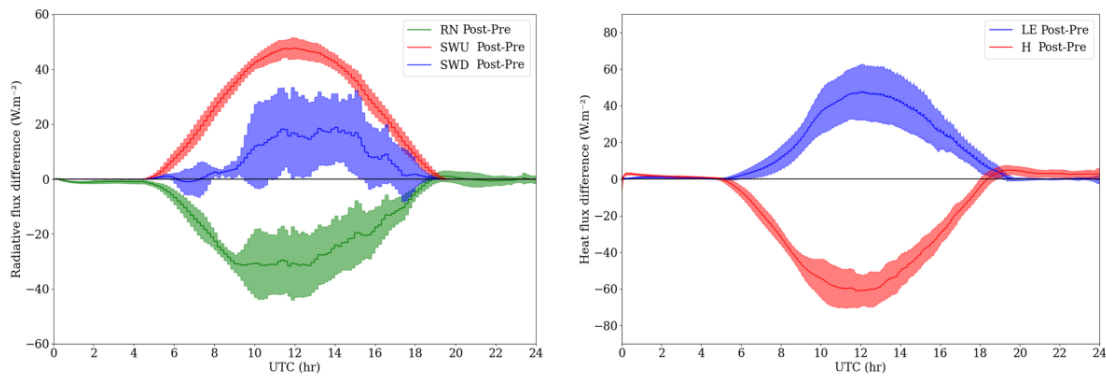


FIGURE 2.11 – Évolutions temporelles simulées pendant 24 heures de la moyenne et de l'écart-type de la différence post- moins pré-Klaus pour les 14 cas, à droite : des flux de chaleur sensible (H) et latente (LE) et à gauche : des rayonnements net (RN), solaires descendant (SWD) et montant (SWU). Extrait de Noual et al. (2023).

Pour quantifier l'impact de la diminution de la fraction de forêt sur les nuages de couche limite et les circulations locales, une carte des dégâts de la tempête Klaus de 2009 a été introduite dans le modèle et des comparaisons entre les zones forêt/non-forêt effectuées. Le modèle reproduit bien une baisse de l'ennuagelement sur le cas d'étude du 9 juillet 2013 prenant en compte la déforestation, avec une réduction de 30 à 40 % de la fraction nuageuse et du contenu en eau nuageuse. La baisse de l'ennuagelement au-dessus de la forêt peut s'expliquer par une réduction du flux de chaleur sensible, qui réduit les circulations convectives ainsi que la production thermique de turbulence, et par une longueur de rugosité plus faible, qui diminue la production dynamique de turbulence. Ces mécanismes étant moteurs dans la formation de nuages de couche limite, la déforestation a pour effet de diminuer la couverture nuageuse, le contenu en eau liquide intégré et la hauteur des nuages. Ces résultats sont confortés par la simulation de 14 autres cas de nuages de couche limite, avec une baisse du flux de chaleur sensible de 20 % durant la période convective compensée par une hausse du flux de chaleur latente (Fig. 2.11) et une diminution du contenu en eau liquide intégré de 30 % et de la fraction nuageuse de 25 %. Un test de sensibilité à la fraction de forêt a été réalisé en changeant le pourcentage d'occupation de forêt et en simulant la journée du 9 juillet 2013 (Fig. 2.12).

Il en résulte que la réponse de la densification de la forêt sur la couverture nuageuse est non-linéaire et seules les simulations ayant au moins 40 % de forêt génèrent suffisamment de convection pour créer des nuages de couche limite sur ce cas, grâce à des vitesses verticales fortes. En dehors de la période convective, la turbulence assure le transport vertical d'humidité jusqu'au niveau de condensation. Ce test de sensibilité a montré le rôle essentiel de la forêt dans la formation nuageuse de couche limite ainsi que la complexité de la variation du cycle diurne des nuages avec le changement de densité de la forêt. Cette étude ne permet cependant pas de dire si le changement de densité de forêt a un effet positif ou non sur les précipitations. En effet, Xu et al. (2022) ont montré qu'à l'échelle globale la forêt avait des effets opposés sur la formation nuageuse en fonction de l'endroit du globe.

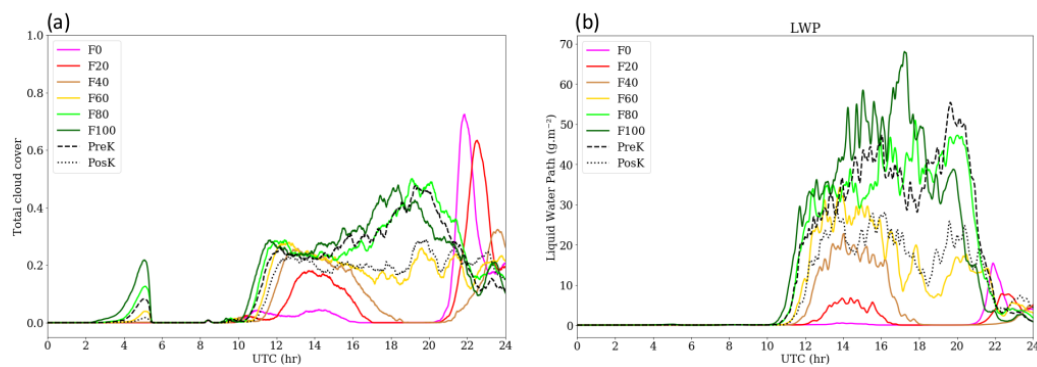


FIGURE 2.12 – Évolutions temporelles simulées pendant 24 heures de la moyenne sur un carré de forêt de 2900 km² (a) du couvert nuageux, (b) du Liquid Water Path (noté LWP, en g/m²) pour des simulations avec différents couverts forestiers : F0 (violet, correspondant à 0% de fraction de forêt), F20 (rouge, 20%), F40 (marron, 40%), F60 (jaune, 60%), F80 (vert clair, 80%), F100 (vert foncé, 100% de fraction de forêt), pré-Klaus (noté PreK, en pointillé large noir), post-Klaus (noté PosK, en pointillé court noir). Extrait de Noual et al. (2023).

2.7 Amélioration des bases de données de surface

La représentation des surfaces dans les modèles joue un rôle très important car celles-ci témoignent de l'hétérogénéité des paysages qui ont un impact direct sur le développement de la couche limite et les circulations atmosphériques. Par ailleurs, depuis sa genèse, SURFEX est interfacé avec la base de données ECOCLIMAP qui définit les écosystèmes et leurs paramètres, informations nécessaires à la modélisation. Cette base de données globale a une résolution horizontale d'un kilomètre et représente la surface à un instant donné du passé. Or, les applications actuelles requièrent des paramètres à plus fine résolution plus représentatives des données actuelles. L'équipe a donc proposé un algorithme pour établir une nouvelle carte des écosystèmes, ECO-SG, basée sur les données satellitaires du produit ESA-CCI Land Cover, plus récente (2010) et à plus haute résolution, associé à la génération de paramètres de surface issus aussi de produits satellitaires récents. L'utilisation de cette carte ECO-SG a fait l'objet d'un stage de M2 et est actuellement en cours de test dans AROME. Cependant, l'impact du changement d'occupation des sols dans un modèle atmosphérique est au moins aussi important qu'un changement de modèle de surface et nécessite des réglages. Ces travaux auxquels je contribue se font en collaboration avec les collègues du groupe GMAP. Par ailleurs, j'ai coordonné en 2020 le projet Copernicus SLIM, dont l'objectif était de cartographier les surfaces à l'échelle globale à la résolution kilométrique et de produire des indicateurs urbains pour la modélisation. C'était l'occasion de valoriser notre algorithme et de l'améliorer. En particulier, nous avons pu pour les besoins internes du laboratoire produire des cartes annuelles des écosystèmes et des paramètres associés. L'appropriation de l'algorithme permettant de générer des indicateurs urbains sera utilisée pour des simulations AROME à 500 m de résolution sur la France, qui servira de démonstrateur dans le cadre des Jeux Olympiques 2024.

Points clés :

- Développement, gestion et formation du modèle SURFEX
- Modélisation multi-échelle des lacs
- Intercomparaison des modèles de neige en Antarctique
- Interaction surfaces forestières et nuages de couche limite

Les travaux sur la modélisation des surfaces continentales que j'ai menés et encadrés ont contribué à améliorer les connaissances sur les interactions entre surface et atmosphère et surface et hydrologie. En effet, le travail sur les bases de données de surface a permis de mieux représenter les hétérogénéités dans les modèles utilisant SURFEX. Celles-ci ont une influence directe sur certains phénomènes locaux, comme des circulations de brise, et peuvent impacter la formation de nuages de couche limite en été. Par ailleurs, l'amélioration des schémas de surface et leur compréhension sont capitales pour les modèles de prévision numérique du temps et de climat. L'intercomparaison des schémas de neige appliqués à des données en Antarctique, que j'ai réalisée, a permis de mettre en évidence certains défauts des modèles en conditions stables. Enfin, l'amélioration de la représentation des lacs dans le modèle de climat de Météo-France a eu pour effet d'augmenter le réalisme des simulations climatiques en atténuant les biais systématiques observés dans les régions à forte densité de lacs et aussi en améliorant le cycle de l'eau grâce à l'implémentation d'un bilan de masse des lacs.

CHAPITRE 3

Réanalyses régionales de surface

En prévision numérique du temps (PNT), l'analyse météorologique consiste à déterminer les conditions initiales de l'atmosphère, de l'océan et de surface avec la plus grande précision possible. L'analyse constitue une étape majeure dans le processus de prévision, qui consiste à assimiler des observations. Ainsi, une grande variété d'observations sont utilisées, elles se déclinent en deux classes. La première regroupe les observations conventionnelles, incluant les observations des stations sol, les radiosondages, les profileurs de vent, les mesures des avions de ligne, des navires de commerce et des bouées, les réflectivités radar. La seconde est constituée des mesures satellitaires, qui représentent environ 90% des données assimilées par les modèles de PNT. L'assimilation de données consiste à combiner ces observations avec une prévision antérieure du modèle, appelée ébauche, afin de déterminer un état analysé qui soit à la fois proche des observations et de l'ébauche, tout en tenant compte des erreurs liées à l'observation et au modèle. Aujourd'hui, il est indispensable de disposer d'archives historiques longues et fiables du climat terrestre. Alors qu'on dispose de nombreuses observations et des moyens modernes pour les périodes les plus récentes, plus on remonte dans le temps, plus la densité du réseau des observations diminue. Une réanalyse consiste à combiner des observations du passé avec des modèles météorologiques à l'état de l'art pour documenter les conditions météorologiques passées, même aux endroits où il n'y a pas d'observation. La réanalyse de surface, quant à elle, est un cas particulier de réanalyse, lors de laquelle seules des observations de surface sont assimilées. Parmi elles, on trouve la température de l'air à 2 mètres, l'humidité relative de l'air à 2 mètres, le vent à 10 mètres, la pression de surface, l'équivalent en eau du manteau neigeux, l'indice foliaire, l'humidité superficielle des sols, les précipitations, etc. À Météo-France, on distingue les analyses de surface réalisées lors du cycle d'assimilation des modèles de PNT (ARPEGE pour la grande échelle et AROME pour l'échelle régionale) des analyses de surface qui servent de base à une réanalyse de surface permettant ensuite d'alimenter des modèles d'impact pour le suivi de la ressource en eau, l'agriculture (sécheresse), la prévention du risque d'avalanche, le suivi du manteau neigeux, ou encore l'évaluation des simulations climatiques régionales, et le cas échéant leur débiaisage. Dans le contexte opérationnel à Météo-France, des observations de température et humidité relative à 2 mètres, de vent à 10 mètres et d'équivalent en eau de la neige sont assimilées au cours des différents cycles d'assimilation d'ARPEGE et AROME en les combinant avec une ébauche issue d'une prévision atmosphérique antérieure. L'analyse de surface est basée sur la technique de l'interpolation optimale.

3.1 La réanalyse SAFRAN sur la France

3.1.1 Description

La réanalyse SAFRAN (Durand et al., 1993) a été développée au Centre d'Études de la Neige (CEN) à Grenoble dans les années 1990 afin de fournir un jeu de paramètres météorologiques cohérents pour l'étude du manteau neigeux avec le modèle CROCUS (Brun et al., 1989; Vionnet et al., 2012), élément de base pour la prévision du risque d'avalanches (Durand et al., 1999) dans les Alpes et les Pyrénées. Une des originalités de SAFRAN repose tout d'abord sur le découpage de l'espace en massifs, des zones climatologiquement homogènes, c'est-à-dire ne présentant pas de gradients marqués sur plusieurs dizaines voire plusieurs centaines de kilomètres. Les massifs sont des polygones dont l'aire varie de 400 à 1000 km² pour les plus grands d'entre eux. En région montagneuse, chaque massif possède sa propre extension verticale et est découpé verticalement par pallier de 300 mètres, ce qui permet de représenter la variabilité du relief en montagne. Enfin, chaque massif est découpé en secteurs avec huit orientations cardinales possibles permettant de prendre en compte l'exposition au soleil, et son impact sur les caractéristiques du manteau neigeux.

Le principe de SAFRAN repose sur la méthode de l'interpolation optimale (Gandin, 1963). SAFRAN construit au pas de temps horaire la température de l'air à 2 mètres, l'humidité relative de l'air à 2 mètres, le vent à 10 mètres, la quantité et la phase des précipitations, les rayonnements atmosphériques solaire et infrarouge ainsi que la nébulosité totale intégrée. L'interpolation optimale permet d'intégrer des informations hétérogènes comme l'état a priori d'une variable atmosphérique, appelé ébauche, les observations, les distances géographiques et les corrélations entre les différents points d'observations et aussi de contrôler la qualité des données. Comme mentionné ci-dessus, l'analyse est réalisée sur des zones climatiques supposées homogènes. Son principe stipule que la quantité Y analysée au point d'analyse k (notée Y_k^a) est obtenue en corrigeant l'ébauche de Y au point k (notée Y_k^e) d'une combinaison linéaire des écarts entre les quantités X_i^o observées aux points i et les ébauches X_i^e de X aux points i . Sa représentation analytique peut s'écrire sous la forme :

$$Y_k^a = Y_k^e + \sum_{i=1}^N p_{ik}(X_i^o - X_i^e) \quad (3.1)$$

où les coefficients p_{ik} sont obtenus en minimisant l'écart quadratique moyen de l'erreur d'analyse (Durand et al., 1993). En pratique l'équation 3.1 est appliquée d'abord pour analyser les profils verticaux de température et d'humidité de l'air, le vent et la nébulosité, pour chaque massif et chaque tranche d'altitude. Pour l'analyse en surface, l'équation est aussi utilisée mais les coefficients p_{ik} sont plus simples à obtenir car ils ne prennent en compte que les distances entre les observations et le point d'analyse considéré. Pour les précipitations, une contrainte supplémentaire est ajoutée à l'équation 3.1. Celle-ci consiste à définir l'ébauche des précipitations aux points d'analyse comme combinaison linéaire des précipitations aux points d'observation, les coefficients de pondération étant les mêmes que ceux définis par l'analyse d'altitude soit les p_{ik} . Cette contrainte s'écrit :

$$Y_k^e = \sum_{i=1}^N p_{ik} X_i^e \quad (3.2)$$

En combinant les équations 3.1 et 3.2, on obtient la valeur analysée pour les précipitations quotidiennes :

$$Y_k^a = \sum_{i=1}^N p_{ik} X_i^o \quad (3.3)$$

Ainsi, l'équation 3.3 indique que l'interpolation est réduite à une interpolation horizontale simple qui tient compte des observations disponibles dans chaque massif à analyser et la contrainte imposée par l'équation 3.3 permet d'assurer une cohérence entre l'ébauche et le gradient vertical analysé. Cette méthode fonctionne bien lorsque la densité du réseau d'observations est suffisamment grande. Par contre l'analyse est fortement dégradée lorsque la densité est trop faible, car alors SAFRAN peut être amené à rechercher des observations dans les massifs voisins et l'erreur commise sur le champ analysé est alors plus importante.

Mes travaux ont consisté à m'approprier la chaîne SAFRAN opérationnelle au CEN afin de l'adapter à la France métropolitaine pour générer des forçages atmosphériques cohérents et alimenter le modèle de surface ISBA (Noilhan and Planton, 1989; Mahfouf et al., 1995) pour l'étude climatologique du bilan d'énergie de surface, des contenus en eau du sol et de l'hydrologie des grands bassins français (Le Moigne, 2002). J'ai donc travaillé en collaboration avec Yves Durand, chercheur au CEN et concepteur de SAFRAN, afin de comprendre le module d'analyse, de l'adapter pour l'appliquer à la France et d'en fournir une évaluation objective. Les différences principales entre la chaîne SAFRAN pour l'hydrologie que j'ai mise en place et celle pour la nivologie développée au CEN sont la non représentation des orientations des massifs et la non prise en compte d'une climatologie des précipitations par massif dans l'analyse des précipitations. Cette divergence des 2 chaînes, motivée à cette époque par le besoin de disposer rapidement d'analyses SAFRAN pour des thèses qui démarraient et aussi par certaines difficultés de travailler de façon efficace entre Toulouse et Grenoble, s'est avérée regrettable a posteriori car cela a nécessité le maintien de 2 systèmes supposés faire la même chose... Un aspect plus spécifique de mon travail a concerné l'analyse des précipitations, plus précisément l'impact de la densité du réseau d'observations utilisé dans l'analyse. En effet, les analyses en temps réel ou légèrement différé ne disposent que d'un nombre réduit d'observations, et j'ai pu montrer que cette analyse des précipitations était biaisée négativement, mais pouvait être améliorée lorsqu'une climatologie des précipitations par massifs venait contraindre le système. Par ailleurs, j'ai travaillé sur les champs de rayonnements infrarouge et solaire, et ai montré qu'ils présentaient des biais systématiques, pour lesquels j'ai proposé des corrections en fonction de la nébulosité et de l'altitude. L'analyse SAFRAN sur la France a été transférée en 2002 à la DCSC (Direction de la Climatologie et des Services Climatiques) pour une exploitation opérationnelle et est toujours en service.

3.1.2 Analyse des précipitations

On distingue deux types d'analyse : l'analyse en temps différé et celle en temps réel. L'application en temps différé présente l'avantage de disposer de toutes les observations possibles pour effectuer l'analyse d'une période donnée. Celles-ci sont extraites de la Base de Données Climatologiques (BDCLIM) de Météo-France pour générer des fichiers d'observations nécessaires à l'analyse SAFRAN. Ainsi, un fichier d'observation est fait toutes les six heures et un fichier de précipitations est constitué chaque jour. Pour chaque réseau synoptique principal (à 0, 6, 12, 18 UTC), on compte en moyenne 1200 stations sur l'ensemble du territoire, ceci inclut les stations

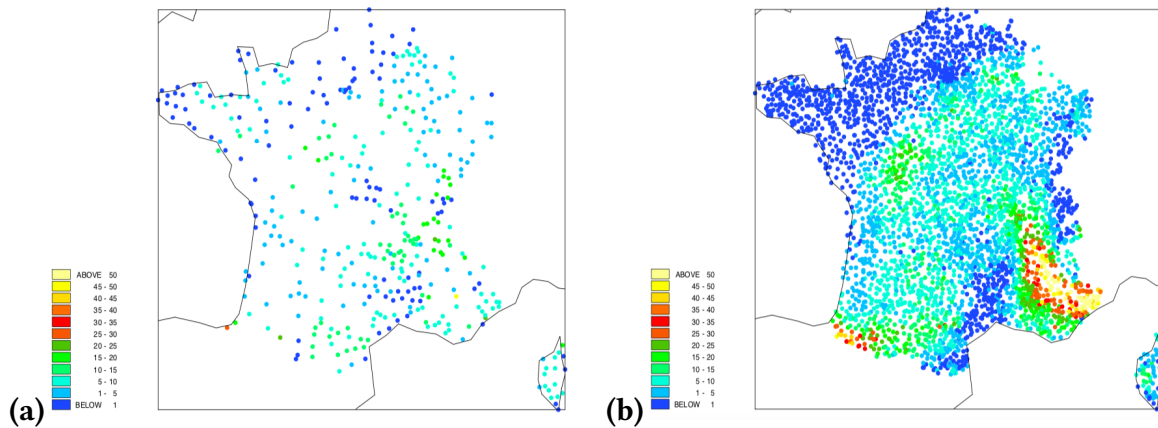


FIGURE 3.1 – Cumul de précipitations sur 24 heures (du 14/2/2002 à 6 TU au 15/2/2002 à 6 TU) observé aux postes synoptiques et stations automatiques qui diffusent l'information (a) en temps réel, (b) en temps réel et en temps différé (communication personnelle).

synoptiques professionnelles où l'observation est faite sur place par du personnel formé à cet effet, les stations synoptiques où l'observation est faite sur place ou à distance par du personnel non spécialisé, les stations automatiques qui transmettent les données en temps réel et enfin les postes automatiques qui transmettent les données en temps différé. Ces stations mesurent aussi les précipitations quotidiennes. À celles-ci viennent s'ajouter les nombreux postes du Réseau Climatique d'État (RCE). Grâce au RCE, le nombre des observations quotidiennes de pluie passe de 1200 à 4100 en moyenne, ce qui correspond en moyenne à 6 ou 7 postes par zone SAFRAN. L'application en temps réel quant à elle utilise les observations de la Base de Données Météorologiques qui est alimentée en temps réel. SAFRAN va assimiler des observations acquises quatre fois par jour à 0, 6, 12 et 18 UTC, issues des messages internationaux d'observations en surface (SYNOP, SYNOR) de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) pour la température, l'humidité, le vent, la nébulosité et les précipitations ainsi que des messages (TEMP, PILOT) pour des observations d'altitude. Le nombre moyen d'observations par massif pour chaque réseau synoptique est faible et se situe entre 1 et 2. Pour les précipitations ce nombre est encore plus faible : SAFRAN dispose au plus d'une observation par massif chaque jour, ce qui constitue un handicap pour reconstituer un champ spatialisé de bonne qualité. À titre d'exemple, la figure 3.1 montre le cumul de pluie sur 24 heures observé pour la journée du 14 février 2002 pour les postes synoptiques et les stations automatiques qui diffusent l'information (a) en temps réel et (b) en temps différé et en temps réel.

L'ébauche utilisée dans l'analyse SAFRAN vient d'un modèle de grande échelle. Ainsi, SAFRAN a utilisé les réanalyses du modèle du CEPMMT pour l'analyse en temps différé et les analyses du modèle ARPEGE pour le temps réel. En ce qui concerne les précipitations, ne disposant pas des analyses AURELHY par type de temps et par massifs sur la France (comme pour l'application SAFRAN dédiée à la nivologie), un gradient vertical climatologique constant est appliqué à la France entière comme celui qui avait été choisi pour l'application sur le bassin du Rhône (Etchevers, 2001), à savoir une augmentation de précipitations d'environ 2 mm/an pour une élévation de 1 mètre (Lang, 1993). Comme le montre la figure 3.1, la densité du réseau pour l'analyse en temps réel est assez faible, avec en particulier certaines zones dépourvues d'observation, ce qui ne permet pas une analyse de bonne qualité. Les précipitations extrêmes seront plus facilement manquées par une analyse sur ce type de réseau à 30 km de résolution comparé à une analyse

alimentée avec les observations du RCE dont la résolution est proche de 10 km. Par conséquent, la quantité de pluie analysée sur des zones sans observation présentera un biais négatif par rapport à une analyse faite avec plus d'observations. Ce résultat est montré par deux analyses des précipitations ne différant que par le nombre de postes pluviométriques entrant dans le système. La première analyse n'utilise que les postes synoptiques diffusant de l'information en temps réel alors que la seconde utilise aussi les postes du RCE. La période couverte pour ces deux expériences débute le 12 février 2002 à 6 TU et se termine le 25 février 2002 à 6 TU. La comparaison de ces deux analyses est montrée sur la figure 3.2.

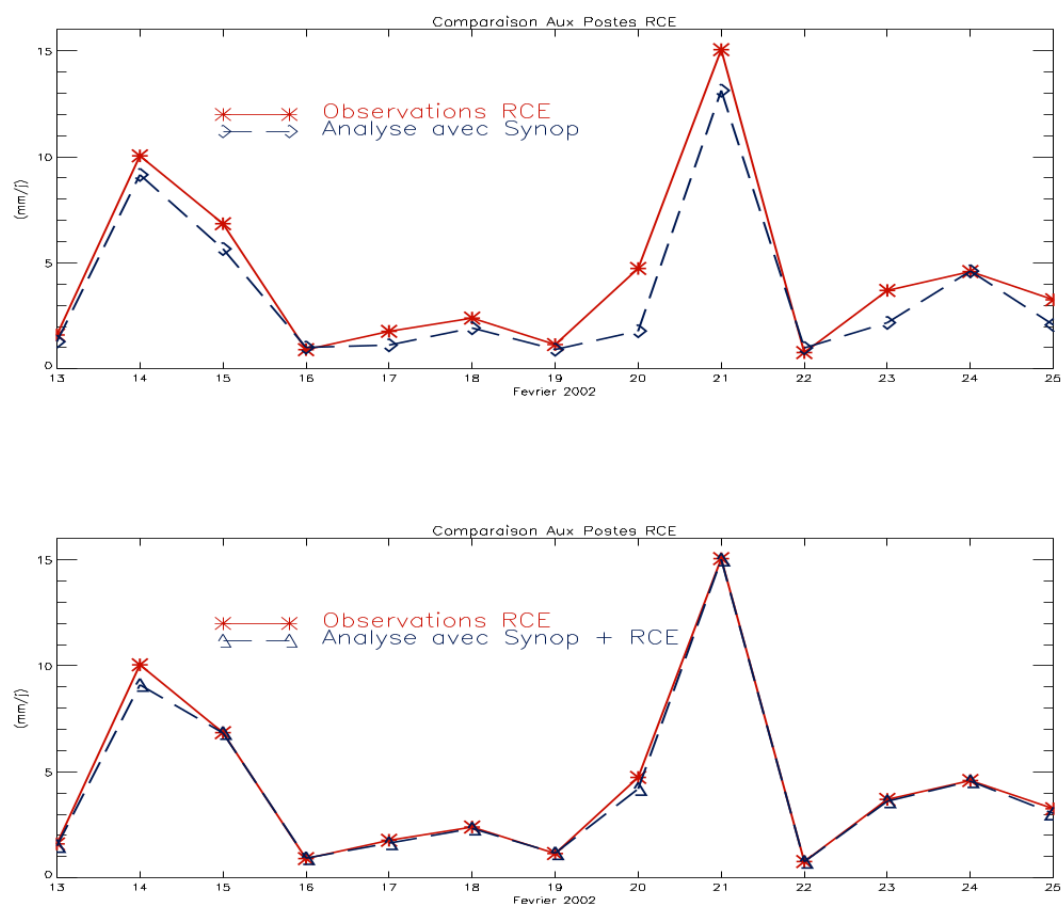


FIGURE 3.2 – Comparaison aux observations du Réseau Climatique d'Etat de l'analyse de précipitations SAFRAN utilisant (a) des observations synoptiques et (b) des observations synoptiques et du RCE.

L'évolution temporelle des précipitations moyennes sur la France montre deux épisodes importants : le premier correspond à un creusement dépressionnaire sur la région Centre qui réactive une ondulation s'étendant de la Bretagne au Nord-Est les 12 et 13 février puis ce système se décale vers le Sud-Est le 14 en donnant des pluies très soutenues et de la neige sur tous les massifs. Le second épisode pluvieux a lieu le 20 février. Il se concrétise par le passage rapide d'un secteur chaud puis d'un front froid et l'installation d'un régime de traîne très active. L'erreur relative moyenne sur l'ensemble de la période du cumul de précipitations de l'analyse faite avec les observations temps réel par rapport au même jeu d'observations est de l'ordre de -2%

alors qu'elle est de -18% pour la même analyse évaluée aux postes du RCE (n'entrant pas dans l'analyse), montrant ainsi le biais généré par le déficit d'observations.

Un moyen de pallier ce déficit en eau est d'utiliser dans l'analyse un ensemble de contraintes différent de celui qui est proposé par défaut dans SAFRAN. Ces contraintes conditionnent la résolution des systèmes linéaires pendant l'interpolation optimale : l'écart à l'ébauche de la valeur analysée est une combinaison linéaire des écarts entre les valeurs observées et l'ébauche pour un massif donné (cf équation 3.1) et la normale analysée pour ce même massif est aussi combinaison linéaire de la normale observée, avec les mêmes coefficients de pondération. Pour ce faire, des normales sont calculées en chaque point d'observation (synoptique et climatologique) et pour chaque massif. Les normales analysées sont calculées à partir de deux ans d'analyses SAFRAN entre le 1er août 1999 et le 31 juillet 2001 (ce qui est bien sûr insuffisant), réalisées avec le réseau d'observations le plus complet possible. Cette technique est utilisée pour l'analyse SAFRAN dédiée à la prévision du risque d'avalanches, mais n'a cependant pas été implémentée dans l'analyse SAFRAN utilisée pour l'hydrologie.

3.1.3 Impact de la densité du réseau d'observations

L'objet de cette étude, réalisée en 2002 en complément des travaux de Le Moigne (2002), était d'examiner l'analyse des pluies en temps réel sur une sélection de 10 cas de fortes précipitations sur la région Cévennes-Vivarais. En effet, l'analyse des pluies est sensible à la densité des observations disponibles, il était donc intéressant de comparer les réponses de l'analyse de SAFRAN avec différents jeux de données en entrée. Ainsi, j'ai constitué plusieurs jeux de données de densités variables. Le premier (expérience OPER) utilise des données disponibles en temps réel et issues de la Base de Données Météorologiques (BDM). Le second (expérience MINI) vient compléter ce premier jeu en y ajoutant 12 postes de la Base de Données Climatologique de Météo-France (BDCLIM), disponibles en temps réel (mais pas dans la BDM) de façon à ce que chaque massif SAFRAN ait au moins une observation de précipitation. La station retenue est celle présentant le plus fort cumul de pluie parmi l'ensemble des postes climatologiques possibles. Le troisième jeu de données (expérience OPTI) rassemble tous les postes de la BDCLIM disponibles en temps réel (mais pas dans la BDM), soit environ 50 postes sur la zone considérée et enfin, un quatrième jeu de données, la référence climatologique, qui rassemble l'ensemble des postes de la BDCLIM, i.e. disponibles en temps réel et en temps différé de 45 jours et provenant du réseau climatique d'Etat. Ce dernier jeu compte 450 postes dans la zone d'étude. La figure 3.3 montre l'erreur relative commise sur le cumul de pluie pour ces 3 expériences par rapport à la référence climatologique et l'importance de disposer d'un nombre suffisant de pluviomètres sur le domaine d'analyse.

L'évaluation des différentes analyses est réalisée en calculant le cumul de pluie pour chaque maille météorologique à 8 kilomètres de résolution horizontale, sur les 10 situations retenues et en les comparant avec le cumul climatologique, obtenu avec l'ensemble des postes de la BDCLIM. Le maximum de pluie analysé avec la climatologie atteint 1200 millimètres alors qu'il n'est que de 500 millimètres avec le réseau opérationnel. L'analyse qui utilise les postes de la BDCLIM disponibles en temps réel donne des résultats comparables à la climatologie et celle avec 12 postes de la BDCLIM en plus améliore sensiblement l'analyse opérationnelle. Ces résultats sont montrés sur la figure 3.4.

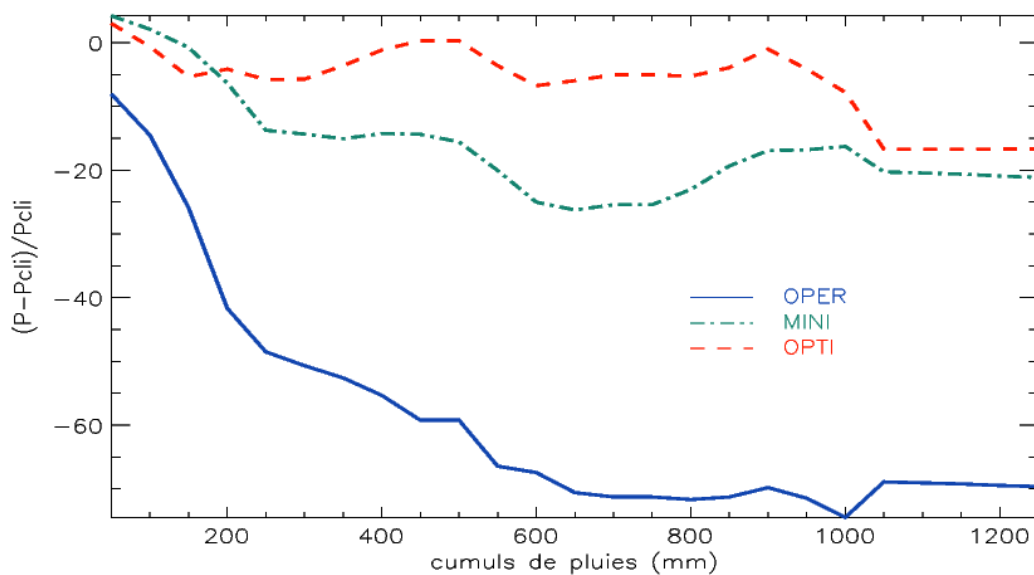


FIGURE 3.3 – Erreur relative du cumul de précipitations pour les expériences OPER, MINI et OPTI, par rapport à la référence climatologique.

Cette étude de l'impact de la réanalyse en fonction des observations qui l'alimentent montre l'importance de disposer d'un réseau d'observation dense. La question présentée ici suite à cette étude réalisée en 2002 n'est pas nouvelle et continue même d'être d'actualité comme nous allons le voir dans la section qui suit.

3.2 Usage de la réanalyse pour les études d'impact en hydrologie

3.2.1 Suivi de la ressource en eau en France

Le suivi de la ressource en eau à Météo-France est une activité qui date des années 2000 environ. En particulier, les travaux de recherche sur la chaîne SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM) (Habets et al., 2008) ont permis de comprendre la chaîne de processus allant des précipitations aux débits en rivière en passant par la surface, le sol et le sous-sol. Le modèle MODCOU réalise le transfert de l'eau en surface vers la rivière ainsi que le transfert vertical de l'eau vers les couches de sol plus profondes qui alimentent les aquifères. Il simule le débit des rivières et l'évolution des hauteurs des nappes. La chaîne SIM tourne opérationnellement à Météo-France, depuis 2002, à la Direction de la Climatologie et des Services Climatiques (DCSC). Ainsi, chaque jour une analyse SAFRAN est réalisée sur les données de la veille et permet de mettre à jour en temps réel les variables simulées par ISBA et MODCOU. La même analyse est refaite 1 mois plus tard pour prendre en compte le maximum d'observations de précipitations afin d'avoir une lame d'eau observée de meilleure qualité pour l'analyse SAFRAN servant à alimenter ISBA-MODCOU. Comme mentionné dans la section 3.1.1 dédiée à SAFRAN, cette réanalyse a servi par le passé à étudier à travers des travaux de thèse, l'hydrologie des bassins de l'Adour (Habets, 1998), du Rhône (Etchevers, 2001), de

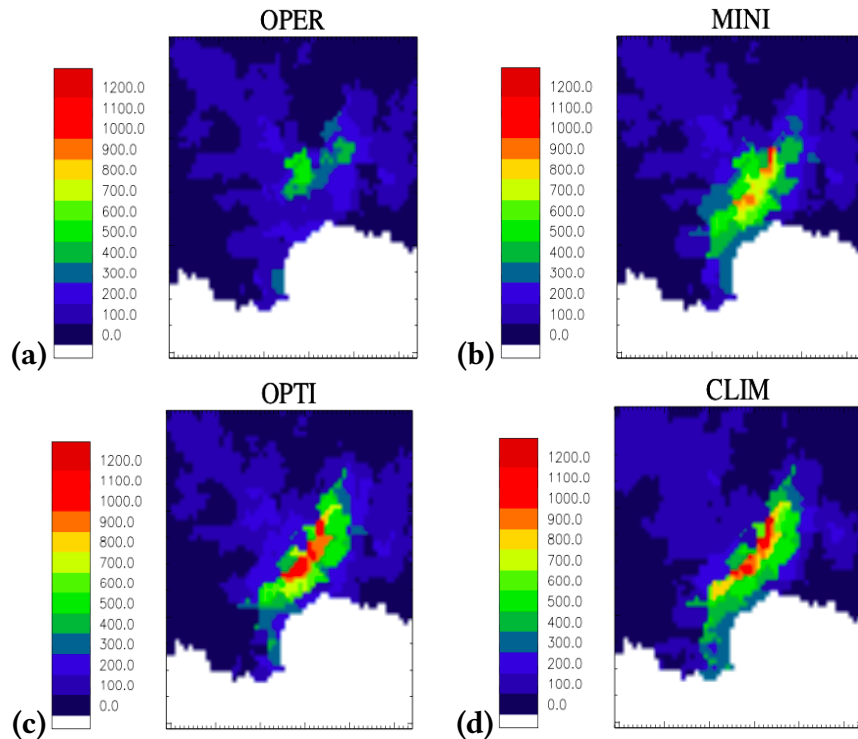


FIGURE 3.4 – Cumul analysé par SAFRAN sur 10 situations à fortes précipitations pour (a) le réseau opérationnel, (b) le réseau opérationnel enrichi de 12 postes de la BDCLIM, (c) le réseau opérationnel enrichi de 50 postes de la BDCLIM, (d) le réseau opérationnel enrichi de 450 postes de la BDCLIM.

l'Adour-Garonne (Voirin, 2003), et ensuite plus généralement de la France (Habets et al., 2008), en servant de forçage atmosphérique au modèle ISBA couplé avec MODCOU. Plus récemment, à partir des années 2010, des travaux sur l'amélioration de la chaîne SIM ont été entrepris sous la direction d'Eric Martin. Plusieurs changements ont été apportés à la chaîne permettant d'en améliorer les performances en matière de température du sol, de représentation du manteau neigeux et de débits. Dans la nouvelle chaîne SIM2, les principaux changements ont porté principalement sur les composantes SAFRAN et ISBA. Le schéma de surface ISBA a été nettement amélioré, grâce à l'abandon de la méthode historique (Noilhan and Planton, 1989) dite "force-restore" au profit d'un schéma diffusif résolvant l'équation de Fourier pour la thermique et de Richards pour les transferts d'eau dans le sol (Decharme et al., 2016). Par ailleurs, le schéma de neige ISBA-Explicit-Snow (Boone et al., 2000) a également été amélioré (Decharme et al., 2016) en important d'autres ingrédients de Crocus (Vionnet et al., 2012) comme l'utilisation d'un albédo spectral qui a sensiblement amélioré la pénétration du rayonnement dans le manteau et donc le bilan de surface de la neige. Une autre avancée majeure a consisté à passer d'un type de végétation agrégé (Noilhan et al., 1997) au sein d'une maille du modèle à l'utilisation de 12 types de végétation, permettant de distinguer les forêts, les cultures, etc., chacun ayant ses propres caractéristiques physiques. Un autre changement ayant permis d'améliorer les résultats des débits a consisté à utiliser un maillage spécifique en montagne pour prendre en compte la variabilité sous-maille au sein d'une même maille (Lafaysse, 2011). De plus, une paramétrisation a été ajoutée pour tenter de représenter le comportement d'un réservoir profond en support aux étiages et permettant de limiter les pics de crue dus à la fonte de la neige. Bien que les étiages n'aient pas été sensiblement améliorés, le fait de retenir l'eau de fonte et de la relâcher pendant la saison sèche a permis de mieux simuler

les pics de crue.

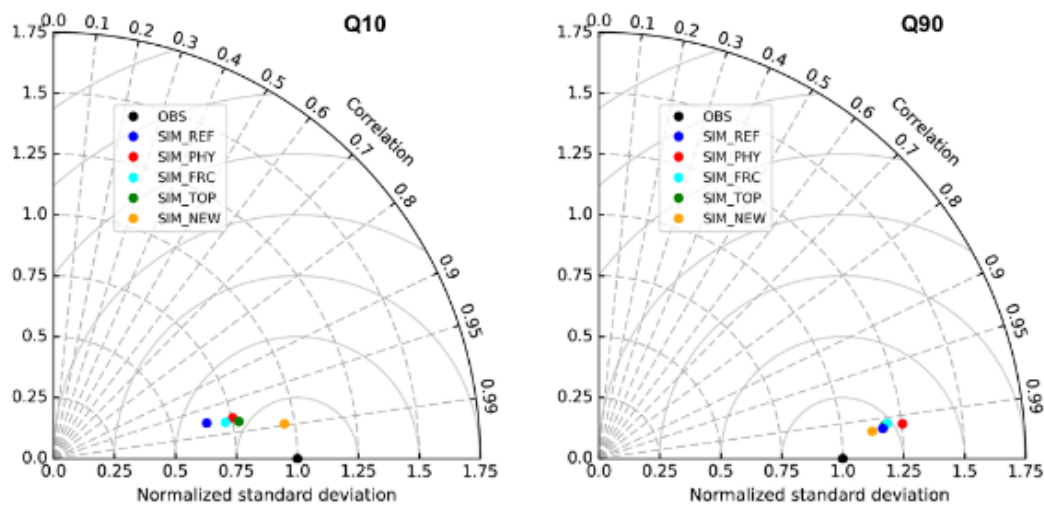


FIGURE 3.5 – Diagramme de Taylor des Q10 et Q90 des débits des rivières en France sur la période 1958-2018. Extrait de Le Moigne et al. (2020).

Ma contribution à SIM2 a été d'abord d'améliorer le rayonnement infrarouge de SAFRAN, en adaptant la paramétrisation développée dans Le Moigne (2002). En effet, plusieurs études ont mis en évidence un déficit de rayonnement solaire et infrarouge de SAFRAN. La paramétrisation proposée initialement consistait à corriger le rayonnement infrarouge en fonction de la nébulosité analysée et de l'altitude. Cependant les tests de sensibilité réalisés pour mettre au point cette approche dans SIM2 ont montré qu'il fallait limiter la dépendance à la nébulosité pour des altitudes inférieures à 1500 mètres, sinon le rayonnement corrigé était trop fort pour les altitudes les plus hautes et générait une fonte trop intense du manteau neigeux. Ma seconde contribution a été de coordonner la rédaction d'un article scientifique (Le Moigne et al., 2020) afin de valoriser l'ensemble des travaux ayant permis de faire progresser la chaîne SIM2, en matière de température de sol, de hauteur de neige et de débits des rivières en France. La figure 3.5 montre les diagrammes de Taylor pour les Q10 et Q90 des débits des rivières en France pour diverses réalisations de SIM2 : la simulation de référence SIM_REF, la simulation avec amélioration de la physique SIM_PHY, puis l'amélioration du forçage infra-rouge SIM_FRC et enfin la simulation prenant en compte en plus le relief sous-maille SIM_TOP et enfin l'intégration d'un réservoir profond pour supporter les étiages SIM_NEW.

3.2.2 Projet UERRA et étude d'impact sur l'hydrologie en Europe

Le projet UERRA (Uncertainties Estimation in Regional Reanalysis) s'est déroulé entre 2014 et 2017. Il a fait suite au projet EURO4M du 7^{ème} programme cadre, dont l'objectif était de produire des données de suivi climatique observées sur l'Europe et des réanalyses atmosphériques à 25 km et de surface à 5 km de résolution horizontale. Ce projet de démonstration avait pour but de montrer l'apport des réanalyses à haute résolution sur l'Europe pour la caractérisation

des variables climatiques essentielles. Le projet UERRA quant à lui, incluait la reconstruction de données observées historiques sur le dernier siècle, l'estimation de l'incertitude dans les réanalyses et la mise en place de service aux utilisateurs. Il constituait donc un précurseur au futur service pour le changement climatique Copernicus (Copernicus climate change service : C3S). J'ai rejoint le projet en cours de réalisation pour contribuer à la mise en place et l'exploitation de simulations combinant réanalyse atmosphérique, schéma de surface et modèle hydrologique, pour étudier l'hydrologie des grands bassins européens. A cet effet, j'ai encadré le post-doctorat de Camille Szczypta, et nous avons mis en place un protocole de simulations, comparable dans son approche à ce qui était fait dans SIM2. Le système déployé prenait en compte comme forçages atmosphériques : les champs de rayonnements solaire et infrarouge, le vent à 10 m, la pression de l'air issus de l'analyse 3D-variationnelle du modèle HARMONIE-ALADIN (opéré par le service météorologique suédois), ayant subi une descente d'échelle pour une résolution cible de 5,5 km sur la zone EuroCordex. En complément, une analyse de surface MESCAN de température et d'humidité de l'air à 2 m ainsi qu'une analyse des précipitations journalières (Soci et al., 2016) étaient réalisées, utilisant comme ébauche les sorties de l'analyse atmosphérique à 5,5 km et des observations venues compléter celles assimilées par le 3D-VAR. MESCAN utilise l'interpolation optimale comme SAFRAN mais la différence principale vient de fonctions de structure différentes, ainsi qu'un réglage de l'analyse de précipitations différent (la notion de climatologie par massif n'existe pas dans MESCAN). La seconde partie du système était composée du schéma de surface SURFEX avec des caractéristiques physiques très proches de celles de la chaîne SIM2 (schéma de diffusion pour les transferts de chaleur et d'humidité dans le sol, schéma de neige multicouches ISBA-ES, etc.) et enfin un couplage aux aquifères grâce au modèle CTRIP (Decharme et al., 2019) dans sa version incluant un aquifère ayant la capacité d'échanger de l'eau par diffusion avec la rivière (Vergnes et al., 2012). La figure 3.6 résume la méthode et le flux de données.

Les données issues de la réanalyse atmosphérique et de surface étaient fournies au pas de temps de 6 heures. Le schéma de surface SURFEX inclut une procédure d'interpolation temporelle linéaire entre 2 instants. Les taux de pluie et de neige sont maintenus constants entre 2 instants de forçage, tout comme les rayonnement solaire et infrarouge. Or ne pas disposer d'une meilleure précision sur la représentation temporelle du rayonnement, en particulier le solaire dont les variations diurnes sont fortes comparées à celles de l'infrarouge, mettait en cause le réalisme du système déployé. Une interpolation du rayonnement solaire tenant compte de l'évolution temporelle de l'angle zénital afin de mieux décrire le rayonnement solaire et de limiter la sous-estimation de ce dernier, qui est moteur dans les simulations SURFEX basées sur le bilan d'énergie et d'eau, a donc été mise en place dans SURFEX. UERRA a permis d'établir un bilan d'eau climatologique sur la période 1961-2010. En effet, le bilan d'eau met en équilibre le stock d'eau dans le sol avec les précipitations qui atteignent la surface et les pertes d'eau de surface et du sol liées à l'évaporation du sol, au ruissellement de surface qui est dirigé vers les rivières et à l'infiltration (encore appelé drainage ou ruissellement de sous-surface) qui alimente les aquifères. La figure 3.7 montre cette répartition des flux d'eau en sortie de SURFEX, qui indique qu'en moyenne sur l'ensemble de la période, la majeure partie des précipitations est évaporée et qu'en fonction des endroits, le stock d'eau correspond environ à 15% de l'apport en eau, le ruissellement à 5% et l'infiltration à 20%.

Lorsque le couplage avec le modèle CTRIP est activé, les flux d'eau de SURFEX, ruissellement de surface et infiltration sont envoyés à une fréquence régulière (par exemple toutes les 3 heures) à CTRIP qui calcule l'évolution des débits et des hauteurs de nappes. La figure 3.8 synthétise les résultats obtenus pour la comparaison des débits par rapport à 120 stations de mesures en

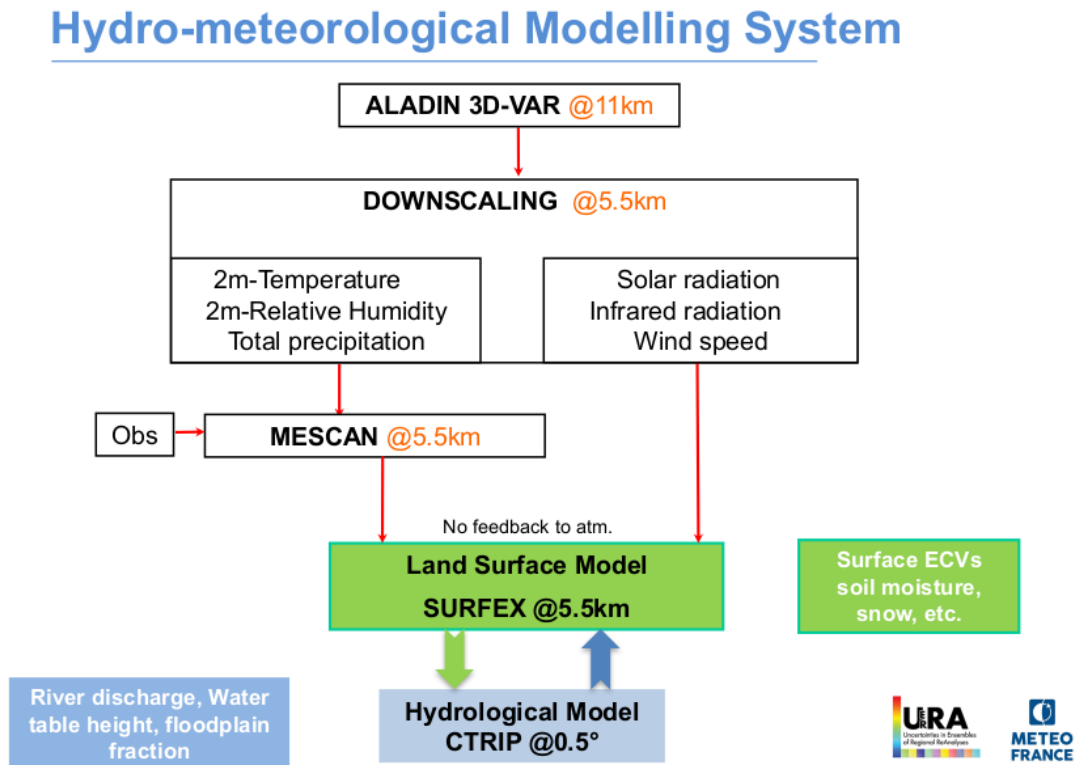


FIGURE 3.6 – Schéma de principe du système déployé dans UERRA, combinant l’analyse atmosphérique, l’analyse de surface MESCAN, le schéma de surface SURFEX et le modèle hydrologique CTRIP pour l’hydrologie.

Europe. Elle montre le rapport entre les lames d’eau simulées et observées ainsi que le critère de Nash définit comme $1. - \sum (Q_{sim} - Q_{obs})^2 / \sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2$, où Q_{sim} est le débit simulé, Q_{obs} le débit observé et $\overline{Q_{obs}}$ le débit mensuel observé moyen. L’exemple de l’hydrogramme de la Loire est donné à titre indicatif.

Comme évoqué ci-dessus, UERRA a constitué la première brique pour la construction d’une réanalyse à haute résolution sur l’Europe, faite dans le cadre du programme Copernicus financé par l’Union Européenne. En effet, Météo-France a participé à un projet pour produire une réanalyse à haute résolution sur l’Europe¹ (pilotee par le service météorologique suédois) et une autre pour une réanalyse sur l’Arctique² (pilotee par le service météorologique norvégien). J’ai eu la chance de coordonner ces deux projets pour le CNRM et de faire partie de l’équipe de gestion de projet en charge de vérifier son bon déroulé et de prendre les décisions adaptées quand cela était nécessaire. La plus grande difficulté pour la réanalyse sur l’Europe était que la solution proposée par notre consortium se basait sur le modèle HARMONIE-ALADIN, qui n’était pas une application opérationnelle, alors que pour la réanalyse Arctique, le modèle HARMONIE-AROME choisi était opérationnel en Norvège. Cela a été source de nombreux problèmes techniques qui ont mis du temps à être résolus à cause d’un système de scripts complexes et pas toujours maîtrisé. Au-delà de ces aspects techniques, nous avons pu mettre en place plusieurs réanalyses sur la période

1. <https://climate.copernicus.eu/copernicus-regional-reanalysis-europe-cerra>

2. <https://climate.copernicus.eu/copernicus-arctic-regional-reanalysis-service>

Water Balance Components: 1961-2010

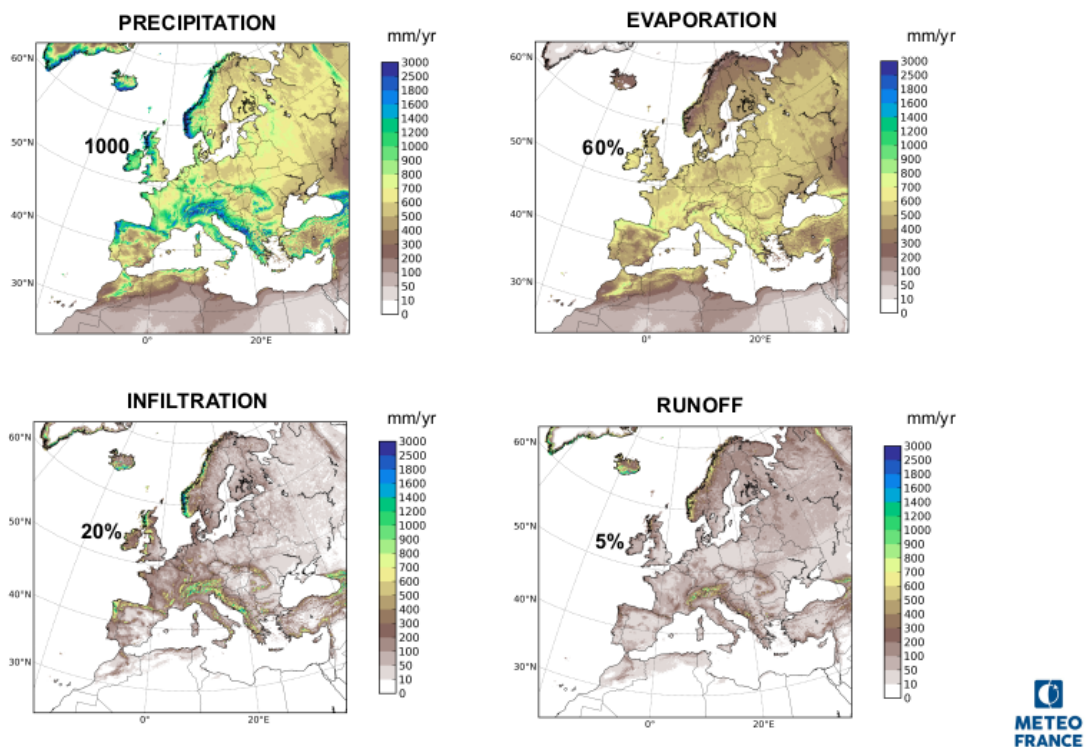


FIGURE 3.7 – Cumul annuel moyen (en mm/an) sur la période 1961-2010 des champs de précipitations, évaporation, ruissellement de surface et infiltration de la réanalyse UERRA sur le domaine EuroCordex.

1984-2021 : CERRA la réanalyse atmosphérique 3D-variationnelle avec HARMONIE-ALADIN à la résolution de 5.5 km ; CERRA-EDA une assimilation de données ensembliste avec 10 membres (dont 9 sont perturbés) à 11 km de résolution, permettant de calculer une matrice de covariance des erreurs d'ébauche dépendant de la situation météorologique du jour pour contraindre les analyses CERRA à haute résolution ; enfin, la réanalyse CERRA-Land, qui intègre l'analyse de précipitations MESCAN à 5,5 km avec les mêmes réglages que celle développée dans UERRA, et ensuite une simulation SURFEX offline alimentée par CERRA et l'analyse de précipitation pour simuler sur l'Europe les variables de surface, de sol et de neige par SURFEX. Dans le cadre du projet, il n'y a pas eu de couplage avec un modèle hydrologique comme dans UERRA. Les données ont été publiées dans la base de données climatique de Copernicus et sont disponibles aux utilisateurs depuis l'été 2022.

Points clés :

- Coordination au CNRM de projets européens sur la réanalyse de surface
- Mise en place du système SAFRAN-France pour l'hydrologie (opérationnel depuis 2002)
- Analyse haute résolution des précipitations

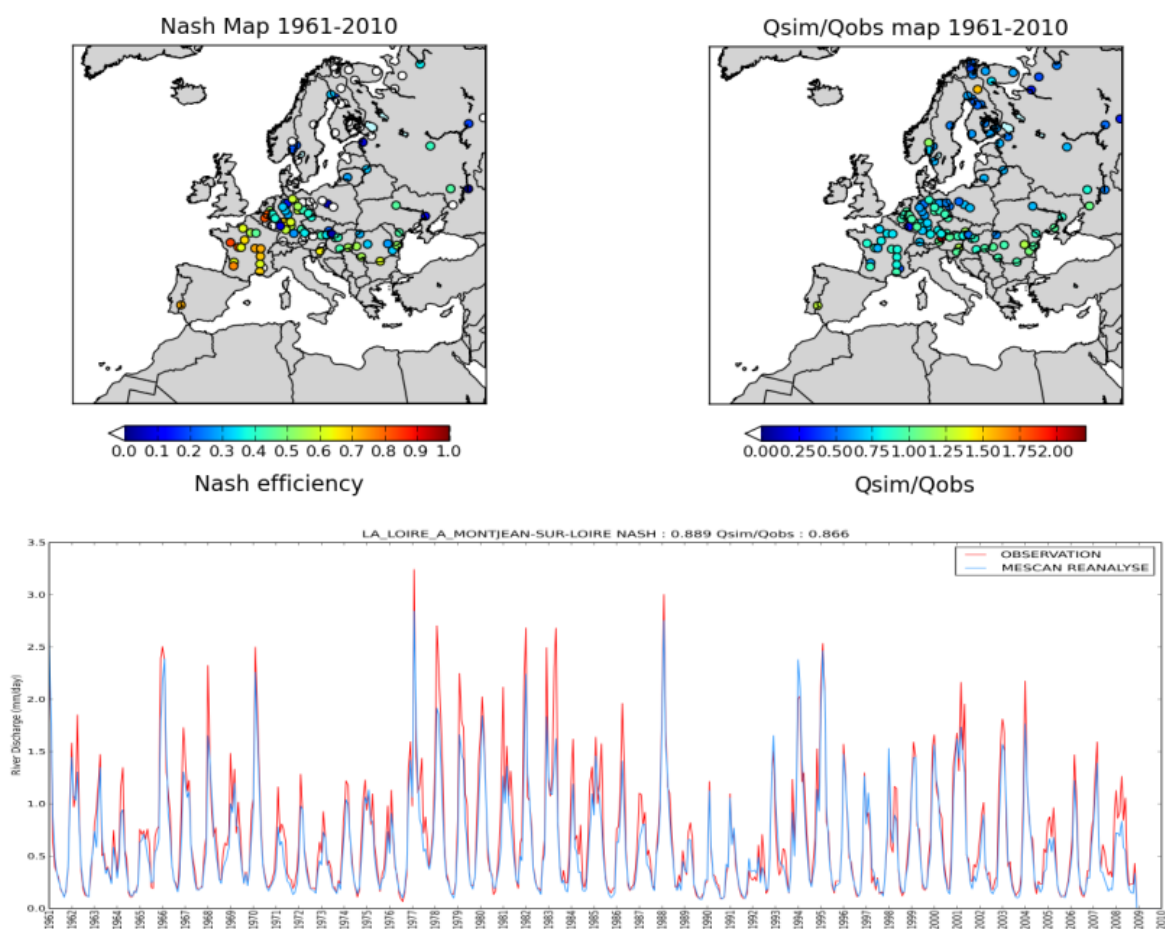


FIGURE 3.8 – Critère de Nash et rapport des lames d'eau des débits mensuels sur les 120 points de mesures, exemple de l'hydrogramme de la Loire (Nash=0.87)

J'ai donc réalisé la mise en place de la réanalyse SAFRAN sur la France pour les applications aval, en particulier l'hydrologie et le suivi des grands bassins français. Mon activité sur les réanalyses s'est étendue à l'Europe, avec la coordination pour le CNRM de projets de réanalyses régionales Copernicus sur l'Europe et l'Arctique, qui sont maintenant opérationnelles et disponibles pour la communauté des utilisateurs.

CHAPITRE 4

Travaux en cours et perspectives

L'objet de ce chapitre est de décrire certains de mes travaux actuellement en cours et qui s'inscrivent dans la continuité de ceux décrits dans les chapitres précédents, i.e. qui mettent en jeu de la modélisation des processus de surface et des réanalyses. Le premier axe concerne naturellement la modélisation des lacs et s'appuie sur la campagne LIAISE et les mesures acquises sur le lac Ivars. Celles-ci ont permis de modéliser le bilan d'énergie du lac et de quantifier son bilan de chaleur. En particulier, l'estimation de la quantité d'eau évaporée est une question scientifique centrale de LIAISE et de façon plus générale, être capable d'estimer l'évaporation en climat présent et aussi en climat futur est aussi très important et fait l'objet d'une étude sur les retenues d'eau en France auxquelles des scénarios de type RCP ont été appliqués. La construction de telles retenues, qu'elles soient collinaires (alimentée par le ruissellement de surface) ou de substitution en plaine (bassines alimentées par le pompage de l'eau dans les aquifères en période de hautes eaux) est essentiellement dédiée à l'irrigation pour l'agriculture. Le deuxième axe est dédié au couplage surface-atmosphère, avec en particulier l'étude de l'impact de l'irrigation sur les circulations locales de type brises. Celle-ci s'appuie sur des simulations couplées Méso-NH/SURFEX à quelques centaines de mètres de résolution horizontale. Méso-NH est un outil précieux pour évaluer d'autres types de couplage comme celui entre modèle atmosphérique et modèle de propagation de feux, dans une optique de prévention des risques liés aux incendies de forêt. Le troisième axe est dédié aux travaux sur des réanalyses sur la France ou l'Europe permettant de générer des jeux de données importants pour alimenter des schémas de surface comme SURFEX et tester des paramétrisations physiques avancées, comme l'irrigation dans ISBA, le modèle de lac FLake, ou encore des cartographies de paramètres de surface évoluant dans le temps et qui constitueront la base des réanalyses futures.

4.1 Modélisation du lac Ivars pendant la campagne de mesures LIAISE

Un des sites de mesures de la campagne LIAISE est le lac Ivars situé dans la zone irriguée près de Lérida, comme le montre l'image de la figure 4.1a où on peut distinguer le lac au centre et les zones de culture qui l'entourent, de couleur brune et verte en fonction de la phase de développement des cultures. Cette campagne de mesures sur le lac Ivars suit à peu près le même protocole

que ce qui a été fait lors de la campagne Thaumex, avec une combinaison de mesures lentes et rapides (flux par eddy-covariance) ainsi que des mesures de température dans l'eau. La différence principale est l'ajout d'un capteur de température dans la couche de sédiment, permettant d'étudier les échanges entre eau libre et sédiments au fond du lac.

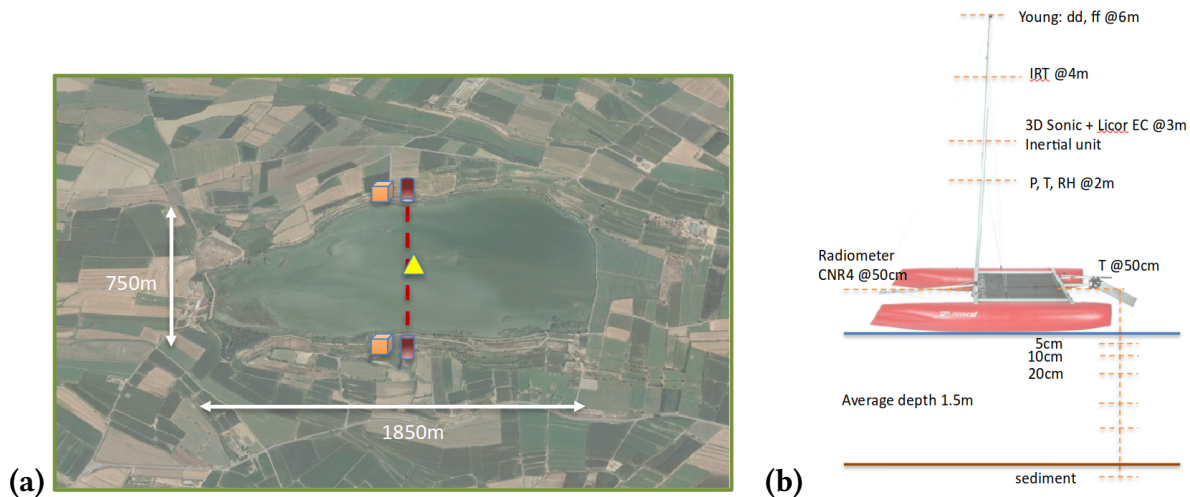


FIGURE 4.1 – (a) Image du site de mesure du lac Ivars de la campagne LIAISE 2021 (le triangle jaune indique l'emplacement du catamaran), (b) Dispositif de mesures sur le catamaran installé sur le lac Ivars

Ce lac de petite taille, d'une superficie d'environ 2 km^2 , a été instrumenté par le CNRM et un catamaran a servi de plateforme flottante sur laquelle des capteurs ont été installés. On y distingue les emplacements des capteurs de rayonnement, des mesures de pression, de température et d'humidité de l'air à 2,4 m, de température infrarouge à 4 m, de l'anémomètre Young à 6,5 m et enfin de l'anémomètre sonic et du Licor à 3 m pour les mesures de flux par eddy-covariance. Par ailleurs, des mesures de températures dans l'eau et dans la couche sédimentaire ont complété ce dispositif, comme le montre la figure 4.1b.

Un des objectifs de ce site était de fournir une mesure de l'évaporation qui pourrait être comparée à celles réalisées sur les autres sites de mesures sur terre, comme à La Cendrosa situé en zone irriguée ou à Preixana en zone aride. Par ailleurs, le second objectif était de modéliser la période de mesures continues i.e. de juin à août 2021, avec le modèle de lac FLake. C'est ce qui a fait l'objet du projet de fin d'études de Benoît Hesse, élève en 3ème année de l'ENM, que j'ai co-encadré avec Guylaine Canut (CNRM/GMEI). L'idée du stage était d'utiliser les observations faites in situ pour simuler offline avec FLake les variables de surface, du bilan d'énergie, les températures dans l'eau et dans les sédiments. La première étape a consisté à trouver la meilleure configuration du modèle permettant de minimiser les erreurs faites sur les différentes variables. Pour les simulations offline, la profondeur réelle du lac de 1,4 m a été utilisée pour permettre des comparaisons avec les mesures du profil de température dans l'eau, dont les capteurs se situaient entre la surface et 1 m de profondeur. Après réglage du coefficient d'extinction lumineuse à $1,2 \text{ m}^{-1}$ (correspondant à un apport d'énergie solaire de 300 W/m^2 à 1 m de profondeur pour un rayonnement incident de 1000 W/m^2), les scores en température de surface se sont avérés assez bons avec en plus un bon accord des températures dans l'eau mesurées et modélisées, même si le modèle a une tendance à générer trop de mélange et avoir un profil thermique homogène la plupart du temps. À l'issue du stage j'ai pu diagnostiquer la quantité de chaleur stockée ou destockée

dans le lac et ce résultat est présenté sur la figure 4.2, qui montre l'évolution des composantes qui contribuent à ce bilan de chaleur. Le lac reçoit de l'atmosphère une certaine quantité d'énergie, qui est transférée dans l'eau et dont une partie est perdue dans les sédiments. Le cycle diurne est très marqué car la température de l'eau plus chaude la nuit génère un flux de chaleur sensible positif alors qu'il est quasi-nul le jour. Le flux de chaleur latente est lui tout le temps positif et traduit une perte d'énergie par le lac.

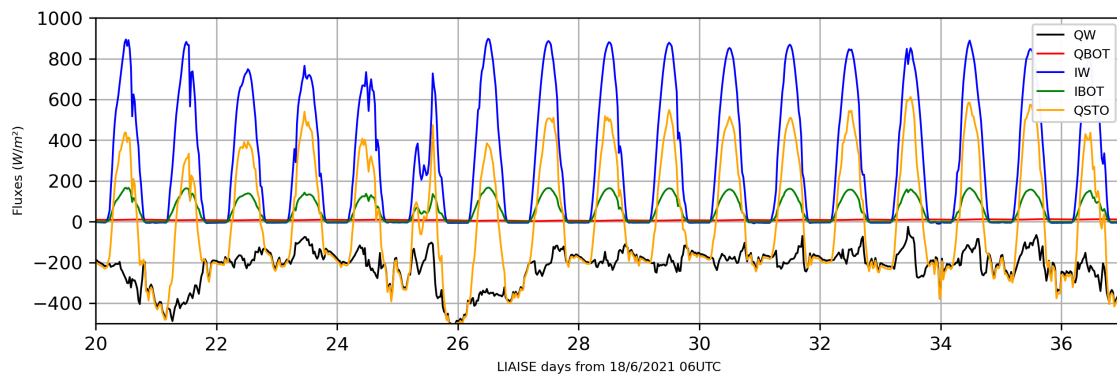


FIGURE 4.2 – Évolution temporelle des termes du bilan de chaleur du lac, incluant les sédiments. QSTO est le terme de stockage, QW est le flux de chaleur à l'interface air/lac, QBOT le flux de chaleur à l'interface lac/sédiments, IW le flux radiatif à l'interface air/lac et IBOT le flux radiatif à l'interface lac/sédiments.

Perspectives : Compréhension et modélisation des lacs

La partie innovante par rapport aux autres études que j'ai pu mener sur les lacs concerne la température dans les sédiments qui a été mesurée en continu et modélisée par FLake. En effet le modèle dispose d'un module simple, également basé sur le concept d'auto-similarité, mais généralement il n'existe pas d'observation pour en évaluer la qualité. Cet aspect a été abordé pendant le stage en comparant la température mesurée à 10 cm dans les sédiments à celle du modèle. On avait prévu dès le départ une mesure de flux en installant une plaque à flux dans les sédiments, mais en début de campagne en mai 2021 le catamaran avait dérivé et s'était retrouvé sur les berges, rompant par la même occasion les câbles permettant cette mesure de flux. Lors de la remise en place au milieu du lac ce dispositif de mesure n'a pas été rétabli et il n'a donc pas été possible de faire le lien entre flux de chaleur et températures dans la couche de sédiment. Améliorer la compréhension et la représentation des échanges de chaleur entre l'eau libre et les sédiments représente un enjeu important surtout pour ce type de lac de faible profondeur. En effet, à 1,5 m de profondeur, les sédiments reçoivent encore une énergie solaire de l'ordre de 165 W/m^2 pour une énergie incidente de 1000 W/m^2 , et par conséquent il va y avoir un transfert de chaleur qui va s'effectuer. Mesurer la température à différents niveaux dans les sédiments et disposer d'une mesure de flux en complément permettrait de valider le calcul du profil thermique et aussi d'estimer la conductivité thermique de la couche sédimentaire qui est généralement mal connue. Ce dernier point sera abordé dans le futur grâce à la collaboration avec Joan Cuxart, qui va installer un dispositif complet de mesures sur le lac Ivars, complété par des mesures dans la couche de sédiments. Par

ailleurs, une collaboration sur la modélisation du lac Ivars a commencé avec Joan Cuxart, qui s'intéresse aux observations et Anne Verhoef de l'université de Reading, qui s'est intéressée à l'évaporation des lacs et a développé un module simple de bilan d'énergie. Ce sera l'occasion de comparer nos approches en matière de modélisation et également de valoriser le travail réalisé pendant le stage.

De plus, dans le cadre de la prévision numérique du temps, il est envisagé d'activer le modèle FLake pour mieux représenter le cycle diurne de la température de surface et donc le couplage entre lacs et atmosphère. Ce travail a déjà commencé dans les modèles AROME et ARPEGE mais l'impact le plus important est attendu dans ARPEGE au niveau des lacs ayant une grande extension horizontale, comme les Grands lacs américains, ou les régions proches de la Finlande où la couverture de lacs est la plus forte. Ce travail se poursuivra dans les années qui viennent en collaboration avec le groupe GMAP.

Le cycle de l'eau à l'échelle globale va aussi bénéficier des apports de la modélisation avec FLake. En effet, dans le cadre de la thèse de Thibault Guinaldo, un modèle de bilan de masse a été développé et interfacé avec le modèle de routage de l'eau en rivière CTRIP. Ce nouveau modèle MLake permet de représenter les réservoirs et d'y inclure certains aspects liés à l'action humaine comme les barrages ou l'irrigation des cultures. Le couplage de FLake avec MLake se fera grâce à l'évaporation de FLake qui servira à alimenter MLake pour calculer l'évolution du bilan de masse des réservoirs.

La connaissance de l'évaporation des surfaces d'eau est un enjeu important et d'actualité pour les études d'implantation de réservoir pour l'agriculture. Pouvoir l'estimer à des horizons plus lointains est l'objet de la partie suivante.

4.2 Impact du changement climatique sur les retenues d'eau

La disponibilité de la ressource en eau est devenue depuis plusieurs années un enjeu sociétal majeur. En particulier, pour l'agriculture, il est de plus en plus difficile de faire face aux sécheresses qui se répètent, associées à des températures élevées et une pluviométrie faible. La pression sur le domaine agricole augmente tous les ans et ceci a favorisé l'émergence de projets de construction de retenues d'eau afin de pouvoir assurer des apports suffisants par irrigation lors de la saison sèche. Depuis les années 2010, de telles constructions sont réglementées pour limiter les conflits d'usage locaux. Ainsi, les retenues de substitution ont vu leur nombre augmenter sensiblement depuis une dizaine d'années. Il s'agit d'ouvrages artificiels permettant de substituer des volumes prélevés à l'étiage par des volumes prélevés en période de hautes eaux. Ces retenues sont connectées ou non à des cours d'eau. Les retenues de substitution, qui ne sont pas reliées à un cours d'eau, sont aussi appelées des bassines à cause de leur forme. Elles sont généralement construites dans des zones plates, par opposition aux retenues collinaires qui sont remplies par les eaux de ruissellement et donc bâties généralement sur des terrains avec un relief suffisant pour l'écoulement et la captation de l'eau. L'alimentation des bassines se fait donc en périodes de hautes eaux par prélèvement de l'eau par pompage dans les nappes souterraines. L'eau ainsi stockée à l'automne et en hiver peut être mobilisée pour l'irrigation des cultures au début du printemps et en été. Ces

retenues sont généralement de faible profondeur, elles vont donc facilement se réchauffer l'été et une partie de l'eau va s'évaporer. La quantité d'eau perdue par évaporation est une question scientifique qui n'a pas de réponse précise à ce jour, en particulier parce que les quantités d'eau prélevées sont généralement peu communiquées par les exploitants et par conséquent l'usage des bassines est peu documenté et demeure un sujet sensible. Le travail présenté dans cette section a été réalisé dans le cadre du stage de master de Sonia Meherzi de l'Ecole Nationale de la Météorologie, projet de fin d'étude que j'ai encadré entre février et août 2022.

Afin d'essayer de quantifier l'évaporation de ce type de retenues (déconnectées du réseau de rivières), nous avons fait l'hypothèse que chaque retenue pouvait être représentée par un lac endoréique, c'est-à-dire où il n'y a ni écoulement de surface, ni écoulement souterrain et où les seules pertes en eau sont causées par l'évaporation. Pour tenter d'estimer ces pertes par évaporation pour une période passée, nous avons utilisé la réanalyse SAFRAN afin d'alimenter le modèle FLake (voir section 2.2), et simuler l'évaporation. Chaque maille de la grille SAFRAN était occupée entièrement par un lac avec un niveau d'eau constant au cours du temps, car FLake ne résout pas le bilan de masse, c'est-à-dire que la masse d'eau ne varie pas, mais il résout simplement le bilan thermique. La première partie de l'étude a été consacrée à la sensibilité du modèle de lac FLake aux paramètres profondeur et turbidité, qui sont les principales variables auxquelles le modèle est sensible. La turbidité caractérise la quantité de particules solides présentes dans l'eau qui ont pour effet de limiter la pénétration de la lumière, son effet dans le modèle est l'atténuation du rayonnement solaire avec la profondeur et est représenté par une loi de Beer-Lambert. La profondeur est le paramètre le plus déterminant dans les simulations avec FLake mais la turbidité peut jouer un rôle important dans les lacs peu profonds en particulier. Un ensemble de réanalyses SAFRAN-FLake, i.e. basées sur la réanalyse SAFRAN appliquée au modèle FLake, pour plusieurs profondeurs et plusieurs intensités de turbidité ont été réalisées sur la période 1958-2018 afin d'étudier le comportement du modèle et surtout d'en estimer l'évaporation. Les résultats des réanalyses ont été comparés en matière d'évaporation aux données satellitaires GLEAM (Global Land Evaporation Amsterdam Model) disponibles sur le domaine, à savoir seulement 2 lacs dans le sud-ouest de la France et 2 autres en Suisse. Cette comparaison à des mesures a montré que le modèle représentait correctement la variabilité interannuelle de l'évaporation et de la température de surface de l'eau, quelle que soit la profondeur et la turbidité. La configuration avec la plus faible profondeur est en moyenne annuelle plus froide que les autres. En effet, même si un lac peu profond chauffe plus en été, ses pertes par rayonnement infrarouge la nuit et pendant les autres saisons font qu'il sera en moyenne plus froid que ceux dont l'inertie thermique est plus grande. La turbidité a un fort impact sur l'évaporation simulée des lacs de faible profondeur, en particulier le site du lac d'Hourtin dans le sud-ouest de la France montre un accroissement de 45% de l'évaporation moyenne sur les 60 ans de la réanalyse lorsque le coefficient d'extinction de la lumière passe de 0.5 m^{-1} (eau peu turbide) à 1 m^{-1} (eau turbide).

Pour aller plus loin nous avons voulu quantifier l'impact du changement climatique sur les retenues de substitution. Celles-ci sont généralement de faible profondeur, i.e. quelques mètres et leur turbidité est méconnue et fait l'objet d'une grande incertitude. Nous avons choisi de les représenter par des lacs et de les modéliser avec le modèle FLake ayant pour caractéristiques une profondeur de 2 m et une turbidité moyenne de 1 m^{-1} . Le protocole suivi pour réaliser cette étude d'impact est d'utiliser comme forçages pour FLake, les projections climatiques régionalisées et débiaisées, issues du portail DRIAS (<https://www.drias-climat.fr/>) pour plusieurs couples

de modèles de climat globaux (GCM) et régionaux (RCM) et des scénarios d'émission de gaz à effet de serre plus ou moins sévères, à savoir les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 correspondant respectivement à un forçage radiatif moyen de $+4.5 \text{ W/m}^2$ et $+8.5 \text{ W/m}^2$. Au total, 4 périodes entre 1980 et 2100 ont été choisies, chacune de 20 ans, la période historique 1980-2000 et 3 horizons 2020-2040, 2050-2070 et 2080-2100. Pour chaque horizon et chaque scénario, on regarde la distribution des écarts des variables issues du modèle FLake (température de surface, température moyenne, évaporation, etc.) entre la période de référence et les projections climatiques des couples de GCM/RCM. On s'intéresse plus particulièrement aux comportements médian et extrême fort, ce dernier étant caractérisé par les valeurs supérieures au 95^e percentile (Q95) des distributions. Les simulations des modèles de climat sont généralement biaisées et pour les utiliser dans des études d'impact, il faut corriger ces biais. C'est l'objet de la méthode ADAMONT (Verfaillie et al., 2017) développée et appliquée opérationnellement à Météo-France, qui est une méthode de descente d'échelle et d'ajustement de biais de scénarios climatiques régionaux. Elle est basée sur une méthode de correction quantile-quantile par rapport à un jeu d'observations ou de réanalyses comme SAFRAN, et la prise en compte de types de temps. Les RCM, forcés au bord par les GCM, ont été corrigés pour obtenir des scénarios débiaisés continus au pas de temps horaire pour les variables température, humidité, vitesse du vent, rayonnement solaire et infrarouge, pluie et neige. La comparaison à l'échelle mensuelle, en moyenne sur la France, entre la réanalyse SAFRAN-FLake et les simulations des GCM/RCM sur la période historique indique que les modèles de climat évaporent un peu moins en hiver et début de printemps (4 mm/mois) et un peu plus l'été (10 mm/mois), mais que l'accord entre la réanalyse et les simulations climatiques est peu biaisé. C'est un résultat important car il confirme que la configuration du modèle de lac choisie permet de représenter correctement la période historique et est adaptée pour étudier les horizons plus lointains.

La figure 4.3 montre l'évolution temporelle de la température moyenne annuelle de la colonne d'eau sur la France, pour tous les couples GCM/RCM, pour la période historique et jusqu'en 2100 pour les 2 scénarios choisis. On note un réchauffement progressif (quasi-linéaire) depuis le début de la période historique jusqu'à la fin du siècle pour le RCP45 et plus marqué pour le scénario le plus sévère à partir de 2040. Ainsi, une augmentation de 2 K est prévue en fin de siècle pour le RCP4.5 et jusqu'à 4 K pour le RCP8.5 par rapport à la période historique. Cela se traduit (Fig. 4.4) par une évaporation qui augmente de 10% pour le RCP4.5 et de 20% pour le RCP8.5 à la fin du siècle comparé à la fin de la période historique.

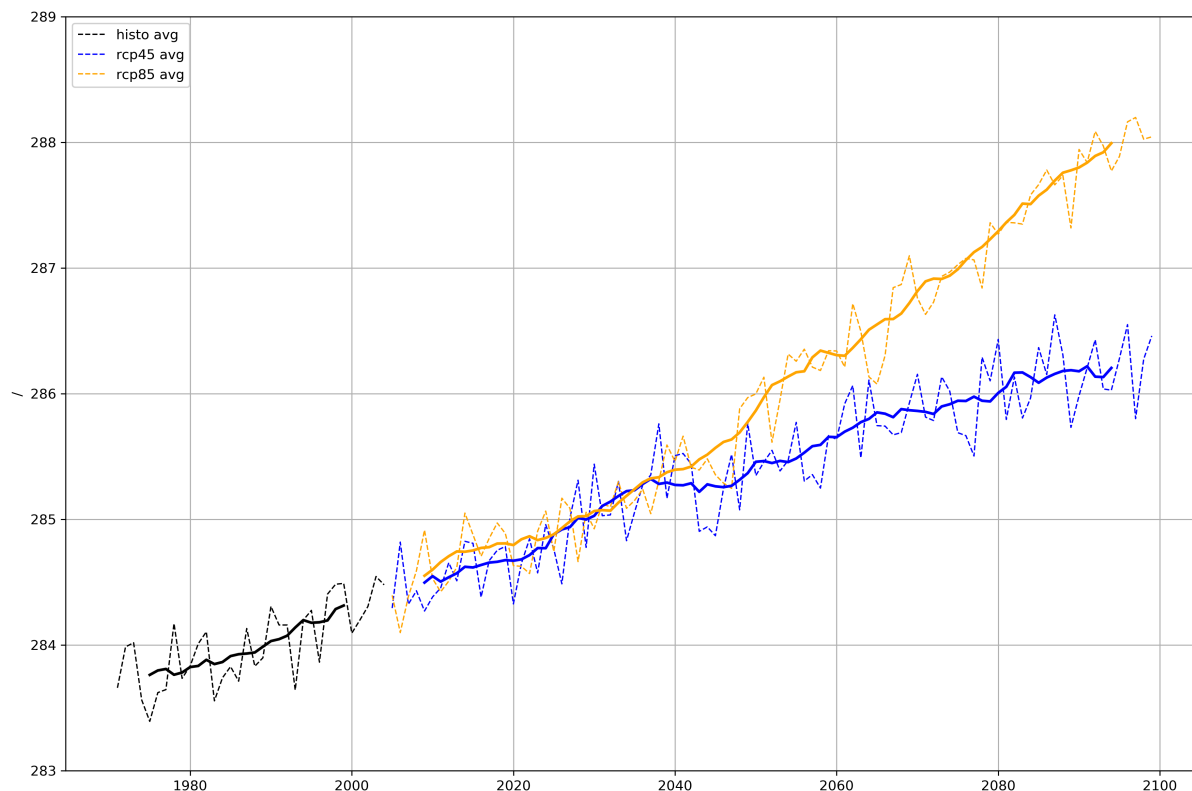


FIGURE 4.3 – Moyenne annuelle sur la France de la température moyenne de l'eau des couples GCM/RCM (pointillés) pour la période historique (noir) et pour les scénarios climatiques RCP45 (bleu) et RCP85 (orange). Les lignes en trait plein représentent la moyenne glissante sur 5 ans. (communication personnelle, Le Moigne (2023))

Perspectives : Modélisation de l'évaporation des réservoirs

L'évaporation des retenues d'eau de tous types, c'est-à-dire incluant les retenues de substitution, les retenues collinaires, les réservoirs, les lacs, etc. est mal connue. Par ailleurs, il y a une forte demande sociétale en ce sens et améliorer cette connaissance représente un enjeu scientifique qui prend de l'ampleur. Pour tenter de répondre à cette question, il faut commencer par disposer d'observations d'évaporation sur de nombreux ouvrages. Certaines campagnes de mesures ont mesuré l'évaporation par eddy-covariance, mais les sites de mesures sont trop rares et les mesures sont généralement effectuées sur un temps court. Les mesures satellitaires, quant à elles sont nombreuses et disposent d'une couverture temporelle importante. Certains produits tentent d'estimer l'évaporation à partir de mesures satellitaires comme par exemple le produit global GLEAM. Cependant l'incertitude de l'évaporation restituée est forte à cause de la résolution spatiale et de la difficulté à séparer l'évaporation sur des petits réservoirs lorsque le signal ne représente pas uniquement de l'eau. Les nouveaux satellites ont des résolutions spatio-temporelles qui augmentent. C'est le cas du satellite SWOT lancé en décembre 2022 et qui est capable de distinguer les surfaces d'eau continentales avec une résolution de quelques centaines de mètres. L'utilisation croisée de l'évolution des surface et des hauteurs d'eau de ces réservoirs permettra d'estimer leur variation de volume et d'en estimer l'évaporation, grâce au croisement

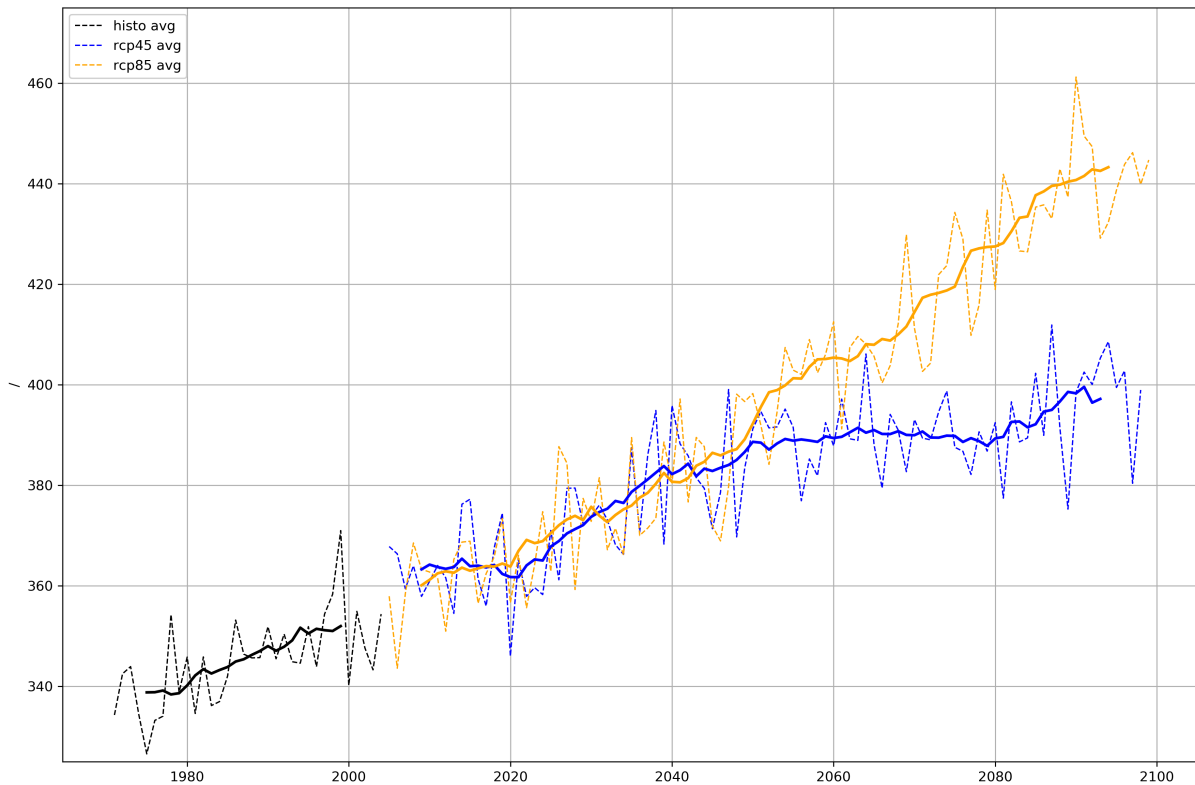


FIGURE 4.4 – Moyenne annuelle sur la France de l'évaporation (kg/m^2) des couples GCM/RCM (pointillés) pour la période historique (noir) et pour les scénarios climatiques RCP45 (bleu) et RCP85 (orange). Les lignes en trait plein représentent la moyenne glissante sur 5 ans.

avec d'autres données comme les précipitations. Ensuite, on peut essayer de modéliser l'évaporation de ces réservoirs, grâce à des modèles physiques comme FLake. A noter que j'ai pu tester le calcul de l'évaporation à partir des formulations simples comme celle proposée par Penmann-Monteith, mais cette paramétrisation conduit à une évaporation fortement sous-estimée la nuit.

Un projet ANR en collaboration (ENS, INRAE, CNRM, etc.) avait été proposé pour justement estimer l'évaporation des retenues d'eau, améliorer la compréhension des conditions propices à la dégradation de la qualité de l'eau et de la formation d'algues, et enfin faire le lien entre pertes évaporatives et qualité de l'eau. Ma contribution était de modéliser les pertes évaporatives avec FLake et de participer à des comparaisons à des observations. Ce projet n'a malheureusement pas été retenu malgré l'importance de la question soulevée. Une partie de ces questions sera abordée dans le cadre du Programme et Equipement Prioritaire de Recherche (PEPR) OneWater à laquelle je participe également en tant que co-organisateur du volet réanalyses du Plan Ciblé 2.

L'évaporation des réservoirs est un élément clé quant à la quantité d'eau qui peut être prélevée dans les rivières ou les nappes pour l'irrigation. Il est donc important aussi de renforcer les connaissances sur l'irrigation, en particulier dans les modèles couplés surface/atmosphère, car elle n'est généralement pas représentée et des travaux récents montrent qu'il est nécessaire de bien la prendre en compte. Au CNRM

ce travail a commencé par l'étude de l'impact de l'irrigation sur le couplage surface/atmosphère et fait l'objet de la partie suivante.

4.3 Rôle de l'irrigation dans le couplage surface-atmosphère

L'impact de l'activité humaine, en particulier l'irrigation, sur le couplage surface-atmosphère, fait l'objet de travaux de recherches impulsés, entre autres, au niveau international par le groupe GEWEX. En effet, il apparaît de plus en plus important de prendre en compte les effets anthropiques dans les modèles de prévisions numériques à méso-échelle et de climat afin d'en améliorer le réalisme. Le projet ANR HILLAISE (Human Imprint on Land surface Interactions with the Atmosphere over the Iberian Semi-arid Environment) coordonné par Aaron Boone (fin en 2024) a pour but d'améliorer la compréhension de l'impact de l'anthropisation sur le cycle de l'eau en termes d'interactions surface-atmosphère-hydrologie, et d'aborder les limitations des modèles de surface et hydrologiques, à l'état de l'art, et de représenter tous les aspects du cycle de l'eau continental dans un environnement semi-aride sur la péninsule ibérique. Pour vérifier que les modèles répondaient bien à un forçage anthropique comme l'irrigation, j'ai réalisé avec Sylvie Donier (GMME/SURFACE) en 2019 une étude préliminaire permettant d'évaluer l'impact de l'irrigation dans le modèle Méso-NH, à basse résolution (8 km de résolution horizontale). Pour cela, la journée anticyclonique du 16 juillet 2016 a été simulée avec Méso-NH, couplée toutes les 3 heures aux analyses du modèle opérationnel AROME à 1,3 km, pour un domaine centré sur la zone irriguée de Lérida, dont la luzerne représente la culture principale. Ainsi, nous avons considéré (i) une simulation de référence initialisée avec AROME et avec les paramétrisations physiques suivantes : un schéma de turbulence unidimensionnel (Bougeault and Lacarrere, 1989), un schéma de convection peu profonde en flux de masse (Pergaud et al., 2009), et le schéma de microphysique froide ICE3 (Pinty and Jabouille, 1998), et (ii) une simulation dite avec irrigation, différant de la référence par l'initialisation de l'eau du sol, forcée à la capacité au champ, et l'activation d'un module simple d'irrigation ajoutant une quantité d'eau constante sous forme de précipitation au sol, de façon à maintenir le sol tout le temps humide. La figure 4.5 illustre l'impact de l'irrigation sur la réponse du modèle Méso-NH.

Ces résultats montrent l'effet attendu de l'irrigation, c'est-à-dire un refroidissement et une humidification de la zone irriguée qui génèrent en surface une baisse du flux de chaleur sensible et une hausse significative du flux de chaleur latente. La convection est donc freinée, voire inhibée du fait de la présence de cette zone irriguée, dont la superficie couvre une partie du bassin de l'Ebre. L'objectif de cette pré-étude était donc atteint, puisque cette paramétrisation très simplifiée de l'irrigation permettait de refroidir l'air près de la surface de plusieurs degrés et d'apporter 20% d'humidité dans les basses couches avec une baisse du flux de chaleur sensible à 16 UTC de l'ordre de 200 W/m^2 compensée par une hausse du flux de chaleur latente du même ordre de grandeur. L'effet de l'irrigation est aussi visible sur le champ d'énergie cinétique turbulente qui guide la hauteur de la couche limite comme montré sur la figure 4.6. En effet, la simulation de référence indique une couche limite bien développée avec un maximum de TKE à 12UTC et l'activation de l'irrigation inhibe ce développement.

Cette étude s'est poursuivie avec la thèse de Tanguy Lunel, que je co-encadre avec Aaron Boone. Elle a commencé il y a un an (en 2022), et a pour objectif d'étudier le rôle de l'irrigation sur le couplage surface-atmosphère en zone semi-aride. Une campagne internationale de mesures

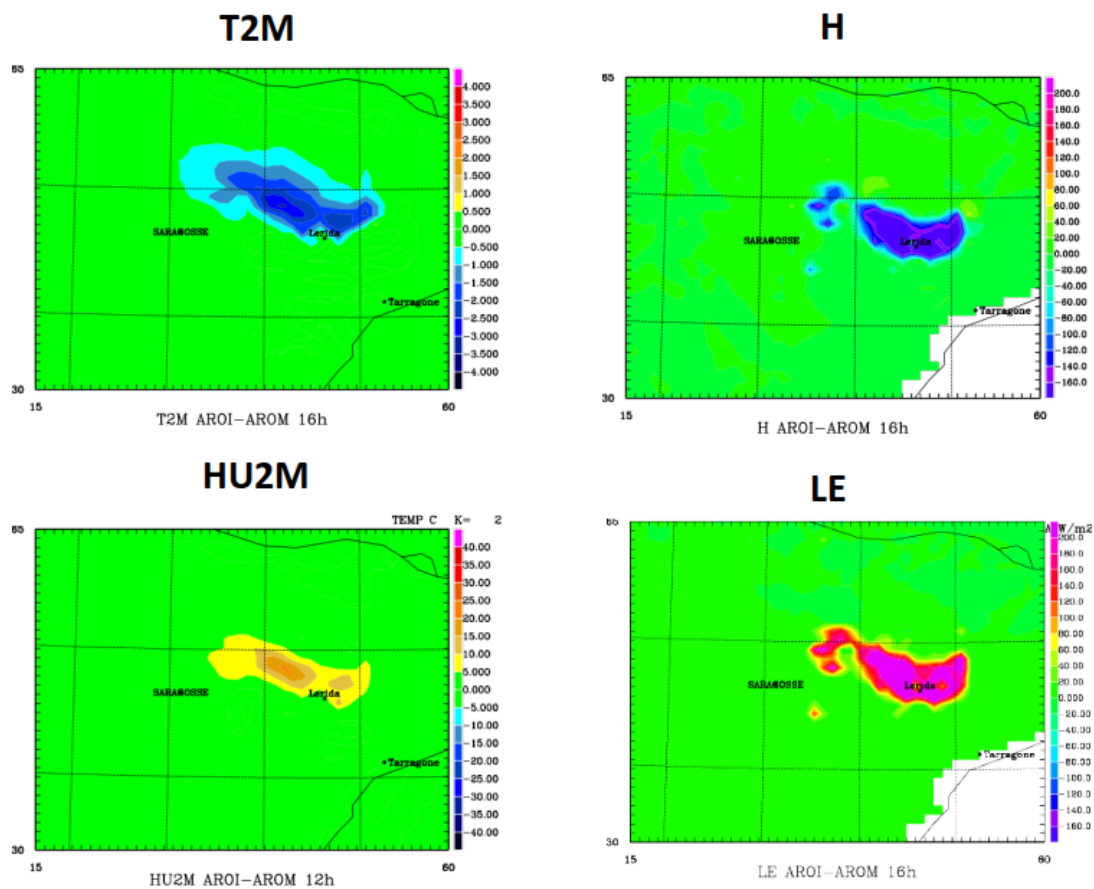


FIGURE 4.5 – Cartes de différences de température à 2m, d’humidité à 2m, de flux de chaleur latente (LE) et de flux de chaleur sensible (H) pour la journée du 16 juillet 2016 à 16 UTC.

a été réalisée à l’été 2021 afin de documenter plusieurs sites du bassin de l’Ebre, où l’irrigation est très développée. Ainsi des mesures réalisées sur des tours à flux et dans le sol, ont été effectuées sur des sites contrastés, irrigués ou non. Des mesures avions ont complété le dispositif au sol pour documenter l’évolution diurne des caractéristiques de la couche limite et les contrastes existant entre les zones sèches et humides. La première partie de la thèse a consisté à mettre en place une configuration de modélisation permettant de simuler l’irrigation dans le modèle Mésio-NH grâce à une approche simplifiée mais plus réaliste que celle utilisée précédemment et d’en étudier qualitativement l’impact sur les variables simulées. Les simulations avec irrigation ont eu l’effet attendu, c’est-à-dire un refroidissement local, une baisse de l’activité convective et une humidification des basses couches. Ceci a ensuite permis de simuler des jours de Périodes d’Observations Intensives (POI) de la campagne LIAISE et de commencer à les confronter aux observations disponibles. Une série de 15 jours consécutifs entre le 15 et le 30 juillet 2021 a été simulée à la résolution horizontale de 2 km, complétée par une simulation des 21 et 22 juillet à 400 m de résolution. Celles-ci ont permis de comparer les résultats aux mesures des différentes POI. Les premiers résultats montrent un bon comportement du modèle avec module d’irrigation comparé au modèle sans irrigation. En particulier, Tanguy a mis en évidence la présence d’une brise d’irrigation entre la zone irriguée et la zone non-irriguée, et en a décrit les processus de formation et d’évolution. Ces travaux en mode couplé sont novateurs et d’autres modèles essaient aussi d’introduire une paramétrisation de l’irrigation (le UK Metoffice dans le modèle UM, l’université de Barcelone dans le modèle WRF

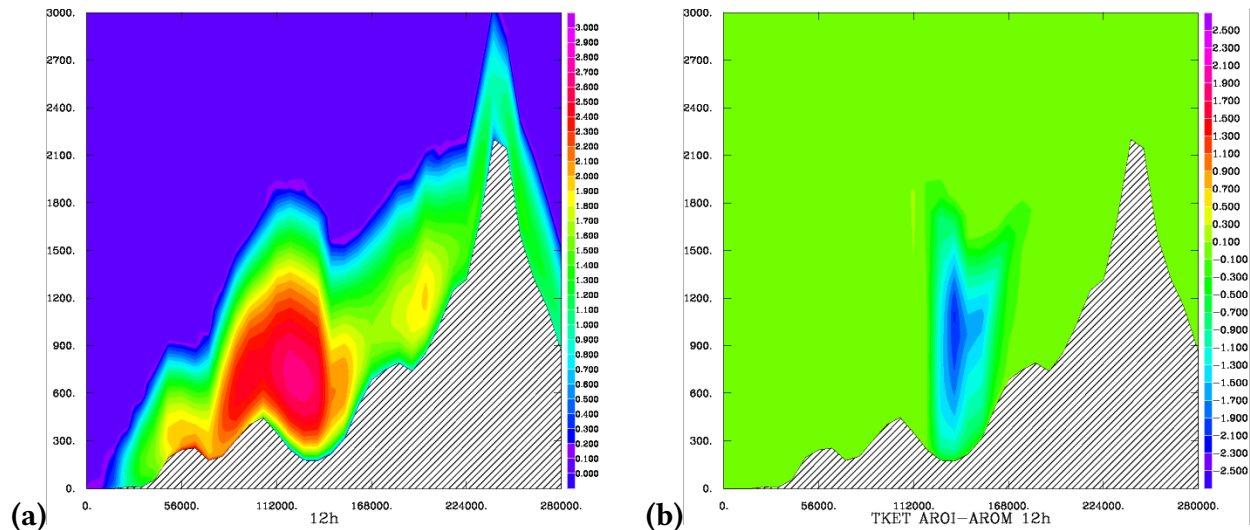


FIGURE 4.6 – Coupe verticale sud-nord de profils d'énergie cinétique turbulente (TKE) à 12UTC, **(a)** de la simulation de référence et **(b)** de la différence de TKE entre la simulation avec irrigation et la simulation de référence. La zone irriguée se trouve entre la vallée de l'Ebre au sud et les Pyrénées au nord (abscisse 140000).

par exemple). Cette étude des observations et des simulations Mésos-NH fait l'objet d'un article en cours de préparation. Le module d'irrigation simple développé par T. Lunel a été implémenté dans SURFEX et pourra être comparé au modèle très complexe de Druel et al. (2022), également disponible dans SURFEX.

Perspectives : Impact des lacs sur les circulations atmosphériques locales

La question posée s'inscrit dans la continuité de la thèse de Tanguy Lunel, qui a mis en évidence des phénomènes de brise induits par le contraste entre zone irriguée et zone non-irriguée. En effet le gradient thermique fort entre une zone aride et sa zone voisine irriguée, identifié dans les observations de la campagne LIAISE et reproduit par des simulations à haute résolution avec Mésos-NH, est à l'origine de brises locales de la zone humide vers la zone sèche en surface avec courant de retour inverse en altitude. Ce type de brise a un impact direct sur l'épaisseur de la couche limite, qui baisse de 2 km au-dessus de la zone sèche à 400 m au-dessus de la zone irriguée. Le lac d'Ivars constitue une source d'humidité continue, associée à un flux de chaleur latente qui domine le flux de chaleur sensible et donc a tendance à inhiber la convection. Or ce lac est situé dans la zone irriguée et on peut penser qu'il va se comporter comme une zone naturelle humide (la thèse de Tanguy Lunel a montré que c'était le cas en ce qui concerne l'intensité des flux de surface). Il est entouré, comme les autres parcelles naturelles, de zones irriguées et non-irriguées. Est-ce que des brises de lac peuvent se mettre en place entre le lac et des zones non encore irriguées est une question intéressante qui pourrait être abordée par des simulations numériques à des résolutions autour de la centaine de mètres afin de représenter correctement les hétérogénéités de surface. Cette question du rôle des hétérogénéités de surface sur les circulations locales, voire sur le déclenchement de la convection est étudiée, entre autres, dans l'ANR MOSAI (Lohou et al. 2020) et pourrait donner lieu à des tra-

vaux de recherche combinant des surfaces hétérogènes comme des zones sèches, des zones irriguées et des étendues de lac, proches de la configuration de la campagne de mesures LIAISE. Ce travail permettrait de mesurer la capacité du modèle FLake de bien représenter les processus de fine échelle et le cas échéant de proposer des améliorations du modèle.

Se pose alors la question d'échelle et de la résolution horizontale permettant de modéliser ces phénomènes de petite échelle. Des études récentes (Rochetin et al., 2017) ont commencé à se pencher sur ces questions de résolution. La thèse de Tanguy Lunel a montré qu'une résolution horizontale de 400 m permettait de représenter correctement un phénomène de brise induite par un contraste entre une zone irriguée et une zone non-irriguée. Cette résolution est-elle suffisante pour détecter si des brises de lac existent ou du moins des circulations locales générées par des contrastes entre lac et zone naturelle ? Cette question reste pour le moment ouverte, mais des outils numériques comme Méso-NH permettent de l'aborder. Réaliser des simulations à plus haute résolution avec Méso-NH est un travail que j'envisage depuis plusieurs années, en particulier, des simulations de type simulations de grands tourbillons (Large Eddy Simulations, LES) permettant d'étudier le cycle diurne de la turbulence sur des lacs. Une première approche peut consister à mettre en place une LES idéalisée, c'est-à-dire forcée par les flux de surface mesurés sur le catamaran, puis d'aller vers une LES couplée avec la surface et en particulier le modèle FLake.

Enfin, en termes de modélisation des lacs, même si le modèle FLake est adapté pour des applications opérationnelles (je participe au suivi de l'activation de FLake dans les modèles AROME et ARPEGE de Météo-France) il reste un modèle simple permettant de représenter correctement le cycle diurne. Par contre, il n'est pas adapté pour bien représenter les processus froids (note du concepteur du modèle) et a tendance à produire une épaisseur de glace trop importante en hiver et donc de trop isoler l'air de l'eau libre, ceci étant renforcé par le dépôt de neige sur la glace. La conséquence directe est une trop forte stabilisation de l'air à l'interface et des biais froids forts dans les modèles de climat (Le Moigne et al., 2016). Plusieurs options sont possibles, comme améliorer le traitement des processus froids dans FLake, en particulier le schéma de neige. En effet, la partie gel du lac est intégrée au modèle et est difficile à contourner. Par contre le module de neige pourrait être remplacé par un couplage avec le schéma de neige ISBA-ES (Decharme et al., 2010) et bénéficier des avancées récentes de ce modèle. Une autre approche serait d'implémenter un modèle de lac capable de bien représenter les processus de surface comme le gel, l'effet de la neige, la possibilité d'avoir une glace fractionnaire, ainsi que les processus à l'intérieur de l'eau, comme la turbulence permettant d'homogénéiser les couches de différentes densités, ou bien la stratification qui se développe sous l'effet d'une hausse de la température de l'air. Le modèle CSLM (Canadian Small Lake Model) de MacKay (2012) dispose de ces propriétés, et des échanges d'implémentation de CSLM dans SURFEX font partie de travaux collaboratifs déjà évoqués avec le concepteur du modèle. L'intérêt scientifique est multiple, cela permettrait d'améliorer les biais des modèles globaux ARPEGE que ce soit en PNT ou en climat, mais aussi de disposer dans SURFEX de deux modèles dont la comparaison serait bénéfique pour nos applications. En particulier, être capable de proposer un cadre de comparaison basé sur SURFEX, i.e. avec la même interface est

un atout fort, qui offrirait en plus la possibilité d'utiliser le même modèle de calcul de flux de surface.

Un autre type de couplage de Méso-NH à SURFEX par les flux est également très important et il concerne le couplage avec un modèle de propagation de feux pour identifier les zones brûlées suite à un incendie qui se propage. C'est l'objet du paragraphe qui suit et dont les travaux ont commencé il y a plusieurs années, mais dont l'importance est renforcée suite à l'augmentation du nombre et de la sévérité des feux qui se déclenchent chaque été.

4.4 Couplage Méso-NH et modèle de feux de forêt Blaze

Perspectives : Thèse de William Antolin et suite

Un incendie de forêt est le résultat d'interactions multi-échelle entre la végétation, la topographie du terrain et les conditions météorologiques, qui peuvent être exacerbées sous l'effet du changement climatique. Comprendre les processus qui pilotent son comportement à l'échelle d'un événement est donc un enjeu majeur pour l'écologie et la sécurité civile. J'ai été impliqué depuis plusieurs années dans les projets de l'Agence Nationale de la Recherche IDEA et Firecaster pilotés par l'université de Corte, sur le couplage entre le modèle atmosphérique Méso-NH et un modèle de propagation du feu, avec des objectifs d'améliorer la prévention des risques liés aux incendies de forêt. Aurélien Costes, dans ses travaux de thèse (Costes et al., December 2021, 2022), a développé le modèle de feu Blaze et l'a intégré au modèle atmosphérique de méso-échelle Méso-NH afin de reconstruire la chronologie détaillée d'un incendie et de fournir un cadre d'étude des interactions entre un incendie et la micro-météorologie. La réponse du modèle couplé Méso-NH/Blaze à différents choix de modélisations et différents scénarios atmosphériques a montré l'influence significative de la turbulence atmosphérique sur la vitesse de propagation et le vent induit par le feu.

La suite de ces travaux fait l'objet de la thèse de William Antolin, que je co-encadre avec Mélanie Rochoux (Cerfacs). En effet, l'idée est d'étudier le couplage végétation/feu/atmosphère pour l'évaluation du risque de feux de forêts. Il y a un donc un volet végétation important, en particulier un aspect nouveau par rapport à la thèse d'Aurélien Costes, à savoir la mise en place d'un cas de brûlage guidé (nommé FireFlux I) avec une végétation réaliste (bosquet et rangées d'arbres), par opposition à l'utilisation d'une végétation basse uniforme. Les résultats préliminaires montrent l'importance de la représentation de la végétation et de la force de traînée induite pour bien simuler l'écoulement du modèle couplé Méso-NH/Blaze, mais aussi la nécessité d'utiliser une résolution suffisante, 10 m dans ce cas, pour que la turbulence soit bien simulée.

Pour continuer à explorer les apports possibles du système couplé Méso-NH/Blaze, en particulier pour des applications plus opérationnelles, j'ai proposé un sujet de

Formation Complémentaire Par La Recherche (FCPLR), en collaboration avec Mélanie Rochoux. Celui-ci a pour objectif d'améliorer la représentation de la surface dans le modèle couplé Mésos-NH/Blaze, pour ensuite pouvoir être appliqué à AROME, y compris les ensembles. Les développements réalisés au cours de la thèse, i.e. l'amélioration de la représentation du combustible et de ses caractéristiques, concernent principalement SURFEX, ils seront donc intégralement utilisables dans AROME. Ce travail, qui vise à mieux quantifier l'incertitude sur l'indice de propagation de feu tel qu'il est calculé actuellement à Météo-France, constitue un outil d'aide à la décision pour le prévisionniste, qui disposera d'un diagnostic complémentaire pendant la saison des incendies de feux de forêt.

Les processus étudiés dans les simulations couplées Mésos-NH/SURFEX et/ou Mésos-NH/SURFEX/modèle de propagation de feux se font sur des temps relativement courts et à des résolutions hectométriques voire métriques. Pour étudier l'impact sur des temps plus longs d'un changement de paramétrisation par exemple, un moyen consiste à utiliser des réanalyses couvrant plusieurs décennies, à des résolutions kilométriques. Les travaux en cours et à venir sur les réanalyses en France ou en Europe, présentés dans les parties suivantes, essaient de valoriser les avancées en matière de paramétrisations de surface dans SURFEX et de bases de données à haute résolution.

4.5 Vers le remplacement de SAFRAN à Météo-France

Le système de réanalyse SAFRAN pour l'hydrologie est donc opérationnel depuis 2002 à Météo-France. Après plus de 20 ans de service, certains défauts ont été identifiés et certaines limites atteintes. Ainsi, les validations successives de SAFRAN ont montré que les rayonnements solaire et infrarouge présentaient des biais. Cela avait déjà été mis en évidence dans Le Moigne (2002) et confirmé par la suite par les travaux de Carrer et al. (2012) auxquels j'ai contribué. Le déficit en rayonnement d'un tel système est un réel problème lorsqu'il s'agit de l'utiliser pour des applications aval comme l'étude du suivi de la ressource en eau par exemple. En effet, quelques pourcents d'erreur sur le rayonnement vont avoir des impacts directs sur le bilan d'énergie et d'eau modélisés par un schéma de surface. Les erreurs commises sur les rayonnements viennent de plusieurs sources. Tout d'abord, le schéma de transfert radiatif utilisé (Ritter and Geleyn, 1992) est un schéma assez ancien, avec un nombre de bandes spectrales limité comparé aux schémas de rayonnement que l'on trouve maintenant comme le très récent ECRAD (Hogan and Bozzo, 2018) par exemple. La reconstitution des rayonnements dans SAFRAN repose sur l'analyse de nébulosité faite à partir de profils de température et humidité de l'air analysés. Or cette analyse a lieu aux heures synoptiques i.e. toutes les 6 heures. Ensuite, une interpolation temporelle calcule pour chaque jour les profils horaires, mais souvent elle est linéaire (car peu d'observations peuvent la contraindre) et le cycle diurne sous-estime la quantité d'énergie réellement disponible. La deuxième variable clé qui peut présenter certains défauts est le champ de précipitations totales et sa décomposition en eau liquide et neige. En plaine, le nombre d'observations est important et le champ de pluie peu biaisé en général. Par contre, en région montagneuse, le nombre d'observations est beaucoup plus limité et il est donc plus difficile de reconstruire correctement ce champ, d'autant plus que SAFRAN dans sa version hydrologique n'utilise pas une approche par massifs avec une climatologie du modèle pour corriger ces défauts, comme c'est le cas de l'appli-

cation dédiée à la prévision du risque d'avalanche. L'analyse des précipitations est faite chaque jour et les variables pluie et neige sont ensuite interpolées au pas de temps horaire en tenant compte de l'humidité de l'air à 2m, ce qui n'est en général pas idéal pour reconstruire de telles chroniques. D'autres considérations, d'ordre plus techniques concernent d'une part la résolution horizontale de l'analyse SAFRAN qui est de 8 km et qui ne permet pas de représenter finement les phénomènes de plus petite échelle, alors que c'est une demande croissante des utilisateurs car de plus en plus d'applications sont à résolution kilométrique, voire hectométrique, et d'autre part le fait que la version logicielle de SAFRAN est figée depuis plusieurs années et non adaptée aux nouvelles architectures de calcul.

Pour progresser, des actions structurantes ont été décidées pour remplacer SAFRAN. Dans un premier temps, Météo-France a financé une thèse pour s'attaquer au problème, en particulier pour travailler à une réanalyse des paramètres de surface à haute résolution sur la France. J'ai co-encadré la thèse de Stéphane Van Hyfte avec Eric Bazile (CNRM) et Aaron Boone (CNRM). Initialement, le but était de proposer une méthode permettant de faire une réanalyse longue à haute résolution sur la France pour alimenter des modèles de surface comme SURFEX/ISBA pour le suivi de la ressource en eau. Celle-ci s'est en fait focalisée sur l'analyse des précipitations sur la France, car c'est sans doute la variable la plus complexe à analyser. La méthode d'interpolation optimale a été utilisée en combinant les analyses AROME pour reconstruire une ébauche des précipitations sur 24 heures et des observations disponibles sur la France. Mais pour appliquer la méthode d'interpolation optimale à une variable, il faut que celle-ci soit gaussienne ou en tout cas qu'elle se rapproche d'une variable gaussienne. Or les précipitations, par essence, ne possèdent pas ce caractère. Il a donc fallu trouver une méthode permettant de pallier ce défaut, et celle-ci a été inspirée des travaux des collègues canadiens de PNT qui ont eux-mêmes exploré cette question il y a quelques années (Evans, 2013; Fortin et al., 2015). Ainsi, la méthode de transformation de Box-Cox (Box and Cox, 1964) a été appliquée aux précipitations afin d'en renforcer le caractère gaussien. Ces travaux, décrits dans Van Hyfte et al. (2023), ont exploré l'apport de cette transformation en la comparant à des approches plus classiques d'interpolation optimale (Soci et al., 2016).

Perspectives : Réanalyse de surface à haute résolution

Le contrat d'objectifs et de performance (COP) 2022-2026 de Météo-France définit les orientations stratégiques et les objectifs de l'établissement pour les cinq prochaines années afin de mieux répondre aux attentes des citoyens, de l'État et des entreprises, confrontés chacun à leur niveau aux défis du changement climatique. Le COP comprend une action spécifique visant à produire une réanalyse à haute résolution sur la France. En termes de caractérisation du climat passé, Météo-France réalisera donc une analyse sur 50 ans des paramètres de surface à haute résolution horizontale sur la France métropolitaine, en remplacement des analyses SAFRAN actuelles (8 km). Avec cette nouvelle analyse, les phénomènes de petite échelle, tels que la convection ou la circulation orographique des vents, seront significativement améliorés par rapport au système SAFRAN existant ou à la réanalyse européenne Copernicus CERRA. Cette nouvelle analyse sera également nécessaire pour le traitement de la prochaine génération de projections climatiques à l'échelle du kilomètre réalisées avec le modèle AROME. Cet objectif doit être atteint pour la fin de l'année 2025.

La réalisation de cette action répond à un besoin de longue date, exprimé par de nombreux acteurs internes et externes de Météo-France et le consensus qui se dégage est de viser à produire une telle réanalyse en utilisant le modèle AROME à une résolution de 1,3 km. Cela nous permet d'avoir non seulement des variables de surface mais aussi des variables d'altitude (d'intérêt pour de nombreuses utilisations, en particulier pour le secteur de l'énergie). Il y a un fort intérêt à produire cette réanalyse avec une version récente d'AROME afin de promouvoir l'utilisation conjointe des résultats de cette réanalyse avec des produits d'analyse ou de prévision en temps réel, comme c'est actuellement le cas avec SAFRAN.

La réanalyse ARRA (ARome ReAnalysis) que je coordonne avec Eric Bazile (GMAP) vise à répondre à cet objectif. Elle est composée de deux éléments : (i) ARRA, une analyse atmosphérique AROME à 1,3 km avec analyse de surface cyclée (température et humidité de l'air à 2 mètres, neige) et (ii) ARRA-Land un produit spécifique pour la surface. L'analyse atmosphérique utilise des coupleurs qui sont des fichiers qui donnent les conditions aux bords du domaine. Ces coupleurs sont issus de la réanalyse UERRA sur l'Europe, toutes les 6 heures, entre 1970 et 1984, et de la réanalyse CERRA toutes les 3 heures après 1984. Cette analyse AROME utilise la technique de l'Incremental Analysis Update ou IAU, permettant d'injecter les incréments d'analyse de grande échelle (ceux du coupleur) dans l'analyse AROME en maintenant ceux de petite échelle (ceux d'AROME) à zéro puisqu'ils seront recalculés par l'analyse. ARRA est le remplaçant de SAFRAN, car il se réfère aux champs de forçages atmosphériques nécessaires pour alimenter un modèle de surface comme SURFEX (Masson et al., 2013). Les précipitations cumulées sur 24 heures provenant d'ARRA seront complétées par une analyse des précipitations quotidiennes basée sur MESCAN (Soci et al., 2016) et utilisées comme données d'entrée pour SURFEX. La qualité de l'analyse des précipitations avec MESCAN dépend de la densité du réseau d'observation utilisé. Dans une région couverte par peu de pluviomètres, le champ de précipitations analysé par MESCAN sera proche de l'estimation du modèle et ne bénéficiera pas de l'apport des observations. Dans ces régions, la qualité des analyses sera moins bonne que dans les régions avec beaucoup d'observations. Le domaine AROME-France couvre, entre autres, l'Espagne (partiellement), l'Italie (partiellement), la Suisse, l'Allemagne, la Belgique et les Pays-Bas. Des observations de surface supplémentaires (T2m, RH2m, neige) et surtout des observations de précipitations avec contrôle de qualité amélioreraient la qualité de l'analyse. Le produit ARRA-Land contiendra des champs de surface horaires provenant de l'utilisation hors ligne de SURFEX, utilisés pour produire des estimations des conditions de surface et de sol (humidité du sol, neige, etc.), avec une physique plus avancée pour la surface que dans ARRA (schémas de diffusion dans le sol et le manteau neigeux, paramétrisation de la photosynthèse et représentation explicite de plusieurs types de surface), et alimentés par ARRA et les précipitations de MESCAN. ARRA et ARRA-Land couvriront une période de 50 ans dans le passé et seront également produits en temps réel.

À plus long terme, aller vers une approche ensembliste semble une piste intéressante pour la réanalyse à haute résolution. En particulier, les travaux de thèse de S. Van Hyfte ont montré la difficulté d'analyser les précipitations, surtout en zones montagneuses, souvent dépourvues d'observations. Une piste à explorer serait donc

de construire un ensemble d'analyse de précipitations, éventuellement basé sur les prévisions d'ensemble PEAROME. Cela permettrait de générer un ensemble de jeux de forçages pour des simulations SURFEX offline à haute résolution sur la France et d'étudier les incertitudes sur les hauteurs de neige, l'humidité du sol, les flux de surface, et les débits si SURFEX est couplé à un modèle hydrologique comme CTRIP (Decharme et al., 2019).

La réanalyse ARRA est un produit attendu par de nombreux services, en particulier les gestionnaires de l'eau, mais aussi pour des applications de descente d'échelle des modèles de climat régionaux (comme c'est fait aujourd'hui avec SAFRAN), comme référence et données de base pour des rejeux de simulations AROME passées, ou encore en tant que jeu de données d'apprentissage pour des émulateurs utilisant des techniques d'IA comme par exemple des réseaux de neurones. Ainsi, on peut déjà noter l'utilisation importante de la réanalyse globale ERA5 (Hersbach et al., 2020) pour alimenter des algorithmes statistiques d'IA. L'activité IA se développe à grande vitesse, y compris à Météo-France, et les données des réanalyses sont capitales pour alimenter ces algorithmes.

4.6 Impact du changement d'occupation des sols sur la réanalyse

Les réanalyses comme SAFRAN ou ARRA utilisent une représentation des surfaces qui est figée dans le temps. Or, l'expansion des villes, l'intensification des cultures, ou d'autres activités ont modifié sensiblement l'occupation des terres depuis plusieurs années. L'apport de données satellitaires à haute résolution spatiale et temporelle permet aujourd'hui une caractérisation précise des types de surface au cours du temps. Prendre en compte dans les réanalyses des conditions de surface changeant au cours du temps est un enjeu important pour en améliorer le réalisme, mais il faut quantifier l'effet que cela produit.

Perspectives : *Projet européen CERISE*

Le projet de recherche Copernicus Climate Change Service Evolution (CERISE) vise à soutenir l'évolution de C3S grâce à des travaux de recherche et innovation orientés vers des méthodes d'assimilation de données innovantes pour améliorer la future génération de réanalyses et de systèmes de prévisions saisonnières en mettant l'accent sur le couplage surface-atmosphère. Les approches basées sur les opérateurs d'observation seront étendues aux composantes de la cryosphère telles que la neige et la glace de mer, qui présentent un intérêt particulier pour l'évolution des réanalyses globales et pan-arctiques. La représentation des conditions de la surface terrestre variant lentement sera également améliorée en tenant compte des caractéristiques de la végétation sur plusieurs décennies et de l'évolution de la couverture lacustre dans les systèmes de réanalyse et de prévision saisonnière.

Parallèlement, le projet CONFESS (Consistent representation of temporal variations of boundary forcing in reanalyses and seasonal forecasts), mené par le CEPMMT, vise à améliorer la cohérence terre-atmosphère dans les systèmes de réanalyses et de prévisions saisonnières. Il s'est concentré en particulier sur l'évolution prescrite des conditions de végétation depuis 1993 au cours des dernières décennies.

Ma contribution au projet CERISE est d'évaluer l'impact de conditions de surface évoluant dans le temps sur la réanalyse régionale européenne CERRA-Land développée dans le cadre C3S. Pour cela, les données issues du projet CONFESS, i.e. les cartes annuelles d'occupation du sol et les paramètres de végétation comme l'indice foliaire seront utilisés comme condition à la limite de surface au lieu d'une carte d'occupation des sols et d'indice foliaire climatologiques comme c'est le cas dans la version opérationnelle de CERRA-Land. L'impact sera évalué par rapport à des données indépendantes comme les hauteurs de neige ou encore les débits des rivières, grâce à l'utilisation offline du modèle CTRIP (Decharme et al., 2019).

4.7 Conclusion générale

Comme on peut le voir dans ce manuscrit, mes travaux sont assez variés et cohérents puisqu'ils s'intéressent aux surfaces continentales à toutes les échelles (du climat à la LES) et vont de la recherche aux applications. Par ailleurs, ils s'intègrent complètement dans la stratégie scientifique du CNRM, qui vise à améliorer les outils de production d'informations météo-climatiques globales et locales, à la plus haute résolution possible et à toutes les échelles de temps, en progressant dans la compréhension des processus et leur formulation dans les modèles. La variété de mes activités est liée à l'intérêt que je porte à certains sujets et ma capacité à les mener à bien et les valoriser par des publications scientifiques et des présentations lors de congrès scientifiques en France, en Europe et outre atlantique.

Je me suis intéressé à divers aspects de la modélisation de surface, mais la modélisation des lacs est le sujet principal de mes recherches. J'ai commencé par implémenter le modèle FLake dans SURFEX en 2010 avec mon collègue Rui Salgado de l'université d'Evora et j'ai ensuite organisé une campagne de mesures internationale sur l'étang de Thau qui a permis de modéliser la thermique de cette lagune en bord de Méditerranée, et de valider les flux de surface au-dessus de l'eau grâce d'abord à des simulations offline et ensuite couplées avec Méso-NH pour identifier l'impact du couplage sur les circulations de méso-échelle comme les brises. Cette validation à méso-échelle était un prérequis avant une utilisation à l'échelle globale en mode forcé d'abord et couplé ensuite. FLake a fait partie des paramétrisations de surface activées pour l'exercice CMIP6. Je continue mes travaux de modélisation avec FLake dans la campagne LIAISE, ce qui m'a permis d'initier des recherches sur le compartiment sédimentaire, généralement peu documenté.

J'ai aussi organisé une intercomparaison des schémas de neige appliqués à Dome C sur le plateau antarctique. En particulier, j'ai réalisé les simulations SURFEX offline des 4 modèles de neige de SURFEX et analysé l'ensemble des résultats des différents modèles ayant participé. Bien comprendre le comportement des modèles de SURFEX est essentiel pour les applications dans le modèle de climat du CNRM mais également dans l'optique d'activer des paramétrisations plus

avancées comme par exemple ISBA-ES dans le projet MASCOT (Modélisation et Assimilation des Surfaces Continentales pour l'Opérationnel) du CNRM que je coordonne et qui vise à améliorer les options physiques des modèles de PNT opérationnels.

Étudier le rôle de l'irrigation sur le couplage surface/atmosphère et comment elle module des circulations locales fait aussi partie de mes travaux. En particulier une thèse est en cours sur le sujet et une autre, terminée, s'est intéressée au rôle de la forêt sur la formation de nuages de couche limite en été. Ces 2 processus sont pilotés en partie par la surface et ont des effets directs sur le développement de la couche limite atmosphérique et sur les circulations de petite échelle qui s'y développent.

Le couplage surface/atmosphère en présence de feu constitue un axe de recherche auquel je participe depuis quelques années et qui se renforce en partie à cause de l'enjeu sociétal fort qu'il représente. En 2022 la "Météo des forêts" a été créée pour prévenir et lutter contre les incendies, en indiquant un niveau de danger de feux de forêt au niveau départemental (opérationnelle à l'été 2023). Cette mesure montre l'importance de pouvoir caractériser le risque incendie et la propagation du feu quand il se déclenche. C'est l'objet de travaux de modélisation à venir avec le modèle couplé Méso-NH/Blaze, sur des cas réels, prenant en compte de façon réaliste la caractérisation de la végétation et son état de stress hydrique.

Je travaille également sur les réanalyses de surface depuis les années 2000, avec la publication de la réanalyse SAFRAN sur une grille régulière sur la France, qui a permis un grand nombre d'études aval, en particulier liées à l'hydrologie de surface et le suivi de la ressource en eau. SAFRAN est un système opérationnel depuis 2002 et la chaîne SAFRAN-ISBA-MODCOU, qui simule les débits des rivières en France, depuis 2003, ce qui constitue une bonne longévité pour ce produit très utilisé dans la communauté française (INRAE, CESBIO...) et qui a alimenté plusieurs thèses sur l'hydrométéorologie au CNRM.

Les travaux sur les réanalyses se poursuivent avec comme objectif le remplacement de SAFRAN par une réanalyse à plus haute résolution utilisant les prévisions opérationnelles du modèle AROME France. Par ailleurs, les travaux réalisés sur les réanalyses sur l'Europe depuis 10 ans ont permis de développer une analyse de précipitations et de montrer son rôle clé pour l'hydrologie de surface, grâce entre autres à l'amélioration des schémas de surface de SURFEX au cours du temps. Mon activité se poursuit également avec la suite de la réanalyse CERRA sur l'Europe à 5,5 km de résolution pour couvrir 1960 à nos jours, ainsi qu'à travers le projet CERISE pour évaluer le rôle du changement de l'occupation des sols et des paramètres de surface (base annuelle) sur la réanalyse, plus précisément sur l'hydrologie et la reconstruction des débits des grandes rivières.

Ainsi, mes travaux variés concernent des sujets à enjeu pour le CNRM et aussi pour Météo-France, avec des thèmes qui couvrent le suivi de la ressource en eau, l'agriculture avec les aspects retenues de substitution et leur modélisation et irrigation des parcelles agricoles, mais aussi les feux de forêt, dont l'importance s'est caractérisée récemment par la mise en place de la "Météo des forêts" pour lutter et prévenir les incendies. S'intéresser de plus près aux feux et à leur représentation dans les modèles et être capable par exemple de modéliser la dynamique du feu représente un axe de recherche nécessaire en soutien à l'opérationnel.

Enfin, les travaux sur les réanalyses sont très attendus dans un monde en pleine mutation avec la croissance exponentielle des activités liées à l'IA. Les réanalyses permettront la descente d'échelle de modèles de climat régionaux, de rejouer des situations à enjeu, mais aussi d'entraîner des émulateurs basés sur des réseaux de neurones.

CHAPITRE 5

Glossaire

ACCORD A Consortium for CONvective-scale modelling Research and Development

ALADIN Aire Limitée, Adaptation dynamique, Développement InterNational
(Modèle à aire limitée de Météo-France)

AMIP Atmospheric Model Intercomparison Project

ANR Agence Nationale de la Recherche

AURELHY Analyse Utilisant le RELief pour l'HYdrométéorologie

AR6 Sixth Assessment Report

ARRA ARome ReAnalyse

AROME Application de la Recherche à l'Opérationnel à Mésos-Échelle
(Modèle à aire limitée de fine échelle de Météo-France)

ARPEGE Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle
(modèle global de Météo-France)

BDCLIM Base Données CLIMatologiques

BDM Base Données Météorologiques

BSRN Baseline Surface Radiation Network

C3S Copernicus Climate Change Service

CEN Centre d'Etudes de la Neige

CERRA Copernicus European Regional ReAnalysis

CERRA-EDA Copernicus European Regional ReAnalysis Ensemble Data Assimilation

CLM Community Land Model

CMIP Climate Model Intercomparison Project

CNRS Centre National de Recherche Scientifique

CNRM Centre National de Recherche de Météorologie

CNRM-CM Centre National de Recherche de Météorologie Climate Model

COP Contrat d'Objectifs et de Performance

CRDD Chargé de Recherche du Développement Durable

CSLM Canadian Small Lake Model

CTRIP CNRM Total Runoff Integrating Pathways

DCSC Direction de la Climatologie et des Services Climatiques

DRIAS Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnement

DWD Deutscher Wetter Dienst

EAC Equipe Arpege Climat

ECMWF European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

ECO-SG ECOCLIMAP Second Generation

EDMF Eddy Diffusivity Mass Flux

ENM Ecole Nationale de la Météorologie

ENS Ecole Normale Supérieure

ESA-CCI European Space Agency Climate Change Initiative

FCPLR Formation Complémentaire par la Recherche

GABLS GEWEX Atmospheric Boundary Layer Study

GEWEX Global Energy and Water Exchanges

GCM Modèle de Climat Global

GMAP Groupe de Modélisation et d'Assimilation pour la Prévision (groupe du CNRM)

GMEI Groupe de Météorologie Expérimentale et Instrumentale (groupe du CNRM)

GMME Groupe de Météorologie de Moyenne Echelle (groupe du CNRM)

IA Intelligence Artificielle

IFREMER Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER

IFS Integrated Forecast System

INRAE Institut National pour l'Agriculture l'alimentation et l'Environnement

ISBA Interaction Soil Biosphere Atmosphere

ISBA-ES Interaction Soil Biosphere Atmosphere Explicit Snow

ITA Ingénieur Technicien Administratif

ITM Ingénieur des Travaux de la Météorologie

LAI Indice foliaire

LIAISE Land surface Interactions with the Atmosphere over the Iberian Semi-arid Environment

LES Large Eddy Simulation (Simulation des grands tourbillons ou simulation des grandes échelles)

MASCOT Modélisation et Assimilation de Surfaces Continentales pour l'Opérationnel

MSG Meteosat Second Generation

NCEP National Centers for Environmental Prediction

OASIS-MCT Ocean Atmosphere Sea Ice Soil Model Coupling Toolkit

OMM Organisation Météorologique Mondiale

PDF Fonction de Distribution de Probabilité

PEAROME Prévision d'Ensemble AROME

PNT Prévision Numérique du Temps

POI Périodes d'Observations Intensives

RCA Rossby Center regional Atmospheric model

RCE Réseau Climatique d'Etat

RCM Regional Climate Model

RCP Representative Concentration Pathway

SAFRAN Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie

SLIM Surface Land Information Mapping

SST Sea Surface Temperature

SURFEX SURFace EXternalisée

SWOT Surface Water and Ocean Topography

TEB Town Energy Balance

TFP Type Fonctionnel de Plante

TKE Turbulent Kinetic Energy

UERRA Uncertainties Estimation in Regional Reanalysis

UKMO United Kingdom Met Office

VIC Variable Infiltration Capacity

Bibliographie

- Andreas, E. L., 1987 : A theory for the scalar roughness and the scalar transfer coefficients over snow and sea ice. *Boundary-Layer Meteorology*, **38**, 159–184.
- Balsamo, G. and J.-F. Mahfouf, 2020 : Les schémas de surface continentale pour le suivi et la prévision du système terre au cephmt. *La Météorologie*, **108**, 77–81.
- Boone, A., J.-C. Calvet, and J. Noilhan, 1999 : Inclusion of a third soil layer in a land surface scheme using the force-restore method. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **38** (1), 1611–1630, doi :10.1175/1520-0450(1999)038<1611:IOATSL>2.0.CO;2, URL https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/38/11/1520-0450_1999_038_1611_ioatsl_2.0.co_2.xml.
- Boone, A., V. Masson, T. Meyers, and J. Noilhan, 2000 : The influence of the inclusion of soil freezing on simulations by a soil–vegetation–atmosphere transfer scheme. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **39** (9), 1544–1569, doi :10.1175/1520-0450(2000)039<1544:TIOATIO>2.0.CO;2, URL https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/39/9/1520-0450_2000_039_1544_tiotio_2.0.co_2.xml.
- Boone, A., P. Samuelsson, S. Gollvik, A. Napoly, L. Jarlan, E. Brun, and B. Decharme, 2017 : The interactions between soil–biosphere–atmosphere land surface model with a multi-energy balance (ISBA-MEB) option in SURFEXv8–Part 1 : Model description. *Geoscientific Model Development*, **10** (2), 843–872, doi :10.5194/gmd-10-843-2017, URL <https://gmd.copernicus.org/articles/10/843/2017/>.
- Bosveld, F., P. Baas, E. Meijgaard, E. Bruijn, G.-J. Steeneveld, and B. Holtslag, 2014 : The third gables intercomparison case for evaluation studies of boundary-layer models : Part a : Case selection and set-up. *Boundary-Layer Meteorology*, **152**, 133–156, doi :10.1007/s10546-014-9917-3.
- Bougeault, P. and P. Lacarrere, 1989 : Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta–scale model. *Monthly Weather Review*, **117** (8), 1872–1890.
- Bowling, L. and D. Lettenmaier, 2010 : Modeling the effects of lakes and wetlands on the water balance of arctic environments. *Journal of Hydrometeorology*, **11**, 276–295, doi :10.1175/2009JHM1084.1.
- Box, G. E. and D. R. Cox, 1964 : An analysis of transformations. *Journal of the Royal Statistical Society : Series B (Methodological)*, **26** (2), 211–243, doi :<https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x>, URL <https://rss.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x>.

- Brun, E., E. Martin, V. Simon, C. Gendre, and C. Coleou, 1989 : An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, **35** (121), 333–342, doi :10.3189/S002214300009254.
- Bueno, B., G. Pigeon, L. K. Norford, K. Zibouche, and C. Marchadier, 2012 : Development and evaluation of a building energy model integrated in the teb scheme. *Geoscientific Model Development*, **5** (2), 433–448, doi :10.5194/gmd-5-433-2012, URL <https://gmd.copernicus.org/articles/5/433/2012/>.
- Calvet, J.-C. and J.-L. Champeaux, 2020 : L'apport de la télédétection spatiale à la modélisation des surfaces continentales. *La Météorologie*, **108**, 52–58.
- Calvet, J.-C., J. Noilhan, J.-L. Roujean, P. Bessemoulin, M. Cabelguenne, A. Olioso, and J.-P. Wigneron, 1998 : An interactive vegetation svat model tested against data from six contrasting sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, **92** (2), 73–95, doi :[https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(98\)00091-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(98)00091-4), URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192398000914>.
- Carrer, D., S. Lafont, J.-L. Roujean, J.-C. Calvet, C. Meurey, P. Le Moigne, and I. Trigo, 2012 : Incoming solar and infrared radiation derived from meteosat : Impact on the modeled land water and energy budget over france. *Journal of Hydrometeorology*, **13**, 504–520, doi :10.1175/JHM-D-11-059.1.
- Chen, F., Z. Janjić, and K. Mitchell, 1997 : Impact of Atmospheric Surface-layer Parameterizations in the new Land-surface Scheme of the NCEP Mesoscale Eta Model. *Boundary-Layer Meteorology*, **85** (3), 391–421, doi :10.1023/A:1000531001463.
- Costes, A., M. C. Rochoux, C. Lac, and V. Masson, December 2021 : Subgrid-scale fire front reconstruction for ensemble coupled atmosphere-fire simulations of the fireflux i experiment. *Fire Safety Journal*.
- Costes, A., Q. Rodier, V. Masson, C. Lac, and M. C. Rochoux, 2022 : Effects of high-density gradients on wildland fire behavior in coupled atmosphere-fire simulations. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **14** (11), e2021MS002955.
- Couvreux, F., E. Bazile, Q. Rodier, B. Maronga, G. Matheou, M. Chinita, J. Edwards, B. J. van Stratum, C. van Heerwaarden, J. Huang, A. Moene, A. Cheng, V. Fuka, S. Basu, E. Bou-Zeid, G. Canut, and E. Vignon, 2020 : Intercomparison of large-eddy simulations of the antarctic boundary layer for very stable stratification. *Boundary-Layer Meteorology*, **176**, doi :10.1007/s10546-020-00539-4.
- Cuxart, J., B. Holtslag, R. Beare, E. Bazile, A. Beljaars, A. Cheng, L. Conangla, M. Ek, F. Freedman, R. Hamdi, A. Kerstein, H. Kitagawa, G. Lenderink, D. Lewellen, J. Mailhot, T. Mauritsen, V. Perov, G. Schayes, G.-J. Steeneveld, and K.-M. Xu, 2006 : Single-column model intercomparison for a stably stratified atmospheric boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, **118**, 273–303, doi :10.1007/s10546-005-3780-1.
- De Munck, C., 2013 : Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville. Ph.D. thesis, URL <http://www.theses.fr/2013INPT0098>, thèse de doctorat dirigée par Lemonsu, Aude Océan, Atmosphère et surfaces continentales Toulouse, INPT 2013.

- Deardorff, J., 1977 : A parameterization of ground-surface moisture content for use in atmospheric prediction models. *Journal of Applied Meteorology*, **16 (11)**, 1182–1185, doi : 10.1175/1520-0450(1977)016<1182:APOGSM>2.0.CO;2, URL https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/16/11/1520-0450_1977_016_1182_apogsm_2_0_co_2.xml.
- Decharme, B., R. Alkama, H. Douville, M. Becker, and A. Cazenave, 2010 : Global evaluation of the ISBA-TRIP continental hydrological system. Part II : Uncertainties in river routing simulation related to flow velocity and groundwater storage. *Journal of Hydrometeorology*, **11 (3)**, 601–617, doi :10.1175/2010JHM1212.1, URL https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/11/3/2010jhm1212_1.xml.
- Decharme, B., A. Boone, C. Delire, and J. Noilhan, 2011 : Local evaluation of the Interaction between Soil Biosphere Atmosphere soil multilayer diffusion scheme using four pedo-transfer functions. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, **116 (D20)**, doi :<https://doi.org/10.1029/2011JD016002>, URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2011JD016002>.
- Decharme, B., E. Brun, A. Boone, C. Delire, P. Le Moigne, and S. Morin, 2016 : Impacts of snow and organic soils parameterization on northern Eurasian soil temperature profiles simulated by the ISBA land surface model. *The Cryosphere*, **10 (2)**, 853–877, doi :10.5194/tc-10-853-2016, URL <https://tc.copernicus.org/articles/10/853/2016/>.
- Decharme, B., C. Delire, M. Minvielle, J. Colin, J.-P. Vergnes, A. Alias, D. Saint-Martin, R. Séférian, S. Sénési, and A. Voltaire, 2019 : Recent changes in the ISBA-CTRIP land surface system for use in the CNRM-CM6 climate model and in global off-line hydrological applications. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **11 (5)**, 1207–1252, doi :<https://doi.org/10.1029/2018MS001545>, URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018MS001545>.
- Dee, D. P., 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. B. Healy, H. Hersbach, E. V. Hólm, L. Isaksen, P. Kållberg, M. Köhler, M. Matricardi, A. P. McNally, B. M. Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B.-K. Park, 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. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **137 (656)**, 553–597, doi :10.1002/qj.828, URL <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.828>.
- Delire, C., R. Séférian, B. Decharme, R. Alkama, J.-C. Calvet, D. Carrer, A.-L. Gibelin, E. Joetzer, X. Morel, M. Rocher, and D. Tzanos, 2020 : The global land carbon cycle simulated with isba-ctrip : Improvements over the last decade. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **12 (9)**, e2019MS001886, doi :<https://doi.org/10.1029/2019MS001886>, URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019MS001886>, e2019MS001886 2019MS001886, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2019MS001886>.
- Douville, H., J. F. Royer, and J.-F. Mahfouf, 1995 : A new snow parameterization for the météorologie climate model. *Climate Dynamics*, **12**, 37–52.

- Druel, A., S. Munier, A. Mucia, C. Albergel, and J.-C. Calvet, 2022 : Implementation of a new crop phenology and irrigation scheme in the ISBA land surface model using SURFEXv8.1. *Geoscientific Model Development*, **15** (22), 8453–8471, doi :10.5194/gmd-15-8453-2022.
- Durand, Y., E. Brun, L. Merindol, G. Guyomarc'h, B. Lesaffre, and E. Martin, 1993 : A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Annals of Glaciology*, **18**, 65–71, doi :10.3189/S0260305500011277.
- Durand, Y., G. Giraud, E. Brun, L. Mérimindol, and E. Martin, 1999 : A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, **45** (151), 469–484, doi :10.3189/S0022143000001337.
- Etchevers, P., 2001 : Modélisation du cycle continental de l'eau a l'échelle régionale : impact de la modélisation de la neige sur l'hydrologie du rhône. Ph.D. thesis, Toulouse 3 - France.
- Evans, A., 2013 : Investigation of enhancements to two fundamental components of the statistical interpolation method used by the Canadian Precipitation Analysis (CaPA). Ph.D. thesis, University of Manitoba, URL <https://mspace.lib.umanitoba.ca/xmlui/handle/1993/22276>.
- Faroux, S., A. Kaptué Tchuenté, J.-L. Roujean, V. Masson, E. Martin, and P. L. Moigne, 2013 : ECOCLIMAP-II/Europe : A twofold database of ecosystems and surface parameters at 1 km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models. *Geoscientific Model Development*, **6** (2), 563–582, doi :10.5194/gmd-6-563-2013, URL <https://gmd.copernicus.org/articles/6/563/2013/>.
- Fortin, V., G. Roy, N. Donaldson, and A. Mahidjiba, 2015 : Assimilation of radar quantitative precipitation estimations in the Canadian Precipitation Analysis (CaPA). *Journal of Hydrology*, **531**, 296–307, doi :<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.003>, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415005624>.
- Giard, D. and E. Bazile, 2000 : Implementation of a new assimilation scheme for soil and surface variables in a global NWP model. *Monthly weather review*, **128** (4), 997–1015, doi :10.1175/1520-0493(2000)128<0997:IOANAS>2.0.CO;2, URL https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/128/4/1520-0493_2000_128_0997_ioanas_2.0.co_2.xml.
- Guinaldo, T., 2019 : Paramétrisation de la dynamique lacustre dans un modèle de surface couplé pour une application à la prévision hydrologique à l'échelle globale. Ph.D. thesis, Toulouse 3 - France.
- Habets, F., 1998 : Modélisation du cycle continental de l'eau à l'échelle régionale : application aux bassins versants de l'adour et du rhône. Ph.D. thesis, Toulouse 3 - France.
- Habets, F., J. Noilhan, C. Golaz, J. Goutorbe, P. Lacarrère, E. Leblais, E. Ledoux, E. Martin, C. Ottlé, and D. Vidal-Madjar, 1999a : The isba surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the hapex-mobilhy area : Part i : Model and database. *Journal of Hydrology*, **217** (1), 75–96, doi :[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00019-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00019-0), URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169499000190>.

- Habets, F., J. Noilhan, C. Golaz, J. Goutorbe, P. Lacarrère, E. Leblois, E. Ledoux, E. Martin, C. Otlé, and D. Vidal-Madjar, 1999b : The isba surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the hapex-mobilhy area : Part ii : Simulation of streamflows and annual water budget. *Journal of Hydrology*, **217 (1)**, 97–118, doi :[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00020-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00020-7), URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169499000207>.
- 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. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, **113 (D6)**, doi :<https://doi.org/10.1029/2007JD008548>, URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2007JD008548>.
- Hersbach, H., et al., 2020 : The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146 (730)**, 1999–2049, doi :[10.1002/qj.3803](https://doi.org/10.1002/qj.3803), URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.3803>.
- Hogan, R. J. and A. Bozzo, 2018 : A flexible and efficient radiation scheme for the ecmwf model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **10 (8)**, 1990–2008, doi :<https://doi.org/10.1029/2018MS001364>, URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018MS001364>, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2018MS001364>.
- Holtzlag, B., G. Svensson, P. Baas, S. Basu, R. Beare, A. BELJAARS, F. BOSVELD, J. Cuxart, J. Lindvall, G.-J. Steeneveld, M. Tjernström, and B. Van de Wiel, 2013 : Stable atmospheric boundary layers and diurnal cycles – challenges for weather and climate models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **94**, doi :[10.1175/BAMS-D-11-00187.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00187.1).
- Hostetler, S. W. and P. J. Bartlein, 1990 : Simulation of lake evaporation with application to modeling lake level variations of harney-malheur lake, oregon. *Water Resources Research*, **26 (10)**, 2603–2612, doi :<https://doi.org/10.1029/WR026i010p02603>, URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR026i010p02603>, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/WR026i010p02603>.
- Jarvis, P., 1976 : The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, **273 (927)**, 593–610.
- Krinner, G. and J. Boike, 2010 : A study of the large-scale climatic effects of a possible disappearance of high-latitude inland water surfaces during the 21st century. *Boreal Environment Research*, **15**.
- Lac, C., J.-P. Chaboureau, V. Masson, J.-P. Pinty, P. Tulet, J. Escobar, M. Leriche, C. Barthe, B. Aouizerats, C. Augros, P. Aumond, A. Franck, P. Bechtold, S. Berthet, S. Bielli, F. Bosseur, O. Caumont, J.-M. Cohard, J. Colin, and P. Wautelet, 2018 : Overview of the meso-nh model version 5.4 and its applications. *Geoscientific Model Development*, **11**, 1929–1969, doi : [10.5194/gmd-11-1929-2018](https://doi.org/10.5194/gmd-11-1929-2018).

- Lafaysse, M., 2011 : Changement climatique et régime hydrologique d'un bassin alpin : génération de scénarios sur la haute-durance, méthodologie d'évaluation et incertitudes associées. Ph.D. thesis, Toulouse 3 - France.
- Lafore, J. P., J. Stein, N. Asencio, P. Bougeault, V. Ducrocq, J. Duron, C. Fischer, P. Hérel, P. Mascart, V. Masson, et al., 1998 : The Meso-NH atmospheric simulation system. Part I : Adiabatic formulation and control simulations. *Annales Geophysicae*, **16** (1), 90–109, doi : 10.1007/s00585-997-0090-6, URL <https://angeo.copernicus.org/articles/16/90/1998/>.
- Le Moigne, P., 2002 : Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN. *Note de centre GMME, Météo-France*, 1–30.
- Le Moigne, P., J. Colin, and B. Decharme, 2016 : Impact of lake surface temperatures simulated by the flake scheme in the cnrm-cm5 climate model. *Tellus A : Dynamic Meteorology and Oceanography*, **68** (1), 31 274, doi :10.3402/tellusa.v68.31274, URL <https://doi.org/10.3402/tellusa.v68.31274>, <https://doi.org/10.3402/tellusa.v68.31274>.
- Le Moigne, P. and M. Minvielle, 2020 : Surfex : une plateforme pour simuler les flux des surfaces océaniques et continentales. *La Météorologie*, **108**, 82–87.
- Le Moigne, P., D. Legain, F. Lagarde, M. Potes, D. Tzanos, E. Moulin, J. Barrié, R. Salgado, G. Mesiaen, A. Fiandrino, S. Donier, O. Traulle, and M. J. Costa, 2013 : Evaluation of the lake model flake over a coastal lagoon during the thaumex field campaign. *Tellus*, **65**, 20 951, doi : 10.3402/tellusa.v65i0.20951.
- Le Moigne, P., F. Besson, E. Martin, J. Boé, A. Boone, B. Decharme, P. Etchevers, S. Faroux, F. Habets, M. Lafaysse, et al., 2020 : The latest improvements with SURFEX v8.0 of the Safran–Isba–Modcou hydrometeorological model for France. *Geoscientific Model Development*, **13** (9), 3925–3946, doi :10.5194/gmd-13-3925-2020, URL <https://gmd.copernicus.org/articles/13/3925/2020/>.
- Le Moigne, P., E. Bazile, A. Cheng, E. Dutra, J. M. Edwards, W. Maurel, I. Sandu, O. Traullé, E. Vignon, A. Zadra, and W. Zheng, 2022 : Gabls4 intercomparison of snow models at dome c in antarctica. *The Cryosphere*, **16** (6), 2183–2202, doi :10.5194/tc-16-2183-2022, URL <https://tc.copernicus.org/articles/16/2183/2022/>.
- Lebeaupin-Brossier, C., V. Ducrocq, and H. Giordani, 2009 : Effects of the air–sea coupling time frequency on the ocean response during Mediterranean intense events. *Ocean Dynamics*, **59** (4), 539–549, doi :10.1007/s10236-009-0198-1, URL <https://doi.org/10.1007/s10236-009-0198-1>.
- Ledoux, E., G. Girard, G. De Marsily, J. Villeneuve, and J. Deschenes, 1989 : Spatially distributed modeling : conceptual approach, coupling surface water and groundwater. *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling*, Springer, 435–454, doi :10.1007/978-94-009-2352-2_16, URL https://doi.org/10.1007/978-94-009-2352-2_16.
- Lemonsu, A., C. Grimmond, and V. Masson, 2004 : Modeling the surface energy balance of the core of an old mediterranean city : Marseille. *Journal of Applied Meteorology*, **43**, 312–327, doi : 10.1175/1520-0450(2004)043<0312:MTSEBO>2.0.CO;2.

- MacKay, M. D., 2012 : A process-oriented small lake scheme for coupled climate modeling applications. *Journal of Hydrometeorology*, **13** (6), 1911 – 1924, doi :<https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-0116.1>, URL https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/13/6/jhm-d-11-0116_1.xml.
- Mahfouf, J., A. Manzi, J. Noilhan, H. Giordani, and M. Déqué, 1995 : The land surface scheme ISBA within the Météo-France climate model ARPEGE. Part I. Implementation and preliminary results. *Journal of Climate*, **8** (8), 2039–2057, doi :[10.1175/1520-0442\(1995\)008<2039:TLSSIW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1995)008<2039:TLSSIW>2.0.CO;2), URL https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/8/8/1520-0442_1995_008_2039_tlssiw_2_0_co_2.xml.
- Mahrt, L. and M. Ek, 1993 : Spatial variability of turbulent fluxes and roughness lengths in haptomobilhy. *Boundary-layer meteorology*, **65**, 381–400.
- Masson, V., 2000 : A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-layer meteorology*, **94** (3), 357–397, doi :[10.1023/A:1002463829265](https://doi.org/10.1023/A:1002463829265), URL <https://doi.org/10.1023/A:1002463829265>.
- Masson, V., P. Le Moigne, E. Martin, S. Faroux, A. Alias, R. Alkama, S. Belamari, A. Barbu, A. Boone, F. Bouyssel, et al., 2013 : The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geoscientific Model Development*, **6** (4), 929–960, doi :[10.5194/gmd-6-929-2013](https://doi.org/10.5194/gmd-6-929-2013), URL <https://gmd.copernicus.org/articles/6/929/2013/>.
- Michau, Y., A. Lemonsu, P. Lucas-Picher, and C. Caillaud, 2023 : Evaluation of the urban heat island of 12 cities of France in a high-resolution regional climate model simulation. *Urban Climate*, **47**, 101386, doi :<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101386>, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095522003042>.
- Mironov, D., E. Heise, E. Kourzeneva, B. Ritter, N. Schneider, and A. Terzhevik, 2010 : Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO. *Boreal environment research*, **15**, 218–230.
- Munier, S. and B. Decharme, 2022 : River network and hydro-geomorphological parameters at 1/12 resolution for global hydrological and climate studies. *Earth System Science Data*, **14** (5), 2239–2258, doi :[10.5194/essd-14-2239-2022](https://doi.org/10.5194/essd-14-2239-2022), URL <https://essd.copernicus.org/articles/14/2239/2022/>.
- Noilhan, J., P. Lacarrère, A. Dolman, and E. Blyth, 1997 : Defining area-average parameters in meteorological models for land surfaces with mesoscale heterogeneity. *Journal of Hydrology*, **190** (3), 302–316, doi :[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03131-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03131-9), URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169496031319>, aggregate Description of Land-Atmosphere Interactions.
- Noilhan, J. and S. Planton, 1989 : A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly weather review*, **117** (3), 536–549, doi :[10.1175/1520-0493\(1989\)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2), URL https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/117/3/1520-0493_1989_117_0536_aspols_2_0_co_2.xml.

- Noual, G., 2023 : Occupation des terres et climat régional : impact des surfaces forestières sur l'enneigement dans le sud-ouest de la France. Ph.D. thesis, URL <http://www.theses.fr/2023BORD0052>, thèse de doctorat dirigée par Brunet, Yves et Lac, Christine Physique de l'environnement Bordeaux 2023.
- Noual, G., Y. Brunet, P. Le Moigne, and C. Lac, 2023 : Simulating the effects of regional forest cover and windthrow-induced cover changes on mid-latitude boundary-layer clouds. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, **128** (13), doi :<https://doi.org/10.1029/2023jD03847>.
- Pergaud, J., V. Masson, S. Malardel, and F. Couvreux, 2009 : A parameterization of dry thermals and shallow cumuli for mesoscale numerical weather prediction. *Boundary-Layer Meteorology*, **132** (1), 83–106.
- Pinty, J.-P. and P. Jabouille, 1998 : A mixed-phase cloud parameterization for use in mesoscale non-hydrostatic model : simulations of a squall line and of orographic precipitations. *Proc. Conf. of Cloud Physics, Everett, WA, USA, Amer. Meteor. soc.*, 217 – 220.
- Potes, M., M. Joao Costa, R. Salgado, D. Bortoli, A. Serafim, and P. Le Moigne, 2013 : Spectral measurements of underwater downwelling radiance of inland water bodies. *Tellus A : Dynamic Meteorology and Oceanography*, **65** (1), 20 774, doi :<https://doi.org/10.3402/tellusa.v65i0.20774>.
- Quintana-Segui, P., P. Le Moigne, Y. Durand, E. Martin, F. Habets, M. Baillon, C. Canellas, L. Franchisteguy, and S. Morel, 2008 : Analysis of near-surface atmospheric variables : Validation of the SAFRAN analysis over France. *Journal of applied meteorology and climatology*, **47** (1), 92–107, doi :10.1175/2007JAMC1636.1, URL <https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/47/1/2007jamc1636.1.xml>.
- Riley, M. J. and H. G. Stefan, 1988 : Minlake : A dynamic lake water quality simulation model. *Ecological Modelling*, **43** (3), 155–182, doi :[https://doi.org/10.1016/0304-3800\(88\)90002-6](https://doi.org/10.1016/0304-3800(88)90002-6).
- Ritter, B. and J.-F. Geleyn, 1992 : A comprehensive radiation scheme for numerical weather prediction models with potential applications in climate simulations. *Monthly Weather Review*, **120** (2), 303–325, doi :10.1175/1520-0493(1992)120<0303:ACRSFN>2.0.CO;2, URL https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/120/2/1520-0493_1992_120_0303_acrsfn_2_0_co_2.xml.
- Rochetin, N., F. Couvreux, and F. Guichard, 2017 : Morphology of breeze circulations induced by surface flux heterogeneities and their impact on convection initiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **143** (702), 463–478, doi :<https://doi.org/10.1002/qj.2935>, URL <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.2935>, <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/qj.2935>.
- Rousset, F., 2010 : Modélisation des bilans de surface et des débits sur la France, application à la prévision d'ensemble des débits. Ph.D. thesis, Toulouse 3 - France.
- Sadki, M., S. Munier, A. Boone, and S. Ricci, 2023 : Implementation and sensitivity analysis of the Dam-Reservoir Operation model (DROP v1.0) over Spain. *Geoscientific Model Development*, **16** (2), 427–448, doi :10.5194/gmd-16-427-2023, URL <https://hal.science/hal-03957647>.

- Salgado, R. and P. Le Moigne, 2010 : Coupling of the flake model to the surfex externalized surface model. *Boreal Environment Research*, **15**, 231–244.
- Samuelsson, P., E. Kourzeneva, and D. V. Mironov, 2010 : The impact of lakes on the european climate as simulated by a regional climate model. *Boreal Environment Research*, **15**, 113–129.
- Seity, Y., P. Brousseau, S. Malardel, G. Hello, P. Bénard, F. Bouttier, C. Lac, and V. Masson, 2011 : The AROME-France convective-scale operational model. *Monthly Weather Review*, **139** (3), 976–991, doi :10.1175/2010MWR3425.1, URL <https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/139/3/2010mwr3425.1.xml>.
- Soci, C., E. Bazile, F. Besson, and T. Landelius, 2016 : High-resolution precipitation re-analysis system for climatological purposes. *Tellus A : Dynamic Meteorology and Oceanography*, **68** (1), 29 879, doi :10.3402/tellusa.v68.29879, URL <https://doi.org/10.3402/tellusa.v68.29879>.
- Stepanenko, V. M. and V. N. Lykosov, 2005 : Numerical modeling of heat and moisture transfer processes in a system lake-soil. *Russian Journal for Meteorology and Hydrology*, **3**, 95–104.
- Svensson, G., B. Holtslag, V. Kumar, T. Mauritsen, G.-J. Steeneveld, W. Angevine, E. Bazile, A. Beljaars, E. Bruijn, A. Cheng, L. Conangla, J. Cuxart, M. Ek, M. Falk, F. Freedman, H. Kitagawa, V. Larson, A. Lock, J. Mailhot, and M. Zampieri, 2011 : Evaluation of the diurnal cycle in the atmospheric boundary layer over land as represented by a variety of single-column models : The second gabl experiment. *Boundary-Layer Meteorology*, **140**, 177–206, doi :10.1007/s10546-011-9611-7.
- Teuling, A., C. Taylor, J. F. Meirink, L. Melsen, D. Miralles, C. van Heerwaarden, R. Vautard, A. Stegehuis, G.-J. Nabuurs, and J. Arellano, 2017 : Observational evidence for cloud cover enhancement over western european forests. *Nature Communications*, **8**, 14 065, doi :10.1038/ncomms14065.
- van den Broeke, M., 2005 : Strong surface melting preceded collapse of antarctic peninsula ice shelf. *Geophysical Research Letters*, **32** (12), doi :<https://doi.org/10.1029/2005GL023247>, URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2005GL023247>, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2005GL023247>.
- Van hyfte, S., 2021 : Mise en oeuvre et évaluation d'un nouveau système de réanalyses météorologiques des paramètres de surface à haute résolution. Ph.D. thesis, URL <http://www.theses.fr/2021INPT0126>, thèse de doctorat dirigée par Boone, Aaron et Le Moigne, Patrick Océan, Atmosphère, Climat Toulouse, INPT 2021.
- Van Hyfte, S., P. Le Moigne, E. Bazile, A. Verrelle, and A. Boone, 2023 : High-resolution reanalysis of daily precipitation using arome model over france. *Tellus A : Dynamic Meteorology and Oceanography*, **75** (1), 27–49, doi :10.16993/tellusa.95, URL <https://doi.org/10.16993/tellusa.95>.
- Vergnes, J.-P., B. Decharme, R. Alkama, E. Martin, F. Habets, and H. Douville, 2012 : A simple groundwater scheme for hydrological and climate applications : Description and offline evaluation over France. *Journal of Hydrometeorology*, **13** (4), 1149–1171, doi :10.1175/

JHM-D-11-0149.1, URL https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/13/4/jhm-d-11-0149_1.xml.

- Verpoorter, C., T. Kutser, D. Seekel, and L. Tranvik, 2014 : A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery. *Geophysical Research Letters*, **41 (18)**, 6396–6402, doi :<https://doi.org/10.1002/2014GL060641>, URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014GL060641>.
- Vidal, J.-P., E. Martin, L. Franchistéguy, M. Baillon, and J.-M. Soubeyroux, 2010 : A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, **30 (11)**, 1627–1644, doi :10.1002/joc.2003, URL <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.2003>.
- Vignon, E., F. Hourdin, C. Genthon, H. Gallée, E. Bazile, M.-P. Lefebvre, J.-B. Madeleine, and B. J. H. Van de Wiel, 2017 : Antarctic boundary layer parametrization in a general circulation model : 1-d simulations facing summer observations at dome c. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, **122 (13)**, 6818–6843, doi :<https://doi.org/10.1002/2017JD026802>, URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2017JD026802>, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2017JD026802>.
- Vionnet, V., E. Brun, S. Morin, S. Faroux, P. Le Moigne, E. Martin, and J. Willemet, 2012 : The detailed snowpack scheme crocus and its implementation in surfex v7.2. *Geoscientific Model Development*, **5**, 773–791, doi :10.5194/gmd-5-773-2012.
- Voirin, S., 2003 : Modélisation distribuée des flux d'eau et d'énergie et des débits à l'échelle régionale du bassin adour-garonne. Ph.D. thesis, Toulouse 3 - France.
- Voltaire, A., D. Saint-Martin, S. Sénési, B. Decharme, A. Alias, M. Chevallier, J. Colin, J.-F. Guérémy, M. Michou, M.-P. Moine, et al., 2019 : Evaluation of CMIP6 deck experiments with CNRM-CM6-1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **11 (7)**, 2177–2213, doi :<https://doi.org/10.1029/2019MS001683>, URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019MS001683>.
- Xu, R., Y. Li, A. J. Teuling, L. Zhao, D. V. Spracklen, L. Garcia-Carreras, R. Meier, L. Chen, Y. Zheng, H. Lin, and B. Fu, 2022 : Contrasting impacts of forests on cloud cover based on satellite observations. *Nature Communications*, **13 (670)**, doi :10.1038/s41467-022-28161-7, URL <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28161-7>.
- Zilitinkevich, S., 1995 : Non-local turbulent transport pollution dispersion aspects of coherent structure of convective flows.

CHAPITRE 6

Annexes

6.1 Enseignement, Encadrement, Animation

6.1.1 Enseignement

- Depuis 2002, je suis responsable du stage annuel de formation au modèle SURFEX et organisateur de la réunion des utilisateurs de SURFEX.
- Entre 2010 et 2015, j’ai dispensé le cours de couche limite atmosphérique aux ingénieurs des travaux de première année en formation initiale (module annuel de 30h).
- Depuis 2020, je participe aux cours sur les surfaces continentales, dispensé en formation initiale aux élèves ingénieurs des travaux de la météorologie en deuxième année.

6.1.2 Encadrement de thèse

- Thibault Guinaldo (2017-2020) (Guinaldo, 2019) sur la paramétrisation de la dynamique lacustre dans un modèle de surface couplé pour une application à la prévision hydrologique à l’échelle globale (thèse co-encadrée à 40% avec Aaron Boone et Simon Munier).
- Stéphane Van Hyfte (2018-2021) (Van hyfte, 2021) sur la mise en oeuvre et évaluation d’un nouveau système de réanalyses météorologiques des paramètres de surface à haute résolution (thèse co-encadrée à 40% avec Eric Bazile, Antoine verrelle et Aaron Boone).
- Gaëtan Noual (2019-2022) (Noual, 2023) sur l’impact des surfaces forestières sur l’ennuage-ment dans le sud de la France (thèse co-encadrée à 25% avec Christine Lac et Yves Brunet).
- Tanguy Lunel (2021-2024) sur l’impact de l’irrigation sur le couplage surface atmosphère en zone semi-aride (thèse co-encadrée à 50% avec Aaron Boone).
- William Antolin (2021-2024) sur la Modélisation couplée végétation/feu/atmosphère pour l’estimation du risque incendie de forêt (thèse co-encadrée à 25% avec Mélanie rochoux).

6.1.3 Encadrement de post-doctorants

- Marko Kvakic (2012) dans le cadre du projet TOSCA SWOTLAKE sur la modélisation des lacs à l'échelle globale.
- Camille Szczypta (2016-2017) dans le cadre du projet FP7 UERRA sur la réanalyse de paramètres de surface avec le modèle SURFEX sur l'Europe et validation avec des données hydrologiques.
- François Moussu (2015-2016) dans le cadre du projet RTRA REGARD sur l'intégration des processus anthropiques et informations satellitaires dans un modèle hydrométéorologique à l'échelle du bassin de la Garonne.
- Delphine Leroux (2010) dans le cadre du projet Aquif-FR sur la prévision saisonnière des eaux souterraines en France (stage co-encadré à 25% avec Simon Munier et Florence Habets)
- Miquel Tomas (2021-2024) dans le cadre d'une bourse MOPGA sur l'impact du changement climatique sur la ressource en eau en France avec le modèle SIM (stage co-encadré à 50% avec Aaron Boone).
- Anaïs Barrella Ortiz (2023-2026) dans le cadre du projet Horizon-Europe CERISE sur l'impact du changement d'occupation des sols sur une réanalyse hydrométéorologique en Europe et l'évaluation des prévisions saisonnières météorologiques par l'hydrologie (encadré à 100%).
- xxx (2023-2026) dans le cadre du projet Copernicus CERRA sur la production d'une réanalyse hydrométéorologique en Europe à haute résolution (co-encadré à 80% avec Yannick Selly).

6.1.4 Encadrement de stages M2 ou 3^e année d'école d'ingénieur

- Adrian Bourgois en 2021 sur l'évaluation de la nouvelle option de végétation explicite ISBA-MEB pour la végétation basse à l'échelle locale, avec Aaron Boone (CNRM/GMME/SURFACE). Encadrement 15%.
- Dorian Bourdon en 2021 sur l'Amélioration de la représentation des lacs dans les modèles opérationnels de Météo-France, avec Adrien Napoly (CNRM/GMAP/PROC). Encadrement 30%.
- Sonia Meherzi (2022) sur l'impact du changement climatique sur l'évaporation des retenues d'eau en France avec Fabienne Rousset (DCSC/EMA). Encadrement 90%.
- Benoit Hesse (2023) sur la modélisation du lac IVARS en Espagne en utilisant les mesures de la campagne LIAISE de 2021, avec Guylaine Canut (CNRM/GMEI/4M). Encadrement 90%.

6.1.5 Comité de suivi de thèse

- Jordi Etchanchu (CESBIO, 2016-2019) sur l'apport de la télédétection haute résolution sur la modélisation hydrométéorologique.
- Antony Bernus (LSCE, 2018-2022) sur la représentation des lacs dans le modèle de surface ORCHIDEE.

- Antoine Sobaga (CNRM, 2020-2023) sur l'amélioration de l'estimation des écoulements lors des précipitations extrêmes : focus sur l'infiltration via l'analyse de données lysimétriques.
- Rémi Bonnet (CERFACS, 2015-2018) sur les variations hydrologiques du cycle continental en France des années 1850 à aujourd'hui.

6.1.6 Participation à des projets nationaux et internationaux

- 2007-2008 : PEPS Feux sur le couplage feu-atmosphère, étude de faisabilité (coordination du projet : Jean-Baptiste Filippi, SPE Corte)
- 2009-2012 : ANR IDEA, incendies de forêt, simulation de la dynamique aux émissions atmosphériques par couplage de code (coordination du projet : Jean-Baptiste Filippi, SPE Corte)
- 2012-2022 : SWOT sur l'étude de l'hydrologie globale à l'aide des mesures satellitaires de la mission SWOT (coordination du projet : CNES et NASA)
- 2014-2018 : LEFE (INSU) GABLS4 sur la représentation des couches limites stables en Antarctique (coordination du projet : Eric Bazile, CNRM Toulouse)
- 2014-2024 : Aqui-FR sur le développement d'une plateforme de modélisation hydrogéologique nationale (coordination du projet : Florence Habets, ENS Paris)
- 2017-2020 ANR FIRECASTER, plateforme de prévision incendie et de réponse d'urgence (coordination du projet : Jean-Baptiste Filippi, SPE Corte)
- 2017-2021 : Copernicus CERRA sur le déploiement et la mise en opérationnel d'une réanalyse atmosphérique et de surface à haute résolution sur l'Europe (coordination du projet : Semjon Schimanke, SMHI Norrköping)
- 2017-2021 : Copernicus CARRA sur le déploiement et la mise en opérationnel d'une réanalyse régionale atmosphérique à haute résolution sur l'arctique (coordination du projet : Harald Schyberg, Met Norway Oslo)
- 2019-2022 : LUCAS sur l'impact des surfaces forestières sur le développement nuageux et la qualité de l'air dans le sud-ouest de la France (coordination du projet : Yves Brunet, INRAE Bordeaux)
- 2020-2024 : ANR HILIAISE sur l'étude de l'empreinte humaine sur les couplages surface-atmosphère en zones semi-arides (coordination du projet : Aaron Boone, CNRM Toulouse)
- 2021-2025 : ANR MOSAI sur la modélisation des interactions entre la surface et l'atmosphère (coordination du projet : Fabienne Lohou, LAERO Lannemezan)
- 2022-2026 : Horizon Europe CERISE sur la suite des services Copernicus en matière de prévisions saisonnières et réanalyses (coordination du projet : Patricia de Rosnay, ECMWF Reading)
- 2022-2026 : Copernicus CARRA2 sur le déploiement et la mise en opérationnel d'une réanalyse régionale atmosphérique à haute résolution sur l'arctique, suite du projet CARRA (coordination du projet : Harald Schyberg, Met Norway Oslo)
- 2023-2027 : Copernicus CERRA-TU sur le déploiement et la mise en opérationnel d'une réanalyse atmosphérique et de surface à haute résolution sur l'Europe, suite du projet CERRA (coordination du projet : Semjon Schimanke, SMHI Norrköping)

6.1.7 Organisation d'ateliers

- Atelier de modélisation de l'atmosphère 2013
- Atelier SUW2017 sur les études en recherche et développement menées avec SURFEX
- Atelier SUW2019 sur les études en recherche et développement menées avec SURFEX
- Atelier LAKE2019 sur les paramétrisations des lacs dans les modèles de prévision numérique du temps et de climat

6.2 Publications

6.2.1 Sélection d'articles

Voici une liste d'articles que je considère comme les plus représentatifs de mes travaux de recherche.

Support à la section 2.2

- **P. Le Moigne**, 2002. Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN. Note de centre GMME n°77.
- S. Van Hyfte, **P. Le Moigne**, E. Bazile, A. Verrelle, and A. Boone. High-resolution reanalysis of daily precipitation using AROME model over France. *Tellus-A*, Volume 75, 27-49, <https://doi.org/10.16993/tellusa.95>, 2023.

Support à la section 2.3

- Masson, V., **P. Le Moigne**, E. Martin, S. Faroux, A. Alias, R. Alkama, S. Belamari, A. Barbu, A. Boone, F. Bouyssel, P. Brousseau, E. Brun, J.-C. Calvet, D. Carrer, B. Decharme, C. Delire, S. Donier, K. Essaouini, A.-L. Gibelin, H. Giordani, F. Habets, M. Jidane, G. Kerdraon, E. Kourzeneva, M. Lafaysse, S. Lafont, C. Lebeaupin-Brossier, A. Lemonsu, J.-F. Mahfouf, P. Marguinaud, M. Mokhtari, S. Morin, G. Pigeon, R. Salgado, Y. Seity, F. Taillefer, G. Tanguy, P. Tulet, B. Vincendon, V. Vionnet, and A. Voldoire, 2013 : The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geoscientific Model Development*, Volume : 6, Pages : 929-960, DOI :10.5194/gmd-6-929-2013, Published : 16 JUL 2013.
- **Le Moigne, P.**, Legain, D, Lagarde, F, Potes, M, Tzanos, D, Moulin, E, Barrie, J, Salgado, R, Messiaen, G, Fiandrino, A, Donier, S, Traulle, O, Costa, MJ, 2013 : Evaluation of the lake model FLake over a coastal lagoon during the THAUMEX field campaign. *TELLUS SERIES A-DYNAMIC METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY*, Volume : 65, Article Number : 20951, Doi : 10.3402/tellusa.v65i0.20951. Published : 2013.
- Guinaldo, T., Munier, S., **Le Moigne, P.**, Boone, A., Decharme, B., Choulga, M., and Leroux, D. J., 2021 : Parametrization of a lake water dynamics model MLake in the ISBA-CTRIP land surface system (SURFEX v8.1), *Geosci. Model Dev.*, 14, 1309–1344, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-1309-2021>.

Support à la section 2.4

- **Le Moigne, P.**, J., Colin, and B. Decharme, 2016 : Impact of lake surface temperatures simulated by the Flake scheme in the CNRM-CM5 climate model. *TELLUS SERIES A-Dynamic Meteorology and Oceanography* 2016, 68, 31274, <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v68.31274>
- **Le Moigne, P.**, Besson, F., Martin, E., Boé, J., Boone, A., Decharme, B., Etchevers, P., Faroux, S., Habets, F., Lafaysse, M., Leroux, D., and Rousset-Regimbeau, F., 2020 : The latest improvements with SURFEX v8.0 of the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological model for France. *Geosci. Model Dev.*, 13, 3925–3946, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3925-2020>

6.2.2 Publications dans des revues de rang A

2001

- Ottlé C., Etchevers P., Golaz C., Habets F., Noilhan J., Martin E., Ledoux E., Leblois E., Sauquet E., Amraoui N., Artinian E., Champeaux J.L., Guérin C., Lacarrère P., **Le Moigne P.**, Saulnier G.M., Vidal-Madjar D., Voirin S. (2001) : The French Rhone program : Coupled modelisation (surface atmosphere) of the water discharges, general presentation and objectives, *Physics and Chemistry of the Earth*, 26(5-6), 443-453.

2004

- Florence Habets, **Patrick Le Moigne**, Joel Noilhan, 2004 : On the utility of operational precipitation forecasts to serve as input for streamflow forecasting. *Journal of Hydrology* 293, 270–288. Rousset F., F. Habets, E. Gomez, **P. Le Moigne**, S. Morel, J. Noilhan et E. Ledoux, 2004 : Hydrometeorological modeling of the Seine basin using the Safran-Isba-Modcou system. *J. Geophys. Res.*, 109, D14105.

2006

- D. Leenhardt, D. Wallach, **P. Le Moigne**, M. Guérif, A. Bruand, M.A. Casterad, 2006 : Using crop models for multiple fields, in *Working with Dynamic Crop Models*, Edited by D. Wallach, D. Makowski and J. W. Jones, Elsevier, Chapter 7, p 209-248.

2007

- Caballero Y., S. Voirin-Morel, F. Habets, J. Noilhan, **P. Le Moigne**, A. Lehenaff et A. Boone, 2007 : Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change. *Water Resour. Res.*, 43, W07448.

2008

- E. Artinyan , F. Habets , J. Noilhan , E. Ledoux , D. Dimitrov , E. Martin , and **P. Le Moigne**, 2008 : Modelling the water budget and the riverflows of the Maritsa basin in Bulgaria. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 21-37.
- F. Habets, A. Boone, J. L. Champeaux, P. Etchevers, L. Franchisteguy, E. Leblois, E. Ledoux, **P. Le Moigne**, E. Martin, S. Morel, J. Noilhan, P. Quintana Segui, F. Rousset-Regimbeau, and P. Viennot, 2008 : The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal Of Geophysical Research*, vol. 113, D06113.
- P. Quintana-Segui, **P. Le Moigne**, Y. Durand, E. Martin, And F. Habets, 2008 : Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables : Validation of the SAFRAN Analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol 47, 92-107.
- J.-C. Calvet, A.-L. Gibelin, J.-L. Roujean, E. Martin, **P. Le Moigne**, H. Douville, and J. Noilhan, 2008 : Past and future scenarios of the effect of carbon dioxide on plant growth and transpiration for three vegetation types of southwestern France. *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 397–406

2009

– A. Brut, C. Rüdiger, S. Lafont, J.-L. Roujean, J.-C. Calvet, L. Jarlan, A.-L. Gibelin, C. Albergel, **P. Le Moigne**, J.-F. Soussana, and K. Klumpp, 2009 : Modelling LAI at a regional scale with ISBA-A-gs : comparison with satellite-derived LAI over southwestern France. *Biogeosciences Discuss.*, 6, 4059-4093.

– Bouilloud, L. E. Martin, F. Habets, A. Boone, **P. Le Moigne**, J. Livet, M. Marchetti, A. Foidart, L. Franchistéguy, S. Morel, J. Noilhan, P. Pettré, 2009 : Road surface condition forecasting in France. *J. Appl. Meteor. and Clim.*, Volume : 48 Issue : 12, Pages : 2513-252, DOI : 10.1175/2009JAMC1900.1

– Jean Baptiste Filippi, Frédéric Bosseur, Céline Mari, Christine Lac, **Patrick Le Moigne**, Bénédicte Cuenot, Denis Veynante, Daniel Cariolle, Jacques Henri Balbi, 2009 : Coupled atmosphere-wildland fire modelling, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, Vol. 1, Art. 11, 9 pp., doi:10.3894/JAMES.2009

2010

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

– Alkama, R. ; Decharme, B. ; Douville, H. ; Becker, M. ; Cazenave, A. ; Sheffield, J. ; Voldoire, A. ; Tyteca, S. ; **Le Moigne**, P., 2010 : Global Evaluation of the ISBA-TRIP Continental Hydrological System. Part I : Comparison to GRACE Terrestrial Water Storage Estimates and In Situ River Discharges. *Journal of Hydrometeorology*, vol. 11, issue 3, pp. 583-600

2011

– Noilhan, J., S. Donier, P. Lacarrère, C. Sarrat, and **P. Le Moigne** (2011), Regional-scale evaluation of a land surface scheme from atmospheric boundary layer observations, *J. Geophys. Res.*, 116, D01104, doi :10.1029/2010JD014671.

– BRUN E., SIX D., PICARD G., VIONNET V., ARNAUD L., BAZILE E., BOONE A., BOUCHARD A., GENTHON C., GUIDARD V., **LE MOIGNE P.**, RABIER F., SEITY Y., 2011 : Snow-atmosphere coupled simulation at Dome C, Antarctica. *Journal of Glaciology*. Vol 52, N° 204.

2012

– Vionnet, V., Brun, E., Morin, S., Boone, A., Faroux, S., **Le Moigne, P.**, Martin, E., and Willemet, J.-M. : The detailed snowpack scheme Crocus and its implementation in SURFEX v7.2. *Geoscientific Model Development*, Volume : 5, Issue : 3, Pages : 773-791, DOI : 10.5194/gmd-5-773-2012. Published : 2012.

– Bouin, M.-N, G. Caniaux, O. Traullé, D. Legain, and **P. Le Moigne**(2012), Long-term heat exchanges over a Mediterranean lagoon, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, Volume : 117, Article Number : D23104 DOI : 10.1029/2012JD017857, Published : DEC 5 2012.

– Kourzeneva E., E. Martin, Y. Batrak and **P. Le Moigne**, 2012 : Climate data for parameterisation of lakes in Numerical Weather Prediction models. *TELLUS Series A-Chemical and Physical Meteorology*, Volume : 64, Article Number : 17226, DOI : 10.3402/tellusa.v64i0.17226. Published : 2012.

– Carrer, D., S. Lafont, J.-L. Roujean, J.-C. Calvet, C. Meurey, **P. Le Moigne**, and I. F. Trigo, 2012 : Incoming Solar and Infrared Radiation Derived from METEOSAT : Impact on the Modeled Land Water and Energy Budget over France, *Journal of Hydrometeorology* , Volume : 13, Issue : 2, Pages : 504-520, Doi : 10.1175/JHM-D-11-059.1. Published : APR 2012.

2013

– Potes, M., Costa, MJ, Salgado, R, Bortoli, D, Serafim, A, **Le Moigne**, P, 2013 : Spectral measurements of underwater downwelling radiance of inland water bodies. *TELLUS SERIES*

A-DYNAMIC METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY, Volume : 65, Article Number : 20774, Doi : 10.3402/tellusa.v65i0.20774. Published : 2013.

- Faroux, S., Kaptué Tchuenté, A. T., Roujean, J.-L., Masson, V., Martin, E., and **Le Moigne**, P. : ECOCLIMAP-II/Europe : a twofold database of ecosystems and surface parameters at 1 km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models. GEOSCIENTIFIC MODEL DEVELOPMENT, Volume : 6, Issue : 2, Pages : 563-582, Doi :10.5194/gmd-6-563-2013 Published : 2013.
- **Le Moigne**, P, Legain, D, Lagarde, F , Potes, M , Tzanos, D, Moulin, E, Barrie, J, Salgado, R, Messiaen, G, Fiandrino, A, Donier, S, Traulle, O, Costa, MJ, 2013 : Evaluation of the lake model FLake over a coastal lagoon during the THAUMEX field campaign. TELLUS SERIES A-DYNAMIC METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY, Volume : 65, Article Number : 20951, Doi : 10.3402/tellusa.v65i0.20951. Published : 2013.
- Masson, V., **P. Le Moigne**, E. Martin, S. Faroux, A. Alias, R. Alkama, S. Belamari, A. Barbu, A. Boone, F. Bouyssel, P. Brousseau, E. Brun, J.-C. Calvet, D. Carrer, B. Decharme, C. Delire, S. Donier, K. Essaouini, A.-L. Gibelin, H. Giordani, F. Habets, M. Jidane, G. Kerdraon, E. Kourzeneva, M. Lafaysse, S. Lafont, C. Lebeaupin-Brossier, A. Lemonsu, J.-F. Mahfouf, P. Marguinaud, M. Mokhtari, S. Morin, G. Pigeon, R. Salgado, Y. Seity, F. Taillefer, G. Tanguy, P. Tulet, B. Vincendon, V. Vionnet, and A. Voldoire, 2013 : The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. Geoscientific Model Development, Volume : 6, Pages : 929-960, DOI :10.5194/gmd-6-929-2013, Published : 16 JUL 2013.

2016

- **Le Moigne**, P., J., Colin, and B. Decharme, 2016 : Impact of lake surface temperatures simulated by the Flake scheme in the CNRM-CM5 climate model. TELLUS SERIES A-Dynamic Meteorology and Oceanography 2016, 68, 31274, <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v68.31274>
- Decharme, B., E. Brun, A. Boone, C. Delire, **P. Le Moigne** and S. Morin, 2016 : Impacts of snow and organic soils parameterization on northern Eurasian soil temperature profiles simulated by the ISBA land surface model. The Cryosphere, Volume : 10, Pages : 853-877, Doi :10.5194/tc-10-853-2016, Published : APR 2016.
- Martin, E, Gascoin, S, Grusson, Y, Murgue, C, Bardeau, M, Anctil, F, Ferrant, S, Lardy, R, **Le Moigne**, P, Leenhardt, D, Rivalland, V, Perez, JMS, Sauvage, S, Therond, O, 2016 : On the Use of Hydrological Models and Satellite Data to Study the Water Budget of River Basins Affected by Human Activities : Examples from the Garonne Basin of France. Surveys in Geophysics, Volume : 37, Issue : 2, Special Issue : SI, Pages : 223-247, Doi : 10.1007/s10712-016-9366-2. Published : MAR 2016.

2017

- Faisal Hossain, Margaret Srinivasan ; Craig Peterson ; Alice Andral ; Ed Beighley ; Eric Anderson ; Rashied Amini ; Charon Birkett ; David Bjerklie ; Cheryl A Blain ; Philip S Calahan ; Selma Cherchali ; Charles Corbett ; Cedric H David ; Shailen D Desai ; Bradley Doorn ; Jorge Ecurra ; Lee-Lueng Fu ; Christopher Frans ; John Fulton ; Subhrendu Gangopadhyay ; Subimal Ghosh ; Colin Gleason ; Marielle Gosset ; Jessica Hausman ; Gregg Jacobs ; John Jones ; Yasir Kaheil ; Benoit Laignel ; **Patrick Le Moigne** ; Li Li ; Fabien Lefevre ; Robert Mason ; Amita Mehta ; Abhijit Mukherjee ; Anthony Nguy-Robertson ; Sophie Ricci ; Adrien Paris ; Tamlin Pavelsky ; Nicolas Picot ; Guy Schumann ; Sudhir Shrestha ; Pierre-Yves Letraon ; Eric Trehubenko, 2017. Engaging the User Community for Advancing Societal Applications of the Surface Water Ocean Topography (SWOT) mission. BAMS -D-17-0161

- Raimonet, M., Oudin, L., Vautard, R., **Le Moigne**, P., Silvestre, M., Rabouille, C., Garnier, J., Thieu, V., 2017. Evaluation of reanalysis datasets for hydrological modeling. *Journal of Hydrometeorology*. Volume : 18 Issue : 11 Pages : 3027-3041 Published : NOV 2017
- Albergel, C., S. Munier, D.J. Leroux, H. Dewaele, D. Fairbairn, A. L. Barbu, E. Gelati, W. Dorigo, S. Faroux, C. Meurey, **P. Le Moigne**, B. Decharme, J.-F. Mahfouf, J.-C. Calvet, 2017 : Sequential assimilation of satellite-derived vegetation and soil moisture products using SURFEX_v8.0 : LDAS-Monde assessment over the Euro-Mediterranean area. *GEOSCIENTIFIC MODEL DEVELOPMENT* Volume : 10 Issue : 10 Pages : 3889-3912 Published : OCT 25 2017

2019

- Sylvain Biancamaria, Moussa Mballo, **Patrick Le Moigne**, Jose Miguel Sanchez Perez, Gregory Espitalier-Noel, Youen Grusson, Roxelane Cakir, Vincent Hafliger, Florian Barathieu, Marhiu Trasmonte, Aaron Boone, Eric Martin, Sabine Sauvage, 2019, Total water storage variability from GRACE mission and hydrological models for a 50,000 km² temperate watershed : the Garonne River basin (France). *Journal of Hydrology : regional studies* 24 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100609>

2020

- J.-P. Vergnes, N. Roux, F. Habets, P. Ackerer, N. Amraoui, F. Besson, Y. Caballero, Q. Courtois, J.-R. de Dreuzy, P. Etchevers, N. Gallois, D. Leroux, L. Longuevergnès, **P. Le Moigne**, T. Morel, S. Munier, F. Regimbeau, D. Thiéry, and P. Viennot, 2019. The AquifR hydrometeorological modelling platform as a tool for improving groundwater resource monitoring over France : evaluation over a 60 year period. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 633-654. doi :10.5194/hess-24-633-2020.
- Besson, F., Etchevers, P., Habets, F., **Le Moigne**, P., Rousset-Regimbeau, F., Soubeyroux, J.-M., Viel, C., and Vincendon, B., 2020 : Real-time drought monitoring : from analysis to seasonal forecast. *La Houille Blanche*, 106 :4, 82-92, DOI : 10.1051/lhb/2020042
- **Le Moigne**, P., Besson, F., Martin, E., Boé, J., Boone, A., Decharme, B., Etchevers, P., Faroux, S., Habets, F., Lafaysse, M., Leroux, D., and Rousset-Regimbeau, F., 2020 : The latest improvements with SURFEX v8.0 of the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological model for France. *Geosci. Model Dev.*, 13, 3925–3946, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3925-2020>

2021

- Piccioni, F., Casenave, C., Lemaire, B. J., **Le Moigne**, P., Dubois, P., and Vinçon-Leite, B., 2021 : The thermal response of small and shallow lakes to climate change : new insights from 3D hindcast modelling, *Earth Syst. Dynam.*, 12, 439–456, <https://doi.org/10.5194/esd-12-439-2021>.
- Guinaldo, T., Munier, S., **Le Moigne**, P., Boone, A., Decharme, B., Choulga, M., and Leroux, D. J., 2021 : Parametrization of a lake water dynamics model MLake in the ISBA-CTRIIP land surface system (SURFEX v8.1), *Geosci. Model Dev.*, 14, 1309–1344, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-1309-2021>.

2022

- S. Van Hyfte, **P. Le Moigne**, E. Bazile, A. Verrelle, and A. Boone. High-resolution reanalysis of daily precipitation using AROME model over France. *Tellus-A*, Volume 75, 27-49, <https://doi.org/10.16993/tellusa.95>, 2023.
- **Patrick Le Moigne**, Eric Bazile, Anning Cheng, Emanuel Dutra, John M. Edwards, William Maurel, Irina Sandu, Olivier Traullé, Etienne Vignon, Ayrton Zadra, and Weizhong Zheng. GABLS4 intercomparison of snow models at Dome C in Antarctica. *The Cryosphere*, 16, 2183–2202, <https://doi.org/10.5194/tc-16-2183-2022>, 2022.

2023

- Sobaga, A., Decharme, B., Habets, F., Delire, C., Enjelvin, N., Redon, P.-O., Faure-Cattelain, P., and **Le Moigne, P.** : Assessment of the ISBA Land Surface Model soil hydrology using four closed-form soilwater relationships and several lysimeters, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 27, 2437–2461, <https://doi.org/10.5194/hess-27-2437-2023>, 2023.
- Noual, G., Brunet, Y., **Le Moigne, P.**, and Lac, C. : Simulating the effects of regional forest cover and windthrow-induced cover changes on mid-latitude boundary-layer clouds. *Journal of Geophysical Research*, Volume 123, <https://doi.org/10.1029/2023jD03847>. 2023.
- Cenobio-Cruz, O., Quintana-Segui, P., **Le Moigne, P.**, Boone, A., and Garrote, L. : Assessment of the hydrological impact of an hourly precipitation distribution correction method in the SASER modeling system. *Journal of Hydrology*. 2023. Submitted to HESS.
- Lunel, T., Boone, A., and **Le Moigne, P.** : Influence of Irrigation on Near-Surface Conditions and Breeze Circulation : Evidence from Observations and Models. *Journal of Geophysical Research*. 2023. Submitted to QJRM.
- Jimenez, M.A., Cuxart, J., Boone, A., **Le Moigne, P.**, Lunel, T., Miro, J.R., More, J., Brooke, J., and Best, M. : Land surface Interactions with the Atmosphere over the Iberian Semi-arid Environment (LIAISE) : 1st mesoscale modelling intercomparison. 2023. Submitted to QJRM.
- Ridal, M., Andrae, U., Bazile, E., Berggren, L., Brousseau, P., Dahlgren, P., Edvinsson, L., El Said, A., Glinton, M., Hagelin, S., Hopsch, S., Isaksson, L., Medeiros, P., **Le Moigne, P.**, Olsson, E., Randriamampianina, R., Schimanke, S., Uden, P., and Wang, Z.Q. : CERRA, the Copernicus European Regional Reanalysis System. 2023. In prep.

6.2.3 Publications dans des revues à comité de lecture

2001

- Jean-Louis Champeaux, Florence Favot, Pierre Lacarrère, **Patrick Le Moigne**, Gérard Therry, 2001 : Reconstitution de la climatologie du vent au moyen de simulations numériques à méso-échelle - Action RETIC B-95. Note de Centre GMME n° 8

2002

- **P. Le Moigne**, 2002. Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN. Note de centre GMME n°77.

2005

- D. Brion, J.-C. Calvet, **P. Le Moigne**, B. Ghattas, F. Habets, 2005 : reconstitution par arbres de régression du rayonnement visible descendant horaire sur la France continentale, à partir de données in situ et de simulations : spatialisation et vérification sur des données indépendantes. Note de Centre GMME n° 82.

2008

- Jean-Michel Soubeyroux, éric Martin, Laurent Franchisteguy, Florence Habets, Joël Noilhan, Martine Baillon, Fabienne Regimbeau, Jean-Philippe Vidal, **Patrick Le Moigne** et Sophie Morel, 2008 : Safran-Isba-Modcou (SIM), un outil pour le suivi hydrométéorologique opérationnel et les études. *La Météorologie* - n° 63.

2010

- L. Spinoglio, N. Epchtein, E. Masciadri, F. Lascaux, S. Hagelin, J. Stoesz, **P. Le Moigne** and J. Noilhan, *European Astronomical Society Publications Series* , Volume 40 : 3rd ARENA

Conference : An Astronomical Observatory at CONCORDIA (Dome C, Antarctica) , 2010 , pp. 55 – 64, <https://doi.org/10.1051/eas/1040006>

2012

- Eric Brun, Vincent Vionnet, Samuel Morin, Aaron Boone, Eric Martin, Stéphanie Faroux, **Patrick Le Moigne** et Jean-Marie Willemet, 2012 : Le modèle de manteau neigeux Crocus et ses applications, *La Météorologie*, N°76, Février 2012

2014

- Bazile, E., Couvreur, F., **Le Moigne, P.**, Genthon, C., Holtslag, A. A. M., Svensson : GABLS4 : An intercomparison case to study the stable boundary layer over the Antarctic Plateau. *Global Energy and Water Exchanges News*, 24(4), 2014.

2020

- **Le Moigne, P.**, et M. Minvielle, 2020 : SURFEX : une plateforme pour simuler les flux des surfaces océaniques et continentales. *La Météorologie*, 108, 82-87.
- F. Habets, P. Etchevers, et **P. Le Moigne**, 2020 : La représentation des surfaces continentales pour la prévision hydrologique. *La Météorologie*, 108, 88-92.

2022

- Boone, A., G. Canut-Rocafort, M. Lothon, J. Bellvert, M. Best, J. Brooke, J. Cuxart, O. Hartogensis, **P. Le Moigne**, J. R. Miró, J. Polcher, J. Price, P. Quintana Seguí, M. Wooster, 2022 : Campagne internationale de terrain sur les interactions de la surface terrestre avec l’atmosphère. *La Météorologie*, 116, 5-7. DOI :10.37053/lameteorologie-2022-0005

6.2.4 Communications lors de congrès

2023

- LIAISE Conference 2023, Influence of irrigation on land-surface interactions and the atmospheric boundary layer in a semi-arid region; Results from the LIAISE campaign by Tanguy Lunel et al.
- LIAISE Conference, G. Canut, P. Aressy, J. Barbié, G. Bouhours, J. Couzinier, J.C Etienne, O. Garrouste, P. Le Moigne, E. Moulin and S. Rieublanc. Surface energy balance and thermodynamic measurements over a mobil platform on Lake Ivars during the LIAISE field campaign.
- EMS Conference 2023, G. Noual, Y. Brunet, P. Le Moigne, and C. Lac : Simulating the effects of regional forest cover and windthrow-induced cover changes on mid-latitude boundary-layer clouds.

2021

- METMED Conference 2021, P. Le Moigne, invited talk, What are the key elements to properly represent the surface and its processes in numerical models ?

2020

- Aaron A. Boone, J. Polcher, P. Quintana-Segui, M. J. Best, J. K. Brooke, J. Cuxart, J. Bellvert, G. Canut-Rocafort, P. Le Moigne, and J. Price. Land-Surface Interactions with the Atmosphere Over the Iberian Semi-Arid Environment (LIAISE) : Closing the Terrestrial Water Cycle. AMS meeting 2020.
- J. K. Brooke, A. Lock, M. J. Best, A. Boone, J. Cuxart, J. Polcher, J. Bellvert, G. Canut-Rocafort, P. Le Moigne, J. Price, S. Osborne, P. Quintana-Seguí, J. R. Miro. Land surface-atmosphere interactions observations and modelling framework from the LIAISE (Land

surface Interactions with the Atmosphere over the Iberian Semi-arid Environment) campaign. AMS meeting 2020.

2019

- METMED Conference 2019, P. Le Moigne, S. Donier, A. Boone : Modelling the impact of irrigation in the Ebro basin using the Meso-NH mesoscale model (preliminary study)
- EWGLAM SRNWP 2019, P. Le Moigne : Overview of ALADIN surface activities
- EMS Conference 2019, P. Le Moigne, Y. Seity, S. Faroux, D. Tzanos, M. Minvielle : Design of a high-resolution land cover database for numerical modelling applications
- AMS Conference 2019, P. Le Moigne, A. Boone, S. Biancamaria, C. Emery, T. Guinaldo, D. Leroux, S. Munier, S. SAYSSET, S. RICCI : Towards a Better Understanding of the Hydrological Cycle Using Altimetry
- Simon Munier, Aaron Boone, Simon SAYSSET, Maxime Lesaffre, Sylvain Biancamaria, Patrick Le Moigne. Assimilation of SWOT discharge into CTRIP-12D over the Ebro Basin. AGU meeting 2019.
- Delphine Leroux, Simon Munier, Florence Habets, François Besson, Fabienne Rousset, Patrick Le Moigne, Jean-Pierre Vergnes, Pascal Viennot, Pierre Etchevers, and Nadia Amraoui. Seasonal forecast of the groundwater resource in France. EMS meeting 2019.
- HABETS Florence, Roux Nicolas, AMRAOUI Nadia, BOE Julien, CABALLERO Yvan, ET-CHEVERS Pierre, GALLOIS Nicolas, LE MOIGNE Patrick, LEROUX Delphine, MOREL Thierry, MUNIER Simon, REGIMBEAU Fabienne, THIERY Dominique, VERGNES Jean-Pierre, VIENNOT Pascal .OCCURRENCE DES SECHERESSES DANS LES SOLS, LES RIVIERES ET LES NAPPES EN FRANCE AVEC AQUI-FR : ANALYSE RETROSPECTIVE SUR 60 ANS ET ELEMENTS DE PROJECTIONS. Conférence UNESCO sécheresse étiages et déficits en eau Paris 28-29 novembre 2019.
- E. BAZILE, A. VERRELLE, F. BESSON, M. GLINTON, P. LE MOIGNE. COMPARISON between REGIONAL RE-ANALYSIS and NWP FORECAST FOR SNOW. EMS meeting 2019.

2018

- ISSR Symposium Reanalysis 2018, P. Le Moigne, A. Verrelle, S. Munier, E. Bazile, R. Abida, C. Szczypta : Land Surface Hydrology in the European High-resolution Regional Reanalysis UERRA
- Roux, N., Amraoui, N., Habets, F., Le Moigne, P., Morel, T., Thiery, D., Vergnes, J.-P., Viennot, P., 2018. The AQUI-FR project : the future operational modeling platform for the main regional multilayer aquifers in France. Computational Methods in Water Resources, July 2018, St-Malo
- Eric Bazile, Antoine Verrelle, Patrick Le Moigne, Francois Besson, Rachid Abida, Camille Szczypta, and Cornel Soci, 2018. The 55 years UERRA Surface Re-Analysis over Europe at 5.5km. European Meteorological Society, 2018, 3-7 September, Budapest. Per Unden, Semjon Schimanke, Patrick Le Moigne, Eric Bazile, Martin Ridal, Esbjörn Olsson, Lars Berggren, and Roger Randriamampianina. European high resolution Regional Reanalyses in UERRA and the Copernicus Climate Change Service (C3S). European Meteorological Society, 2018, 3-7 September, Budapest.
- Patrick Le Moigne, Antoine Verrelle, Camille Szczypta, and Eric Bazile. Land Surface Hydrology in the European High-resolution Regional Reanalysis UERRA. European Meteorological Society, 2018, 3-7 September, Budapest.
- Patrick Le Moigne, Antoine Verrelle, Simon Munier, Eric Bazile, Camille Szczypta, and Rachid Abida. Land Surface Hydrology in the European High-resolution Regional Reanalysis UERRA. International Symposium on Regional Analysis, 2018, 17-19 July, Bonn.

- Patrick Le Moigne, A. Verrelle, E. Bazile, F. Besson, R. Abida, C. Szczypta. On the use of the 50-year highresolution UERRA re-analysis for a hydrometeorological application over Europe. 5th International Conference on Reanalysis, 2018, 13-17 November, Rome.
- Schimanke, S., Le Moigne, P. and colleagues. PRECISE - Production of a regional Reanalysis for Europe within the Copernicus Climate Change Services. 5th International Conference on Reanalysis, 2018, 13-17 November, Rome.
- Eric Bazile, Antoine Verrelle, Patrick Le Moigne, Francois Besson, Rachid Abida, Camille Szczypta, and Cornel Soci. The 55 years UERRA Surface Re-Analysis over Europe at 5.5km. International Symposium on Regional Analysis, 2018, 17-19 July, Bonn.
- Antoine Verrelle, Camille Birman, Eric Bazile, and Patrick Le Moigne. Performance evaluation of the mescan precipitation reanalysis system in mountainous areas during winter. European Meteorological Society, 2018, 3-7 September, Budapest.
- P. Le Moigne, S. Faroux, V. Masson, A. Boone, B. Decharme, and A., Napoly. SURFEX Earth Surface Modelling Platform. CO2 Human Emission meeting, 2018, 24-26 January, Reading (ECMWF).
- Boone, A., Le Moigne, P., Biancamaria, S., Emery, C., and Ricci, S. : Towards a better understanding of the hydrological cycle with SWOT. SWOT-ST, 2018, 25-28 June, Montreal.
- Habets, F., Amraoui, N., Boé, J., Bonnet, R., Gallois, N., Le Moigne, P., Morel, T., Roux, N., Vergnes, J.-P., Viennot, P. 2018. Groundwater resource in northern France from XXth to XXIth centuries. Computational Methods in Water Resources, July 2018, St-Malo

2017

- P. Le Moigne, A. Boone, D. Leroux, S. Biancamaria, C. Emery, S. Ricci, B. Decharme. Preparing strategies to optimally use SWOT measurements in order to improve the global hydrological cycle including lakes and reservoirs. SWOT Application, 2017, 5-6 April, Washington.

2016

- EWGLAM SRNWP 2016, P. Le Moigne, P. Termonia, R. Hamdi : ALADIN surface activity overview
- EMS Conference 2016, P. Le Moigne, E. Bazile, W. Maurel, F. Couvreur : Sensitivity tests of the roughness length for heat to the GABLS4 experiment
- Le Moigne, P., Bazile, E., Maurel, W., and Couvreur, F. : Sensitivity tests of the roughness length for heat to the GABLS4 experiment. 16th EMS Annual Meeting and 11th European Conference on Applied Climatology (ECAC), 12–16 September 2016, Trieste, Italy
- Szczypta, C., Le Moigne, P., Decharme, B., Verrelle, A., Bazile, E., and Abida, R. : Setup and first evaluation of the coupled hydro-meteorological MESCAN-SURFEX-TRIP modelling system over Europe. 16th EMS Annual Meeting and 11th European Conference on Applied Climatology (ECAC), 12–16 September 2016, Trieste, Italy
- Besson, F., Regimbeau, F., Blanchard, M., Viel, C., Etchevers, P., Papazzoni, M., Beaulant, A.-L., Le Moigne, P., Martin, E., and Habets, F. : Operational hydro- meteorological monitoring and forecasts over France using the SAFRAN-SURFEX- MODCOU model chain. 16th EMS Annual Meeting and 11th European Conference on Applied Climatology (ECAC), 12–16 September 2016, Trieste, Italy
- Roux, N., Viennot, P., Vergnes, J.-P., Thiery, D., Rousseau, M., Regimbeau, F., Morel, T., Le Moigne, P., Habets, F., Etchevers, P., Caballero, Y., Besson, F., and Amraoui, N. : First results of the AquifR project - assessment of the french national multimodel hydrogeologic system on past years.

- Couvreur, F., Bazile, E., Canut, G., Le Moigne, P., Maronga, B., van Stratum; B.J.H., Basu, S., Fuka, V., Edwards, J.M., Matheou, G., Moene, A., Vignon, E., Maurel, W., and Traullé, O. : LES results of the GABLS4 exercise : an intercomparison of models in extremely stable conditions over Antarctica. 22nd Symposium on Boundary Layers and Turbulence, Salt-Lake city, US, 19-24 June, 2016
- Bazile, E., Couvreur, F., and Le Moigne, P. : GABLS4 : a model inter-comparison study in extremely stable conditions. 22nd Symposium on Boundary Layers and Turbulence, Salt-Lake city, US, 19-24 June, 2016
- Verrelle, A., Le Moigne, P., Bazile, E., Abida, R., and Szczypta, C. Indirect assessment of a high-resolution precipitation reanalysis system in mountainous areas during winter. 16th EMS Annual Meeting and 11th European Conference on Applied Climatology (ECAC), 12–16 September 2016, Trieste, Italy
- Boone, A., Le Moigne, P., Biancamaria, S., Emery, C., and Ricci, S. : Towards a better understanding of the hydrological cycle with SWOT : from regional to global scales. 1st SWOT-ST, Pasadena, CA, 13-16 June 2016 Habets, F., Ackerer, P., Amraoui, N., Besson, F., Caballero, Y., de Dreuz, J.-R., Etchevers,
- P., Le Moigne, P., Morel, T., Regimbeau, F., Rousseau, M., Rousseau-Gueutin, P., Thiéry, D., Vergnes, J.-P., Viennot, P., and Augeard, B. : Aqui-FR : a national multi-model hydrogeological system aiming at taking benefits of existing groundwater modelling applications used by stakeholders to develop new products to provide useful information for water resources management. 43rd IAH Congress, 25-29th September, 2016, Montpellier, France

2015

- AGU Conference 2015, P. Le Moigne, J. Colin, B. Decharme : Implementation and evaluation of the impact of a lake model in the French CNRM-CM global climate model
- EMS Conference 2015, P. Le Moigne, E. Bazile, F. Couvreur, G. Canut, W. Maurel : Sensitivity Tests of the Surface Characteristics in the GABLS4 Experiment
- Salgado, R., Potes, M., Policarpo, C., Le Moigne, P. and ALEX 2014 Scientific team : Interactions lake-atmosphere under Mediterranean conditions : ALEX 2014 observations and simulations. 5th International Conference on Meteorology and Climatology of the Mediterranean, Istanbul, March 2, 2015
- Moussu, F., Le Moigne, P., Le Cointe, P., Bardeau, M., Truche, C., Therond, O., Martin, E., and Habets, F. : Small farm dams modelling in highly anthropized basins : case of the Garonne catchment in the South-West of France. 8th International Congress on Environmental Modelling and Software, Toulouse, 10-14 July, 2016
- Le Moigne, P., Colin, J., and Decharme, B. : Implementation and evaluation of the impact of a lake model in the French CNRM-CM global climate model. AGU Fall Meeting, San Francisco, 14-18 December 2015

2014

- E. Bazile, O. Traullé, H. Barral, V. Guidard, A.A.M. Holtslag, P. Le Moigne, G. Svensson and T. Vihma. GABLS4 : an intercomparaison case to study the stable boundary layer on the Antarctic plateau. The World Weather Open Science Conference (WWOSC) 2014, Montréal, Canada
- P. Le Moigne, M. A. Jiménez, F. Couvreur, J. Cuxart. The surface characteristics effects on the DICE (DIurnal land-atmosphere Coupling Experiment) results seen by the mesonh model. 7th International Scientific Conference on the Global Water and Energy Cycle - The Hague, The Netherlands, July 2014

- M.A. Jiménez, P. Le Moigne, F. Couvreux and J. Cuxart. Sensitivity tests of the surface forcings to the DICE experiment using mesonh model. 7th International Scientific Conference on the Global Water and Energy Cycle - The Hague, The Netherlands, July 2014
- H. Barral, E. Vignon, C. Genthon, E. Bazile, O. Traullé, H. Gallée, C. Brun, F. Couvreux, P. Le Moigne. Summer diurnal cycle at Dome C, on the Antarctic plateau. Boundary Layer and Turbulence conférence AMS, Leeds 2014

2013

- Martin, E., Faroux, S., Le Moigne, P. and Dasprez, S. (2013).Le code de surface SURFEX : développement, utilisation et perspectives. Ateliers de Modélisation de l’atmosphère, Toulouse, 22-24 janvier.

6.2.5 Production de documentation technique

- **P. Le Moigne.** SURFEX V9.0.1 scientific documentation, 2024.
- **P. Le Moigne.** SURFEX V8.1 scientific documentation, 2018.
- **P. Le Moigne.** SURFEX V7.2 scientific documentation, 2012.
- **P. Le Moigne.** SURFEX V5.0 scientific documentation, 2009.