



Rapport de TFE :

Incertitudes sur les réponses hydrologiques régionales dans les scénarios du GIEC

Tuteurs :

**DECHARME Bertrand (CNRM)
DE PERETTI Christian (ECL)
DOUVILLE Hervé (CNRM)
ROGER Michel (ECL)**

Auteur :

BONREPAUX Benjamin

I.Sommaire

Table des matières

.....	1
Rapport de TFE :.....	1
Incertitudes sur les réponses.....	1
hydrologiques régionales.....	1
dans les scénarios du GIEC.....	1
I.Sommaire.....	2
II.Remerciements.....	4
1Résumé.....	5
III.Abstract.....	6
IV.Contexte et prérequis.....	7
1 Présentation de l'équipe VDR.....	7
2 Contexte du stage.....	7
3 Hydrologie, généralités et présentation des modèles de surface continentale.....	10
a) Introduction.....	10
b) Hydrologie, généralités.....	11
Bilan d'eau.....	12
Principaux phénomènes du bilan d'eau.....	12
Évapotranspiration.....	12
Infiltration dans les sols poreux.....	12
Drainage.....	13
Ruissellement de surface.....	13
Échelles.....	14
c)Présentation des modèles utilisés.....	14
La plateforme SURFEX.....	14
Présentation.....	14
Les modèles ISBA et TRIP.....	15
Le modèle ISBA.....	15
Le modèle TRIP.....	17
Vocabulaire relatif aux modèles.....	18
Forçage.....	18
Spin up.....	18
4 Sécheresse.....	18
a) Généralités.....	18
b) Indices des sécheresses.....	19
c)Caractéristiques des sécheresses.....	20
d) sécheresses et changement climatique.....	20
e) Enjeux.....	21
5 Autres événements climatiques extrêmes.....	21
V. Corps du rapport.....	22
1 Introduction et objectifs.....	22
a) Incertitudes dans les projections climatiques globales.....	22
b) Les modèles CMIP5 et les simulations SURFEX.....	23
Les modèles CMIP5.....	23

Simulations SURFEX en mode off line.....	24
c) Objectifs.....	25
2 Résultats des modèles CMIP5.....	25
a) Incertitudes des modèles CMIP5.....	25
Introduction.....	25
Généralités.....	25
Climatologies et anomalie.....	27
Tendances et analyses.....	29
Résultats.....	29
Incertitudes liées à la physique des modèles CMIP5.....	29
Comparaison des incertitudes liées à la physique des modèles et celles liées à la variabilité interne des modèles pour le modèle CNRM-CM.....	33
Résumé et conclusions.....	35
3 Résultats du modèle SURFEX en off-line.....	35
a) Climat présent.....	35
Confrontations aux observations, évaluation des forçages.....	36
Humidité du sol.....	37
GRACE.....	37
Cartes saisonnières.....	37
Confrontations des modèles aux observations de GRACE sur la période 2003-2010.....	39
Débits.....	40
Analyse des résultats sur la période 1950-2010.....	43
Sècheresses.....	44
Résumé et conclusions.....	46
b) Climat futur.....	46
Confrontations aux observations, évaluation des forçages.....	46
Humidité du sol.....	48
Débits.....	49
Analyse des résultats sur la période 1985-2100.....	50
Sècheresses.....	52
Résumé et conclusions.....	55
VI. Conclusions et perspectives.....	56
VII. Bibliographie.....	57
1 A propos de SURFEX.....	57
2 A propos des sécheresses et des ressources en eaux.....	58
3 A propos des évènements climatiques extrêmes.....	58
4 Autre.....	58
VIII. Annexes.....	59
1 Le langage NCL.....	59
2 Les modèles CMIP5.....	59
3 Les simulations off-line.....	60
a) Climat présent.....	60
b) Climat futur.....	62

II. Remerciements

Je remercie tout d'abord mes encadrants qui n'ont ménagé aucun effort pour diriger ce stage de la façon la plus parfaite possible.

A Hervé Douville, pour ses orientations, ses conseils et sa rigueur. Son accompagnement et sa disponibilité ont toujours été au rendez-vous.

A Bertrand Decharme, pour sa disponibilité, ses conseils et son expertise. Nos discussions ont su mener à bien ce travail.

A mes tuteurs ECL, Christian de Peretti et Michel Roger, qui ont en particulier réceptionné et commenté mon rapport préliminaire rédigé en début de stage.

Ma reconnaissance va également à tous les membres du groupe GMGEC pour leur sympathie et leur bonne humeur. Tous mes remerciements enfin à mes collègues de bureau, Marion et Abdel.

Merci au CNRM de m'avoir accueilli.

1 Résumé

De par leur influence sur les échanges d'eau et d'énergie entre les surfaces continentales et l'atmosphère, les processus hydrologiques continentaux jouent un rôle déterminant dans le système climatique. Dans le contexte actuel du changement climatique d'origine anthropique, l'hydrologie continentale est susceptible de connaître une évolution significative au cours des prochaines décennies, ce qui est en problème en tant que tel (risque accru de sécheresses notamment), mais peut aussi représenter une source d'amplification (rétroaction positive) des changements atmosphériques (risque accru de canicule par exemple). Aussi, en vue d'étudier les caractéristiques de cette réponse continentale, divers modèles hydrologiques ont été conçus et développés par la communauté scientifique.

Bien que régulièrement testés, ces modèles demeurent très imparfaits en raison du caractère simplifié des équations régissant les échanges d'eau et d'énergie au sein du continuum sol-neige-végétation, de leur résolution horizontale et/ou verticale limitée, ou de processus non pris en compte (rôle des aquifères par exemple). De ce fait, ces modèles contribuent aux fortes incertitudes qui pèsent aujourd'hui encore sur les scénarios hydrologiques et climatiques du 21^{ème} siècle. Le but de ce stage est de commencer à quantifier les incertitudes liées à la modélisation des surfaces continentales sur les projections hydrologiques et plus particulièrement l'évolution des risques de sécheresse. Il est aussi de relativiser cette source d'erreur au vu des incertitudes qui relèvent plus généralement de la modélisation climatique (incluant les continents, mais aussi les océans et l'atmosphère) au vu des simulations disponibles dans le cadre du projet CMIP5.

Les résultats obtenus pour quatre zones de l'hémisphère Nord montrent l'importance des incertitudes sur les projections hydrologiques (précipitations, mais plus encore humidité du sol et indice de sécheresse agronomique) liées à la physique des modèles de climat. Afin d'apprécier la possible contribution de la variabilité climatique « interne » (c'est à dire indépendamment de tout forçage) aux incertitudes mises en évidence sur la base d'une seule réalisation des modèles CMIP5, un ensemble de plusieurs projections réalisées avec le modèle CNRM-CM5 a aussi été exploité. Les résultats indiquent que la formulation des modèles est une source d'incertitude souvent beaucoup plus grande que celle liée à l'aspect chaotique du système climatique, du moins dès lors que l'on s'intéresse à un scénario pessimiste d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre et que l'on se focalise sur la fin du 21^{ème} siècle.

Le rôle des incertitudes liées à la modélisation des surfaces continentales est ensuite abordé en utilisant trois versions du modèle SURFEX du CNRM. Des simulations « off-line » (non couplées à l'atmosphère) sont d'abord pilotées par des forçages atmosphériques aussi réalistes que possible et montrent la valeur ajoutée d'une physique plus sophistiquée. Ensuite, des scénarios hydrologiques « off-line » sont produits en pilotant ces versions avec des forçages atmosphériques issus de deux modèles CMIP5 et corrigés de leur biais systématiques via une méthode classique (quantile-quantile) de calibration. Bien que ces 3 versions de SURFEX fournissent, à forçage météorologique donné, des scénarios sensiblement différents, les incertitudes liées au choix du modèle climatique « forceur » sont généralement beaucoup plus importantes (malgré la calibration). Néanmoins, une tendance robuste à l'assèchement et à l'accroissement du risque de sécheresse est simulée dans la plupart des régions (particulièrement au Sud de l'Europe), essentiellement en réponse à une raréfaction des précipitations et à une demande évaporative croissante.

III. Abstract

Because of their influence on water and energy exchanges between continental surfaces and the atmosphere, continental hydrological processes play a key role in the climate system. In the current context, which is a climate change context caused by anthropological activities, hydrologic variables may know a significant evolution during the next decades. In particular, as studied in this report, this evolution could lead to an increase in droughts and heat waves. To study the characteristics of the hydrological response, various hydrological models have been designed and developed by the scientific community.

Today, despite many hard works and observation campaigns, hydrological models have many sources of uncertainties. To improve the reliability of these models, it is therefore necessary to identify and quantify them. Obviously, the final purpose is to reduce them. In this internship, several sources of uncertainty were studied. This study was limited to the response of climate and hydrological models on four geographical zones localised in the Northern Hemisphere: Northern and Southern Europe, Western and Eastern U.S.A. The accomplished work is an introduction to a more general project, quantifying surface models uncertainties in climate models.

This report highlights the importance of uncertainties due to models physics. Through an analysis of CMIP5 models, these uncertainties are identified and quantified. A comparison between these uncertainties and those related to internal variability of climate models, showed that for the simulations studied during the internship, uncertainties due to models physics are greater than those associated with the chaotic aspects of the climate system. These conclusions are relative to some simulations, which took into account a severe greenhouse gas emission scenario, and were noted in the 21st century.

An analysis of three simulations SURFEX off-line also shows the impact of changing ISBA model physics. It is here shown that the increase of soil physics accuracy improves the quality of the results. The results in present climate show a better correlation with observations for sfxcm5 model and diffusion model, which includes a significant number of layers and solve Richards equations in their explicit form, to simulate the capillary rise. In future climate, even if surface models play a key role in some cases, in general, divergence in models seem due to CMIP5 climate models. This result has been shown by considering two forcing models, corrected by the quantil-quantil method. Even if the quantil-quantil method gave statistactory results, calibration errors, wich must be treated in the future, were noted.

The analyzes took care to put into relief trends given by the models concerning extreme weather events: droughts, phenomena related to various continental hydrology variables. According to the models, an increase in these phenomena is expected to occur in the next century in Southern Europe. This conclusion must be taken with careful precautions, as regards important model uncertainties noted in droughts studies.

IV. Contexte et prérequis

Le travail de fin d'étude a été proposé par Hervé Douville et Bertrand Decharme, tous deux chercheurs au sein de l'équipe VDR du CNRM-GAME.

1 Présentation de l'équipe VDR

Le CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques) est un des leaders mondiaux de la recherche météorologique. Associé au CNRS, il forme le laboratoire GAME (groupe d'étude de l'atmosphère météorologique). Le CNRM est également associé à Météo France, dont il coordonne et assure les activités de recherche. Les sujets de recherche de ce centre sont multiples. Ils visent aussi bien à améliorer la connaissance de l'atmosphère et de ses interfaces, qu'à rendre plus performant les modèles de simulation.

L'équipe VDR (Variabilité, détection, rétroaction) est une section du CNRM-GAME, et plus particulièrement du GMGEC (Groupe de Météorologie de Grande Échelle et Climat) dont l'objectif est d'étudier le climat et le changement climatique. Plus précisément, les objectifs de cette équipe peuvent être regroupés en cinq points :

- la participation au développement de la modélisation climatique du CNRM via l'amélioration de l'hydrologie continentale et du post-traitement
- la compréhension des biais systématiques des modèles de circulation générale atmosphérique (en premier lieu Arpège-Climat) via la mise en œuvre d'une hiérarchie de modèles ou d'une technique de guidage régional
- l'étude des mécanismes et de la prévisibilité des principaux modes de variabilité aux échelles intra-saisonnière et inter-annuelle
- la détection et l'attribution des changements climatiques (y compris à l'échelle régionale) ainsi que l'analyse de la réponse du cycle hydrologique et des événements extrêmes (dont les cyclones) dans les scénarios du GIEC.

2 Contexte du stage

Deux constats doivent être faits pour comprendre la pertinence du sujet proposé, à savoir nous le rappelons, les incertitudes concernant les réponses hydrologiques régionales dans les scénarios du GIEC..

Le premier constat concerne le réchauffement climatique actuel. De nombreux travaux scientifiques montrent en effet que la dernière décennie a été la plus chaude de ces quatre cents dernières années. Selon les spécialistes, l'augmentation de température depuis le début du siècle varie de 0.7 à 0.8°C. Si cette augmentation de moins de un degré ne paraît pas importante, un point surprenant de cette augmentation réside en sa rapidité : si la terre a déjà vécu des changements climatiques, celui que nous vivons aujourd'hui est beaucoup plus brutal que les anciens.

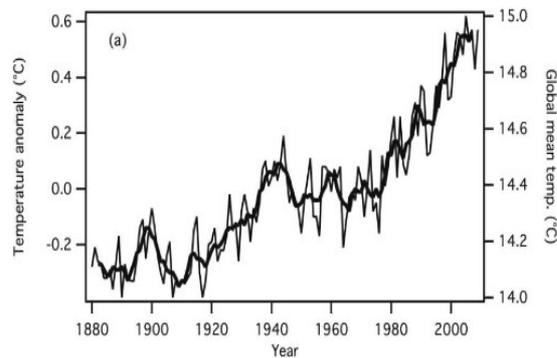


Figure 1 : Augmentation de la température moyenne et des anomalies de température (voir partie VI.2.b pour la définition d'anomalie) en °C durant ces dernières années (de 1880 à 2000)

Source : cours de gestion des ressources naturelles, P Salizzoni, ECL

Par ailleurs, de nombreux scientifiques sont convaincus que le réchauffement climatique actuel est dû aux activités humaines. Les émissions de gaz à effet de serre (GES dans la suite du rapport) ont en effet énormément augmenté ces dernières années. Or, ces gaz piégeant une partie du rayonnement infra rouge ré-émis par la terre, ils participent à son réchauffement.

Afin de montrer l'influence des hommes sur le climat, des modèles climatiques sont lancés avec des paramètres différents : certains prennent en compte les émissions anthropologiques, d'autres non. Les résultats de ces modèles sont ensuite confrontés aux observations, et des déductions concernant l'impact de l'homme sur le climat s'en suivent. Par cette méthode, les modèles tendent à montrer que l'augmentation de la quantité atmosphérique de gaz à effet de serre a un impact non négligeable sur la température moyenne de la terre. À l'évidence, ces modèles montrent que certains phénomènes comme les variations d'évaporations, ne peuvent être expliqués sans prendre en compte les activités anthropologiques ([Douville et al, 2010]).

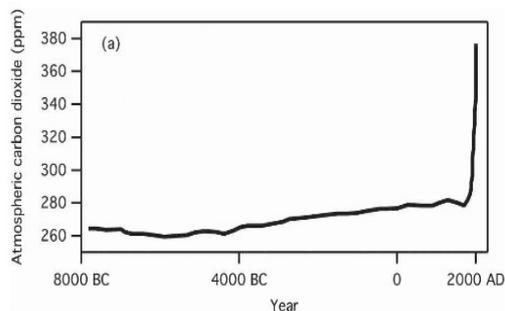


Figure 2 : Ci-dessus la courbe représentant la quantité atmosphérique de carbone dans le temps (ppm), courbe caractéristique d'une « crosse de hockey », qui illustre l'augmentation de la quantité atmosphérique de gaz à effet de serre

Source : cours de gestion des ressources naturelles, P Salizzoni, ECL

Le GIEC, Groupe d'expert intercontinental sur l'évolution du climat, a donné plusieurs scénarios concernant le réchauffement climatique actuel en fonction des niveaux d'émissions de gaz à effet de serre.

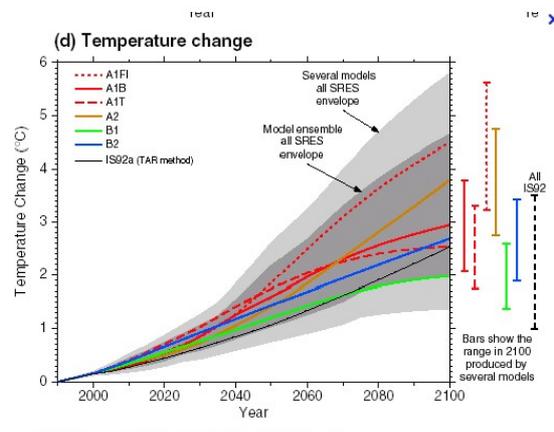


Figure 3 : Scénarios concernant le changement de température donnés par le GIEC
 Source : Rapport Assemblée Nationale (<http://www.assemblee-nationale.fr/rap-oechst/energies/r3415-11.asp>)

Les conditions de stabilité de la Terre dépendant fortement de la température, l'équilibre global de la terre est ainsi aujourd'hui modifié. De conséquents impacts météorologiques, biologiques, environnementaux et sociaux issus du réchauffement climatique actuel, seront probablement observables durant les prochaines décennies.

Le deuxième constat que nous pouvons faire concerne un phénomène qui n'est pas encore scientifiquement établi (bien que partiellement prouvé), mais dont la réalité médiatique ne fait aucun doute. Ce phénomène est l'augmentation des phénomènes naturels extrêmes, en particulier des inondations, des canicules et des sécheresses. A l'heure actuelle, les scientifiques n'ont pas toutes les informations pour conclure quant à la réalité de cette augmentation. En effet, contrairement à la température, qui est un champ physique pouvant être mesuré à tous temps de l'année, ces phénomènes sont ponctuels. Aussi, les données de ces événements durant les dernières années sont difficilement quantifiables. Toutefois, malgré des preuves scientifiques encore tangibles, on observe aujourd'hui une répétition d'événements climatiques extrêmes. Par exemple, les vagues de chaleurs de 2003 en France et 2010 en Russie ; les inondations dans le Var début 2014, celles dans la région toulousaine en juin 2014.

De ces deux constats qui viennent d'être présentés, une relation, entre réchauffement climatique et phénomènes extrêmes, commence à voir le jour dans la communauté scientifique. Elle n'est cependant pas encore approuvée à l'unanimité. Il est néanmoins nécessaire, étant données les connaissances actuelles sur le réchauffement climatique et les prévisions faites par le GIEC, d'estimer la fréquence et l'intensité future des événements climatiques extrêmes, afin d'en prévenir les dégâts.

Le sujet du stage, comme nous l'avons annoncé, concerne les incertitudes sur les réponses hydrologiques régionales dans les scénarios du GIEC. L'hydrologie est, comme nous le détaillerons dans la prochaine partie, l'étude des eaux continentales ainsi que celle des bilans hydrologiques globaux. L'eau et son cycle étant des paramètres déterminants du système climatique, l'hydrologie est en rapport direct avec les changements climatiques et les événements climatiques extrêmes dont nous avons parlé. Le stage s'inscrit donc bien dans le contexte scientifique et climatique précédemment exposé.

3 Hydrologie, généralités et présentation des modèles de surface continentale

a) Introduction

L'eau est sur Terre la source de toute vie. Sa consommation directe (hydratation physiologique) et son utilisation pour les besoins hygiéniques sont indispensables à la vie et la santé humaine. L'eau est ainsi une ressource naturelle d'intérêt majeur. Aussi, du fait de l'augmentation actuelle de la population ainsi que des conséquences hydriques du changement climatique, la gestion de cette ressource primordiale pourrait être durant le siècle prochain à l'origine de conflits majeurs.

Sur Terre, l'eau est présente sous trois états (solide, liquide et gazeux). L'eau réside sur Terre au sein de trois réservoirs que constitue l'hydrosphère : les océans, l'atmosphère et les surfaces continentales. La majeure partie de l'eau terrestre est stockée dans les océans, sous forme d'eau salée. L'eau douce est elle principalement stockée dans les glaciers et les réservoirs souterrains.

L'hydrologie réside en l'étude des propriétés de l'eau, de son occurrence et de ses mouvements au sein de l'hydrosphère, ainsi que de ses relations avec la vie et l'environnement.

Un concept central de l'hydrologie est le cycle de l'eau. Celui ci exprime que sous l'effet du rayonnement solaire, de la gravité et du relief, l'eau connaît des phases de stockage (infiltration dans le sol, interception par la végétation, stockage à l'état de neige...), de transport (ruissellement de surface dans les rivières, ruissellement profond dans les nappes souterraines...) et de changement d'état (évaporation, condensation...). Ce cycle est évidemment continu et infini.

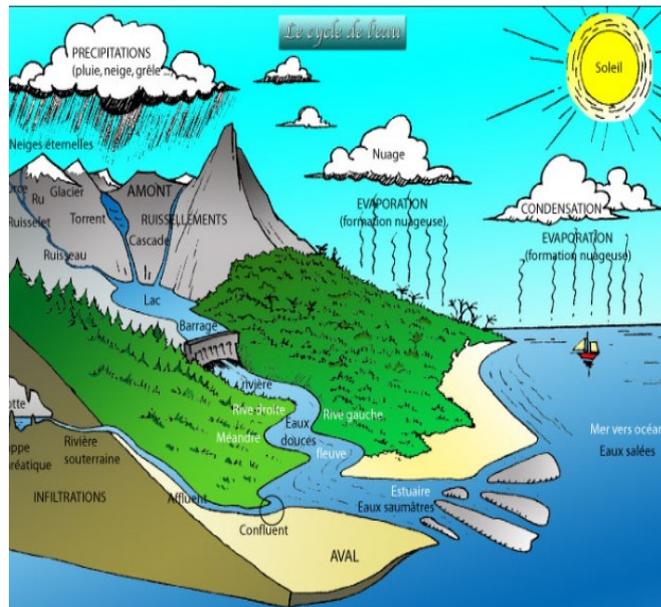


Figure 4 : Schéma du cycle de l'eau avec ses principaux phénomènes (évaporation, infiltration, condensation, précipitation, ruissellement) et les principales entités qu'il fait intervenir (le soleil, la végétation, l'homme, la topographie, le sol)

En résumé, comme le montre le schéma ci dessus, l'eau atmosphérique évaporée à partir des surfaces continentales et des océans est rendue aux continents par le biais des précipitations. Elle peut y être alors stockée temporairement, s'évaporer à nouveau ou ruisseler (éventuellement jusqu'à l'océan).

De part ses multiples échanges énergétiques avec son environnement, l'eau joue un rôle déterminant dans l'équilibre énergétique de la Terre.

En outre, ses interactions avec plusieurs entités météorologiques (atmosphère, sol, végétation, biosphère...), font d'elle même une variable climatique majeure. Comme brièvement souligné dans le contexte, l'étude de l'actuel changement climatique va ainsi de pair avec l'étude de l'hydrologie.

D'un point de vu plus pratique et concret, de part son essence, l'hydrologie permet par ailleurs de prévenir et se prémunir contre des phénomènes climatiques extrêmes, tels que les les sécheresses. Par ailleurs, comme mentionné plus haut, l'eau et sa distribution ayant un intérêt vital, hygiénique et politique majeur, la modélisation des mécanismes régissant le stockage et l'écoulement de l'eau est des plus pertinente.

b) Hydrologie, généralités

Divers phénomènes interviennent dans l'étude de l'hydrologie. Quelques uns vont être rapidement présentés dans ce qui suit. Ces phénomènes interviennent dans l'équation dit du bilan d'eau, équation fondamentale à l'étude de l'évolution des variables hydrologiques.

Bilan d'eau

Le bilan d'eau est un système d'équation à la base d'un grand nombre de modèle hydrologique. Il fait intervenir différents phénomènes hydrologiques (dont les principaux seront présentés dans les prochains paragraphes). Une première équation de ce dit bilan traduit que la différence entre les flux entrant et sortant d'un système hydrologique est égal à la variation du volume d'eau (W) contenu dans ce système au cours d'une certaine période :

$$DW/dt = Q_e - Q_{out} \quad (1)$$

La deuxième équation du bilan d'eau exprime que l'eau stockée sur les continents résulte de l'apport d'eau par les précipitations P, minorée par l'eau qui ruisselle jusqu'aux océan ainsi que celle qui s'évapore à nouveau :

$$dW/dt = P - Q_s - Q_g - ET \quad (2)$$

Avec Q_s et Q_g respectivement les débits surfaciques et profonds (on a $R_{tot} = Q_s + Q_g$), ET l'évapotranspiration qui est présentée ci-après.

Principaux phénomènes du bilan d'eau

Évapotranspiration

L'évapotranspiration désigne le regroupement de plusieurs phénomènes naturels faisant passer l'eau de l'état liquide à l'état gazeux. Elle résulte en effet de l'évaporation de l'eau sur le sol nu, de l'évapotranspiration de la végétation, c'est à dire de l'eau qui a été interceptée par la végétation et qui s'évapore (ce mécanisme d'évaporation est très efficace), ainsi que de la sublimation de la neige et de la glace.

$$E = E_{sol} + E_{veg} + E_{ice} + E_{snow} \quad (3)$$

Infiltration dans les sols poreux

Lorsqu'elle se trouve à la surface des continents, l'eau liquide peut pénétrer dans le sol : c'est l'infiltration. La pénétration de l'eau dans le sol étant gouvernée par les interactions électromagnétiques existantes entre l'eau et les constituants du sol, l'infiltration dépend de la nature et des propriétés physico-chimiques du sol.

La porosité d'un milieu est donnée par :

$$p = \frac{\text{Volumen des espaces vides du sol}}{\text{Volume total du sol}} \quad (4)$$

En milieu poreux comme nous l'avons dit, l'eau s'infiltré, c'est à dire qu'elle va occuper des sites vides du sol. On peut alors définir l'humidité du sol par :

$$w (m^3/m^3) = \frac{\text{Volume d'eau dans sol}}{\text{Volume total du sol}} \quad (5)$$

Lorsque tous les vides du sol sont gorgés d'eau, le sol est saturé en eau. Ainsi, Chaque sol a un contenu volumique en eau maximal ; ce contenu est dit de saturation, et noté w_{sat} . L'infiltration ne peut se produire que si le sol n'est pas saturé en eau. L'infiltration de l'eau dans le sol dépend donc de la quantité d'eau déjà présente dans le sol en question. A l'inverse, on définit également un point dit de flétrissement pour tous les sol, correspondant à une humidité en dessous de laquelle la végétation ne peut survivre (la végétation devient incapable de prélever le peu d'eau présente dans le sol).

Des équations régissant l'infiltration de l'eau, permettent d'en suivre l'évolution dans le sol. Elles sont, comme nous le verrons par la suite, à la base des modèles de surface continentale. L'écoulement de l'eau dans un milieu poreux se fait des régions les plus humides vers les zones les moins humides. Il est donc du à un gradient hydraulique. L'équation régissant ce phénomène est l'équation de Darcy :

$$\vec{V} = k(w) \vec{grad} H \quad (6)$$

avec V la vitesse d'écoulement, H le potentiel hydraulique et $k(w)$ (m/s) la perméabilité du milieu, qui en milieu non saturée dépend de l'humidité w .

L'équation de Darcy complétée par l'équation de la conservation de la masse mène aux équations de Richard, équations gouvernant l'évolution de l'eau dans un milieu poreux. Les équations de Richards sont les suivantes :

$$\frac{\partial(w)}{\partial(t)} = -\frac{\partial}{\partial(z)} \left[k \times \left(\frac{\partial(\psi)}{\partial(z)} + 1 \right) \right] \quad (7)$$

où Ψ est le potentiel hydrique du sol.

Drainage

Par gravité, une partie (celle qui n'est ni captée par la végétation ni directement stockée dans la terre) de l'eau infiltrée rejoint des réservoirs d'eau souterrains. L'eau contenue dans ces réservoirs sort ensuite au niveau des sources ou peut parfois (dans le cas où les réservoirs sont peu profond) remonter à la surface ; ce dernier phénomène est nommé remontée capillaire. Les réservoirs souterrains jouent un rôle important dans la régulation des fleuves en tant de sécheresse.

Ruissellement de surface

Si une partie des eaux continentales s'infiltré dans le sol, le sol ayant une certaine valeur de saturation au dessus de laquelle il ne peut plus absorber d'eau, une autre partie va, sous l'influence du relief, ruisseler.

On appelle ruissellement total la somme du ruissellement de surface et du ruissellement issu du drainage.

Échelles

Une unité fondamentale de l'hydrologie est le bassin versant. Le bassin versant est un système hydrologique au sein duquel l'eau s'écoule vers une même rivière, un même lac ou un même océan. Les bassins versants sont caractérisés en aval par leur exutoire et en amont par une ligne de partage des eaux. En résumé, toute l'eau tombée dans un bassin versant, bassin délimité par des lignes de partage des eaux, alimente un même exutoire (lac, océan...).

A partir du bassin versant, une échelle globale (c'est à dire une échelle relative à la totalité de la Terre) peut être envisagée. Cela se fait en prenant la masse d'eau sur chaque continent. Une démarche de modélisation hydrologique classique est ainsi d'étudier un phénomène hydrologique sur un bassin versant, d'y valider un modèle, puis de confronter ce modèle au niveau global.

Afin d'étudier l'hydrologie continentale, des modèles existants permettent de simuler les bilans d'eau et les écoulements surfaciques. Les principaux phénomènes hydrologiques ayant été présentés, il convient désormais d'introduire quelques uns des modèles hydrologiques développés par le CNRM.

c)Présentation des modèles utilisés

Le but de cette partie est d'introduire et présenter la plateforme de modélisation SURFEX, plateforme développée et utilisée par l'équipe VDR. Les modèles ISBA et TRIP, modèles tous deux utilisés dans la suite du projet, sont en particulier détaillés. Enfin, du vocabulaire spécifique aux modèles utilisés par la suite (principe de spin up, de forçage...), est également présenté dans cette partie. Ce vocabulaire sera indispensable pour la compréhension globale du présent TFE.

La plateforme SURFEX

Présentation

SURFEX est une plateforme de modélisation des surfaces naturelles, citadines, eaux continentales et océans, permettant de simuler les différents flux physiques à la surface de la terre (flux d'eau, de gaz à effet de serre, d'aérosol...). Il inclut des modèles indépendants comme le modèle ISBA, qui sera présenté dans le prochain paragraphe. Les processus physiques modélisés, comprenant les interactions entre le sol et l'atmosphère, la photosynthèse, la respiration végétale, les phénomènes intervenant dans la couche limite atmosphérique, ceux intervenant à la surface des océans et divers cours d'eau, sont divers et variés. Ils permettent d'obtenir des résultats sur des variables comme le contenu en eau du sol, le drainage ou le ruissellement.

La plateforme SURFEX a été développée afin de mettre à disposition de la recherche du CNRM un ensemble de modèles de surface. Elle est utilisée pour modéliser l'ensemble des surfaces continentales dans des modèles climatiques couplés (voir vocabulaire, paragraphe suivant) et permet ainsi d'évaluer les rétroactions de ces surfaces sur l'atmosphère.

Les modèles ISBA et TRIP

Le modèle ISBA

ISBA est un modèle de surface (un Land Surface Model, LSM), permettant de simuler les écoulements d'eaux surfaciques. Historiquement, les modèles de surface ont été introduits pour fournir des rétroactions réalistes aux modèles atmosphériques en terme d'humidité et d'énergie. En effet, les variables atmosphériques comme les précipitations ou la température influencent les variables de surfaces qui, à leur tour, de part les phénomènes hydrologiques que nous avons présentés plus haut, vont avoir un impact sur les variables atmosphériques. On comprend ainsi l'importance des modèles de surface dans les études de prévision atmosphérique aux différentes échelles de temps (courte échéance, saisonnière ou multi-décennale).

De façon générale, le modèle ISBA prend en compte différents phénomènes physiques, dont les équations lui ont été intégrées. Ces équations, complexes et nombreuses, ne sont pas présentées ici. Le lecteur intéressé pourra se référer à [Le Moigne et al, 2012], chapitre 4, soil and vegetation.

Du reste, ces phénomènes sont :

- le bilan d'eau : équation générale qui a déjà été présentée (équations 1 et 2 de la partie précédente).
- la canopée : étage supérieur de la forêt, directement influencée par le rayonnement solaire, qui retient une partie des précipitations (aussi est-elle modélisée comme un réservoir d'eau) et interagit avec l'écoulement de l'eau (pratiquement, la rugosité de la surface sur laquelle l'eau coule est modifiée par la canopée)
- la neige : un bilan est effectué sur la neige, la variation de la quantité de neige étant égale aux chutes de neiges minorées de la neige fondue et sublimée. Le bilan de la neige dépend de la température en surface. Le rayonnement solaire et la végétation (qui joue un rôle de masque) influence aussi ce bilan.
- L'évapotranspiration : phénomène physique présenté plus haut exprimant le passage de l'eau liquide à l'état de vapeur. Globalement, l'évapotranspiration dépend de la différence d'humidité entre l'air et la végétation (ou le sol). En fonction, il peut y avoir soit évaporation soit rosée.

Plusieurs versions de ISBA sont disponibles. Dans le cadre du stage, les différences entre les versions ont concerné deux aspects : l'hydrologie sous maille et la résolution des équations de Richards. Ces deux aspects sont présentés ici :

L'hydrologie sous-maille est la prise en compte de phénomènes hydrologiques intervenant au sein d'une maille. En effet, le maillage d'un domaine étant grossier, il existe au sein d'une maille des disparités engendrant des phénomènes hydrologiques importants. Ces disparités concernent principalement la topographie (le relief engendre ainsi un certain ruissellement au sein de la maille), la végétation (qui, hétérogène au sein d'une maille, est un facteur déterminant dans le bilan d'eau et d'énergie), la capacité d'infiltration (celle ci dépend de la nature du sol, hétérogène pour une maille donnée) et la variabilité des précipitations au sein d'une maille (dans un schéma ne prenant pas en compte l'hydrologie sous maille, les précipitations sont supposées uniformes sur toute la maille, ce qui ne se vérifie pas dans les

observations). On dit ainsi qu'un schéma prend en compte l'hydrologie sous maille lorsque les disparités précédemment exposées sont traitées par le dit schéma.

Aussi, pour les versions d'ISBA prenant en compte l'hydrologie sous mailles, un certain ruissellement de surface est pris en compte. Le ruissellement modélisé est le ruissellement dit *ruissellement de Dunne*. Ce ruissellement se constate lorsque l'eau tombe sur une fraction de sol qui est saturée en eau ; ne pouvant s'infiltrer, cette eau va alors ruisseler. Le ruissellement de Dunne intervient dans les zones humides, comportant une végétation abondante ou plus généralement un sol poreux (ce qui va permettre à l'eau de facilement s'infiltrer). D'autres ruissellements, comme le *ruissellement de Horton* existent aussi et sont pris en compte dans les versions d'ISBA incluant une hydrologie sous-maille. Le ruissellement de Horton intervient lorsque l'intensité des précipitations excède la capacité d'infiltration maximale ; l'eau arrivant sur un sol non saturé en eau n'a pas le temps de s'infiltrer et ruisselle. Ce mécanisme est dominant dans les zones arides, désertiques, ou plus généralement dans les sols peu poreux. Il a été montré que le ruissellement de Dunne est déterminant pour la validité des modèles hydrologique ([Decharme et al, 2006]).

Par ailleurs, selon les versions d'ISBA, la physique du sol qui, nous le rappelons, est liée à des phénomènes tels que la diffusion de l'eau dans le sol, le drainage et le gel, est abordée de manière différente. En effet, comme introduit dans le paragraphe traitant de l'infiltration en milieu poreux, les transferts hydriques du sol sont gouvernés par les équations de Richards (voir équation 7 de la présente partie). Or, si dans les versions les plus sophistiquées d'ISBA, ces équations sont résolues de manière explicite, il existe également une deuxième version des équations de Richard, dite version paramétrée, qui est un système d'équations paramétriques issues de ces dernières. La version paramétrée des équations de Richard est la suivante :

$$\frac{\partial(w1)}{\partial(t)} = \frac{1}{\rho w \times d1} \times [C1 \times (Ir - Esoil) - F1, w] - D1 \quad (8a)$$

$$\frac{\partial(w2)}{\partial(t)} = \frac{1}{\rho w \times d2} \times [Ir - Esoil - Etransp - F2, w] - K2 - D2 \quad (8b)$$

$$\frac{\partial(w3)}{\partial(t)} = \frac{d2}{d3 - d2} \times [K2 + D2] - K3 \quad (8c)$$

Où les coefficients C1, Fi,w, Ki, Di sont des paramètres calculés en résolvant les équations de Richards dans des cas idéaux. Ir est l'infiltration réelle. di est la profondeur de la couche i. Le sol est ici modélisé par 3 couches ; pour les versions d'ISBA ne prenant en compte que 2 couches, le précédent système se réduit à deux équations.

Ainsi, selon les modèles de surface, les équations de Richards sont résolues soit sous leur forme explicite, soit sous leur forme paramétrique. Les modèles résolvant explicitement les équations de Richards sont de physique plus sophistiquée que les autres, étant donné qu'ils simulent l'ensemble des phénomènes hydrologiques se déroulant dans le sol. Les modèles résolvant les équations de Richards paramétriques ont par rapport aux premiers une physique du sol approximative.

Dans le corps du rapport, sur les trois simulations SURFEX étudiées, les deux premières résoudre les équations paramétriques des équations de Richards ; la dernière, dite de diffusion, résoudra explicitement les équations de Richards.

En conclusion, les différentes versions du modèle ISBA modélisent les transferts d'eau et d'énergie entre l'atmosphère et les surfaces continentales. Ce logiciel représente donc les transports verticaux de l'eau dans le sol.

Afin de simuler les transports horizontaux, c'est à dire de transférer le ruissellement total simulé par ISBA, il est nécessaire de coupler ISBA avec un autre modèle. Cela peut être fait avec divers modèles, comme par exemple TRIP (Total Runoff Integrating Pathways).

Le modèle TRIP

TRIP est un modèle RRM (River Routing Model) ; comme son nom l'indique, c'est un modèle simulant le ruissellement de l'eau.

C'est un type de RRM des plus simples, dont la première version (utilisée pendant le stage) considère en particulier la vitesse d'écoulement du débit constante, prise à 0,5m/s.

Le débit lui, est supposé proportionnel à la surface. On considère en effet :

$$Q = vS/L \quad (9)$$

La topographie influençant la direction d'écoulement, elle, est nécessairement prise en compte sous TRIP. Certaines versions de TRIP intègrent en outre un schéma d'aquifère et/ou un schéma des zones inondables.

En pratique, le modèle TRIP renvoie pour un système (de niveau global ou régional) donnée la largeur et la profondeur des cours d'eau ruisselant dans le dit système.

Le principe du couplage des modèles ISBA et TRIP est représenté ci dessous :

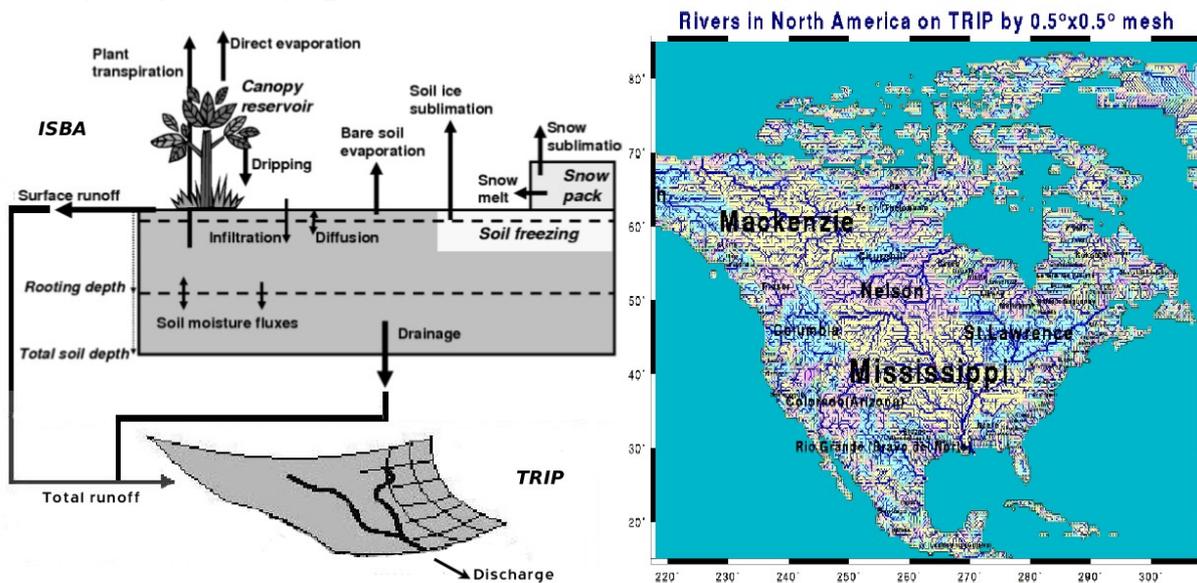


Figure 5 : représentation du modèle hydrologique ISBA-TRIP. Ici, la modélisation du sol comprend trois couches : une couche de surface, une couche racinaire et une couche profonde. Les transferts d'eau entre ces trois couches sont calculés par le logiciel. L'évaporation et la transpiration des plantes sont aussi simulées. TRIP convertit le

ruissellement total simulé par ISBA en débit. A droite est représenté le réseau de routage des USA, à une précision de 0,5°.

Vocabulaire relatif aux modèles

Forçage

Un point important des modèles utilisés concerne les forçages. Un forçage est un ensemble de caractéristiques physiques et météorologiques, servant de paramètres d'entrées aux modèles physiques considérés. On parle entre autres de forçages radiatifs, volcaniques, anthropiques. Les simulations sur ISBA par exemple, sont pour chaque étude réalisées avec un forçage bien défini.

Les forçages utilisent soit les résultats d'autres modèles soit diverses bases de données. Ces derniers ont souvent été sujet à une ré-analyse des données et une correction des biais.

Une caractéristique centrale des simulations et de leur forçage réside en leur caractère forcées ou couplées. Bien que ce qui suit ne traduise pas avec précision les caractéristiques générales du caractère forcées ou couplées des simulations, l'explication apportée sera suffisante pour le cadre du stage : une simulation est dite en off-line lorsque ses résultats n'influencent pas son forçage ; elle est dite couplée lorsque la rétroaction du modèle sur les variables de son forçage est prise en compte. Pour un modèle de surface par exemple, la connaissance des variables atmosphériques, comme les précipitations, est nécessaire pour le fonctionnement du modèle. Or comme nous l'avons vu, de part les échanges d'eau et d'énergie s'effectuant entre les surfaces continentales et l'atmosphère, il s'avère que les surfaces continentales exercent une certaine rétroaction sur l'atmosphère. Si cette rétroaction est prise en compte dans les variables du forçage, la simulation est dite couplée ; dans le cas contraire, elle est dite forcée ou off-line.

Spin up

Lorsqu'un modèle est lancé, ses paramètres mettent un certain temps à atteindre leur équilibre. Le spin up correspond à une durée sur laquelle cet équilibre sera atteint. Fondamentalement, cet équilibre est supposé exister ; pour cela, certains paramètres chaotiques (turbulence par exemple) ne sont pas pris en compte dans les modèles.

4 Sécheresse

a) Généralités

Une sécheresse correspond à une période durant laquelle l'humidité du sol est anormalement basse. Contrairement à certaines zones arides, pour lesquelles on ne peut parler de sécheresse, une sécheresse est relative à un événement climatique temporaire.

La durée d'une sécheresse peut varier de quelques mois à plusieurs années ; son étendue géographique peut être localisée à l'échelle d'une région ou couvrir un continent entier (cf Dust Bowl drought aux USA, dans les années 1930).

Il est distingué dans la littérature 3 types de sécheresse :

- Les sécheresses météorologiques : elles sont caractérisées par un faible niveau de précipitation et des températures supérieures à la normale. Ce type de sécheresse peut en provoquer d'autres. Elles sont dues à des anomalies touchant la circulation atmosphérique (par exemple, zone d'anticyclone).
- Les sécheresses agricoles : caractérisées par des sols secs témoignant d'un déficit de précipitation ou d'un surcroît d'évaporation. Ces attributs tendent à inhiber la croissance des cultures et de la végétation.
- Les sécheresses hydrologiques : Elles surviennent lorsque le niveau des cours d'eau ou des réservoirs d'eau tombe en dessous d'un certain seuil. Ces sécheresses mettent un temps plus long à se développer, étant donné qu'un certain temps est nécessaire pour que les réservoirs d'eau se vident.

Un facteur déterminant dans l'aridité et l'état de sécheresse d'une région est la quantité et la répartition des précipitations. Un autre est le niveau d'évaporation. Plus précisément, une sécheresse correspond à un déséquilibre entre l'apport en eau (principalement les précipitations), qui dépend principalement des processus atmosphériques, et l'évaporation, qui dépend en particulier des radiations reçues, des phénomènes surfaciques et du vent. Aussi, comme nous le verrons dans la présentation des indices de sécheresse, par analogie, des modèles d'offre et de demande en eau ont été conçus pour étudier ces phénomènes ([Dai et al,2010]).

b) Indices des sécheresses

Les sécheresses et leurs occurrences sont mesurées et analysées à l'aide d'indices. En particulier, le PDSI (Palmer drought severity index), est un indice abondamment utilisé aux États-Unis. Le PDSI est basé sur un modèle d'offre et de demande de l'eau. De manière basique, à partir de données sur les précipitations et l'évaporation ainsi que d'un modèle d'humidité du sol, le PDSI fournit une mesure de la sécheresse. Cette mesure va de -10 (extrêmement sec) à +10 (extrêmement humide). Au fil des années, des variantes de cet indice ont été développées par les spécialistes (le self calibrating PDSI, sc_PDSI, par exemple).

Un des problèmes importants du PDSI réside en l'évapotranspiration. En effet, étant donné que sa valeur exacte ne peut être directement mesurée, le modèle calcule une certaine valeur d'évapotranspiration, dite évapotranspiration potentielle (EP), qui est une source d'incertitude pour cet indice.

Les indices de sécheresse font d'ailleurs de nos jours l'objet de controverses scientifiques. Il semble en effet que ces indices ne soient pas toujours suffisants pour tirer des conclusions satisfaisantes concernant les sécheresses. Certaines publications([Joetzjer et al]), montrent l'intérêt et la pertinence de rechercher des informations supplémentaires à ces indices, informations données en particulier par les modèles hydrologiques.

c) Caractéristiques des sécheresses

Une sécheresse est principalement caractérisée par son intensité, sa durée et sa surface concernée (spacial coverage). Pour définir ces trois variables, introduisons d'abord la variable $q(\theta)$, qui correspond à la valeur du quantile 5 de l'humidité dans le sol (quantile pris sur la série statistique temporelle, sur la maille i , θ étant une variable d'espace repérant les différentes mailles d'une région). On fixe par ailleurs $q_0(\theta)$, un seuil pour lequel si $q(\theta)$ se trouve en dessous de ce seuil, la région associée est déclarée en sécheresse. La manière dont ce seuil est fixé ne sera pas discutée ici. Pour plus d'informations, le lecteur intéressé pourra se référer à Sheffield and Wood, 2007)

On peut alors définir l'intensité d'une sécheresse par :

$$I = \frac{1}{D} * \sum_t^{t+D-1} q_0(\theta) - q(\theta) \quad (1)$$

Où D est la durée de la sécheresse

La sévérité par :

$$S = I * D \quad (2)$$

Et la surface concernée par :

$$A = \frac{\sum_1^N A(i)(q(\theta) \leq q_0(\theta))}{\sum_1^N A(i)} \quad (3)$$

Avec $A(i)$ l'aire de la maille i .

d) Sécheresses et changement climatique

De nos jours, un aspect important de l'étude des sécheresses consiste à étudier la réponse de ces phénomènes à l'actuel changement climatique. En effet, le climat et ses extrêmes répondant à différents forçages, les changements climatiques actuels risquent d'influencer le cycle de l'eau et par répercussions les phénomènes climatiques extrêmes tels que les sécheresses. Un des effets liant sécheresse et changement climatique consiste à remarquer que la température augmentant, l'air pourra dans le futur stocker davantage d'humidité. En effet, selon la loi de Clausius-Clapeyron :

$$es = es_0 \exp\left(\frac{L}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (4)$$

Avec es la pression de vapeur saturante, es_0 et T_0 les pression des vapeur saturante et température aux conditions standards.

Cette relation détermine le point de condensation de l'eau ou point de rosée : la condensation de la vapeur d'eau s'effectue lorsque :

$$e > e_s \quad (5)$$

La relation de Clausius-Clapeyron montre que si la température augmente, comme cela est prévu par les modèles climatiques, la pression de vapeur saturante augmente, donc d'après la condition précédemment citée, la condensation est retardée. Pour donner un ordre de grandeur, toute augmentation de la température de 1°C conduit à une augmentation de l'humidité de 7 %. Ce processus, non négligeable, affectera ainsi les niveaux de précipitations, le cycle hydrologique, donc l'offre en eau, par suite les sécheresses à venir.

Si à l'échelle globale, le changement climatique risque d'augmenter l'évaporation et les précipitations, à l'échelle régionale, de nombreux travaux portant sur les sécheresses, s'appuyant sur des modèles hydrologiques et les scénarios du GIEC, prévoient une diminution de l'humidité du sol, et une augmentation de ces phénomènes dans les prochaines années ([Sheffield et al, 2008]). Ceci étant, la forte variabilité du climat rend pour l'instant difficile la mise en évidence de cette augmentation.

e) Enjeux

D'un point de vue causal et sociétal, les sécheresses sont des événements climatiques extrêmes ayant des impacts importants sur les écosystèmes, nos agricultures, ressources en eau et sociétés. Elles causes des dégâts économiques majeurs et peuvent menacer la santé et le bien être des hommes ([Norwegian meteorological institute, 2013]). La lutte et la protection face aux sécheresses est de niveau différent selon les régions, témoignant des fortes inégalités économiques et technologiques mondiales. Un fermier africain en effet, n'a pas les mêmes moyens d'organiser des réserves d'eau qu'une grande compagnie agricole.

La mise en place de cellules scientifiques spécifiques à ces phénomènes, permet d'en étudier les caractéristiques et d'en anticiper les dégâts.

5 Autres événements climatiques extrêmes

Comme cela est montré dans la littérature associée, l'homme a par ses activités dérégulé le cycle hydrologique. Il s'ensuit de ce dérèglement de multiples variations concernant en particulier le niveau de précipitation et les événements extrêmes, tels les inondations, les canicules et les sécheresses, qui ont été abordées au paragraphe précédent ou les cyclones ([Trenberth, 2011]).

Les mécanismes liant les événements climatiques extrêmes au changement climatique ont été mis en évidence. Comme expliqué plus haut, le changement climatique conduit à une augmentation de l'humidité de l'air. Ce phénomène augmente en particulier les phénomènes climatiques extrêmes. En effet, les événements pluvieux (pluie, orages...) disposant de plus de ressources en eau, seront plus intenses. Comme le prévoient les modèles, les précipitations risquent de devenir plus rares et plus violentes (syndrome appelé le « it never rains, it pours »)

([Trenberth, 2011]). Par ailleurs, L'eau tombant au sol n'ayant le temps de s'infiltrer, cela conduit à des inondations. Le sol n'ayant le temps de se gorger d'eau, les risques de sécheresse seront accrues par ce mécanisme.

Ainsi, De même que pour les sécheresses, une augmentation des phénomènes climatiques extrêmes est attendue pour les prochaines années. Plus précisément, il semble que les zones arides deviendront plus arides, et les zones humides plus humides.

V. Corps du rapport

1 Introduction et objectifs

a) Incertitudes dans les projections climatiques globales

Comme l'illustrent les simulations en climat présent (c'est à dire que l'on simule le climat sur une période antérieure à l'instant présent), les résultats fournis par un modèle climatique ne sont pas totalement fiables. Il existe en effet des différences entre le climat observé et celui rendu par les modèles. Cela pose donc problème pour établir des projections réalistes pour le futur.

Le fait qu'il existe des divergences entre les sorties de modèle et la réalité est appelé une incertitude. L'objectif du stage est, dans un contexte précis que nous expliciterons plus tard, d'étudier certaines sources d'incertitude, c'est-à-dire certaines causes qui éloignent les résultats des modèles de la réalité.

Il existe différentes sources d'incertitudes. Par exemple :

- Les forçages externes : différents phénomènes, comme une soudaine éruption volcanique ou une évolution non prévue des activités humaines, peuvent modifier le climat réel. Or, n'étant pas pris en compte dans les forçages appliqués aux modèles, ils peuvent par suite expliquer les incertitudes obtenues. En particulier, les incertitudes anthropiques liées aux émissions humaines sont soigneusement étudiées par la communauté scientifique.
- La variabilité interne des modèles : Le climat est un système chaotique, ce qui signifie que son évolution dépend de façon critique des conditions initiales. Ainsi, une légère erreur dans les conditions initiales peut faire dériver le modèle de la réalité.
- La physique des modèles : Le climat est un système faisant intervenir différents phénomènes physiques. Sa modélisation passe donc par la modélisation de ces phénomènes. Or, plusieurs problèmes se posent : Connait-on tous les phénomènes physiques influençant le climat ? Des phénomènes physiques influençant le climat, lesquels sont prépondérants (la question par exemple se pose pour le rôle joué par les strates des végétaux ou du permafrost) ? Des phénomènes météorologiques considérés, la modélisation faite est-elle fiable, les approximations raisonnables ? Ainsi, les différents modèles climatiques actuellement utilisés prennent en compte différents phénomènes physiques, qu'ils modélisent d'une façon particulière. Selon la manière dont sont modélisés ces phénomènes, les résultats rendus par les modèles sont distincts. C'est en particulier le cas pour la modélisation des phénomènes liés à la

physique des nuages : selon le modèle utilisé pour simuler la formation des nuages, les résultats du modèle sont très différents. Les problèmes précédemment cités font ainsi de la physique des modèles une incertitude.

La communauté scientifique regroupe plus généralement les sources d'incertitudes dans la pyramide suivante :

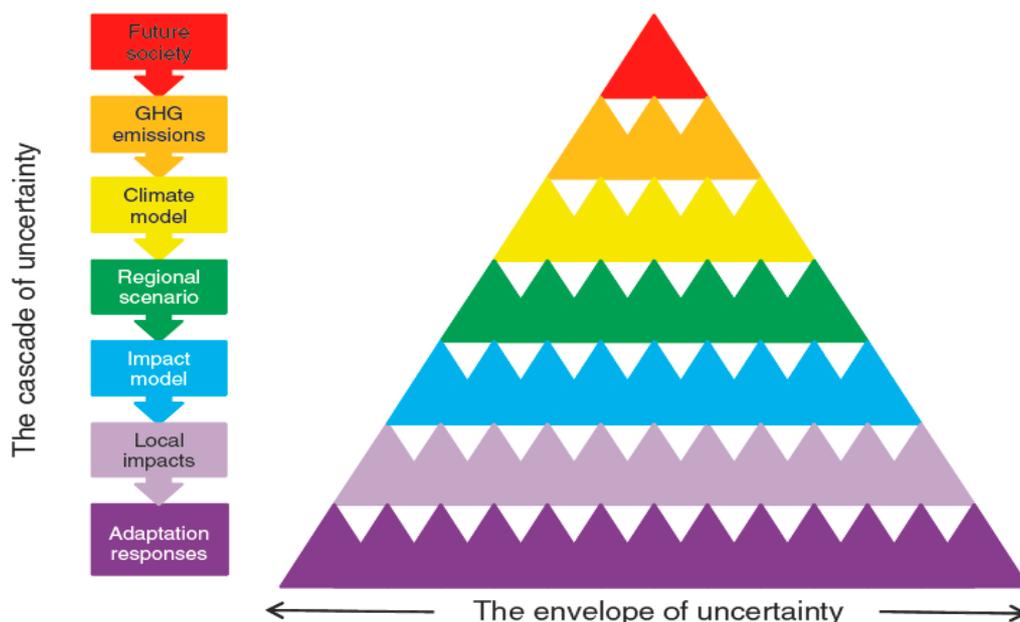


Figure 1 : Pyramide d'incertitude pour les modèles climatiques. Les trois points détaillés plus haut se situent en haut de la pyramide (forçages anthropiques) et au niveau des modèles de climat (physique des modèles).

Les sources d'incertitude ayant des répercussions différentes sur les modèles, un travail nécessaire est de les étudier et d'évaluer leurs impacts relatifs. L'objectif est à terme de les réduire. Compte tenu du contexte de changement climatique, dans lequel il est attendu que les modèles fournissent des projections climatiques fiables, ce travail est des plus préoccupants.

Dans ce stage, nous nous sommes limités à l'étude des incertitudes liées à la physique des modèles de surface. Les autres sources d'incertitude ont toutefois été citées, par exemple lors de l'étude des modèles CMIP5, où les incertitudes liées à la variabilité interne du climat ont été comparées aux incertitudes touchant les modèles.

b) Les modèles CMIP5 et les simulations SURFEX

L'objet de cette partie est de rapidement présenter les deux grands volées de simulations qui seront ensuite étudiées dans le rapport.

Les modèles CMIP5

Dans l'introduction, nous avons pris soin de décrire la plateforme SURFEX, développée par le CNRM. Couplant cette plateforme au modèle climatique ARPEGE (également

développé par le CNRM), le CNRM a développé un modèle climatique couplé, nommé CNRM-CM, qui permet de suivre sur une période de temps donnée l'évolution de diverses variables climatiques. Ce modèle fait parti du projet CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5).

CMIP5 est un projet rassemblant une vingtaine de laboratoire qui, comme le CNRM, possèdent chacun un modèle climatique couplé. Le but du projet CMIP5 est d'étudier les différences inter modèles et en déduire des projections quant au climat futur.

Comme nous l'avons dit, dans l'étude de l'actuel changement climatique, le GIEC a défini différents scénarios concernant les émissions anthropiques. Ces scénarios sont plus ou moins sévères, c'est à dire qu'ils prévoient une quantité plus ou moins importante d'émission de GES. Le scénario le plus sévère par exemple, le scénario RCP 8.5 prévoit une concentration de GES équivalent à un forçage radiatif supérieur à $8,5\text{W/m}^2$ en 2100 [ONRC].

Selon le scénario pris en compte, les résultats des modèles climatiques CMIP5 donnent des résultats futurs distincts. Afin de pouvoir comparer les modèles entre eux, il est donc nécessaire de se donner un scénario, que tous les modèles utiliseront. Le scénario retenu par la communauté scientifique a été le scénario le plus sévère. Ce choix se justifie par plusieurs raisons. D'abord, si selon le scénario choisi, l'amplitude des phénomènes observés diffère, les tendances données par les différents modèles climatiques sont généralement conservées. De plus, le climat présentant une certaine variabilité (appelé variabilité climatique naturelle, représentant le fait que le climat, bien que stable sur une période donnée, n'est pas tout à fait constant), le fait de prendre un scénario sévère permettra de distinguer cette variabilité climatique aux effets anthropiques sur le climat. Enfin, les récentes mesures de concentration de GES dans l'atmosphère sont supérieures aux données fournies par le RCP 8,5. Il est donc raisonnable de prendre un tel scénario.

Ainsi, prenant en compte le RCP 8,5, se donnant des forçages communs, les différents laboratoires ont obtenus grâce à leurs modèles climatiques des résultats sur une période s'étalant du milieu du 19ème siècle (correspondant au début de l'ère industrielle) à 2100. Ces résultats sont disponibles pour le CNRM.

Simulations SURFEX en mode off line

Afin d'étudier les incertitudes relatives à la physique des modèles de la plateforme SURFEX, trois simulations ont été réalisées « en climat présent », c'est à dire la période (1950-2010) et « climat futur » c'est à dire la période (1985-2100). Ces trois simulations ont été réalisées en mode off-line. Elles prennent en compte différentes physiques du sol ; celle-ci se précise « crescendo » :

- L'expérience sfxcm3 est des trois simulations la plus basique. Elle ne prend en compte d'hydrologie sous maille et résout les équations de Richard sous leur forme paramétrique.
- L'expérience sfxcm5 : par rapport à la simulation sfxcm3, cette simulation prend en compte l'hydrologie sous maille. La simulation résout à nouveau les équations de Richard paramétriques. Comparée à la simulation sfxcm3, cette simulation

renseigne sur les effets de la prise en compte de l'hydrologie sous maille dans les modèles de surface.

- L'expérience sfxdf est un schéma dit de diffusion (ISBA-DIFF). Il prend en compte l'hydrologie sous-maille (de même que sfxcm5), mais résout pour sa part les équations de Richard sous leur forme explicite. Le sol est pour cela schématisé comme une superposition de 14 couches. Ce schéma, plus complexe que les deux autres, permet de simuler les remontées capillaires. Comparé à la simulation sfxcm5, il renseigne sur les effets qu'apportent une précision de la physique du sol.

c) Objectifs

Ayant introduits la notion d'incertitude, ayant introduit les simulations CMIP5 et les simulations SURFEX off-line, il convient à présent de passer aux objectifs du rapport :

S'inscrivant dans le contexte précédemment exposé, le présent rapport a pour objectif d'évaluer et comprendre certaines sources d'incertitudes concernant la réponse de l'hydrologie continentale dans les scénarios climatiques globaux du 21^{ème} siècle.

Pour ce faire, dans un premier temps, une analyse des incertitudes des modèles CMIP5 est faite. Elle concerne le climat présent et le climat futur.

Ceci fait, à partir des résultats des expériences menées sur SURFEX en mode off-line, les incertitudes concernant la physique du modèle ISBA-TRIP sont étudiées. Ces incertitudes ont en particulier été comparées aux incertitudes liées à un changement du modèle climatique « forceur » (c'est à dire du modèle couplé océan-atmosphère utilisé pour perturber de manière aussi cohérente que possible le forçage météorologique actuel afin de simuler l'hydrologie de la fin du 21^{ème} siècle). Deux modèles forceurs ont été considérés, le modèle CNRM-CM et le modèle ipsl.

Au delà de l'évaluation de l'état moyen à la fin du 20^{ème} siècle et de sa réponse aux forçages anthropiques (fin du 21^{ème} siècle), la variabilité interannuelle et la réponse des événements hydrologiques extrêmes que sont les sécheresses, sur la base d'indicateurs liés à l'humidité du sol, ont été analysés.

2 Résultats des modèles CMIP5

a) Incertitudes des modèles CMIP5

Introduction

Généralités

Comme nous l'avons dit, le projet CMIP5 rassemble une vingtaine de modèles couplés développés par différents laboratoires météorologiques. Le CNRM dispose des résultats que ces modèles ont fournis. Ces résultats correspondent à un forçage donné (tous les modèles ont été lancés avec le même forçage), prenant en particulier en compte le scénario RCP 8,5 (scénario le plus sévère, vers lequel l'humanité semble se diriger) pour les émissions anthropiques.

Du fait que pour tous les modèles, le forçage initial soit identique, les différences existantes entre les résultats rendus par les différents modèles renseignent sur les incertitudes touchant la physique des modèles. En effet, pour un forçage donnée, les différents modèles CMIP5, qui prennent chacun en compte une physique spécifique, donnent des résultats divergent. La comparaison de ces résultats renseigne donc sur les incertitudes liées à la physique des modèles, c'est à dire sur l'impact qu'une divergence dans la physique des modèles peut avoir dans les résultats obtenus.

Les résultats des modèles CMIP5 à disposition du CNRM suivent l'évolution de différentes variables sur une certaine période. Pour l'essentiel des modèles, cette période s'étend de 1850 à 2100. Pour un modèle (le modèle mohc), elle s'étend de 1860 à 2100. Pour un autre (gfdl), elle s'étend de 1861 à 2100.

De ces résultats, les variables concernant le bilan d'eau ont été analysées. Le choix des variables suivies a été fait en vu d'une application particulière de notre sujet : les sécheresses, caractérisées par les variables du bilan d'eau. Ainsi, Les modèles CMIP5 ont permis de suivre les variables hydrologiques telles que :

- les précipitations P ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$)
- l'humidité du sol W (kg/m^2)
- le ruissellement R ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$)
- l'évaporation E ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$)

Une autre variable considérée est le SMI (Soil Moisture Index). Le SMI est une normalisation de W . Cette normalisation est nécessaire ; en effet, les sols ayant une capacité de stockage en eau différente, il est davantage utile de savoir si le sol est rempli d'eau ou au contraire à son point de flétrissement (c'est à dire à son minimum du contenu en eau, ce minimum étant sensé exister pour tous sol), que de traiter des informations brutes. La variable SMI est calculée comme suit :

$$SMI = \frac{W - Q5}{Q95 - Q5}$$

où W est l'humidité du sol, $Q5$ la valeur du quantile 5, $Q95$ la valeur du quantile quatre-vingt quinze. Ces quantiles sont ici calculés sur une simulation de l'ère préindustrielle. Cela permet d'avoir une idée de la réponse du climat aux activités humaines. Le SMI permet de donner un aperçu de l'état de sécheresse d'une zone : lorsqu'il est négatif, la zone en question peut être déclaré en état de sécheresse. Cela reste évidemment une convention ; les critiques pouvant être faites sur les indicateurs de sécheresses ont déjà été soulevés en introduction. Le SMI sera néanmoins utilisé comme indice de sécheresse dans la prochaine partie sur les simulations SURFEX.

Pour les différents modèles, chaque variable est calculée selon un temps, une latitude et une longitude donnée. En d'autres termes, on a par exemple :

$$P = P(\text{time}, \text{lat}, \text{lon})$$

Afin d'évaluer certaines tendances climatologiques locales, quatre zones géographiques ont été sélectionnées : l'Europe du Nord, l'Europe du Sud, l'Est des USA et l'Ouest des USA. Ces zones seront conservées pour l'étude des simulations SURFEX off-line. Le choix de ces

zones vient en particulier du fait que les bases de données d'observation sur ces zones sont bien documentées. Par ailleurs, comme nous le verrons dans l'étude des simulations SURFEX, elles comprennent le bassin versant de différents fleuves. Enfin, ce choix permet d'étudier deux zones arides (l'Ouest des USA et l'Europe du Sud), ainsi que deux zones plus humides (l'Est des USA et l'Europe du Nord). Les zones sont représentées sur la carte ci après :

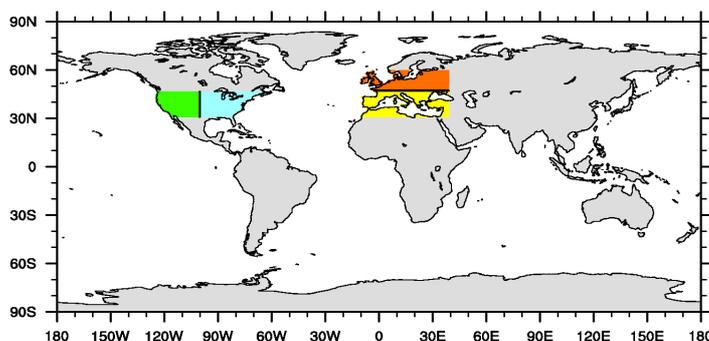


Figure 1 : Représentation des zones étudiées : en vert l'Ouest des USA, en bleu l'Est ; en jaune le Sud de l'Europe, en rouge le Nord. Les zones arides sont ainsi en vert et jaune ; les zones humides sont en bleu et rouge.

Le choix de ces zones fait, les variables suivies par les modèles ont pu être moyennées sur une zone, ce qui a permis de plus facilement exploiter les résultats, comme par exemple tracer l'évolution des précipitations dans le temps pour une zone donnée.

Climatologies et anomalie

Pour une analyse plus pertinente des résultats, il est utile d'utiliser les concepts de climatologie et d'anomalie. Ces concepts, largement repris dans la suite du rapport, sont présentés ici.

Pour un modèle (resp, un système d'observation), une climatologie est la réponse de ce modèle (resp, des données observées) sur une période de temps donnée (cette période est généralement plus courte que l'entière période de temps de l'expérience). Une climatologie est évidemment relative à une ou plusieurs variables climatiques. Elle est censée donner une idée de l'état de ces variables sur une certaine période.

Pour les résultats CMIP5, nous nous sommes fixé 2 climatologies :

- une climatologie climat présent : la période de 1979 à 2008
- une climatologie climat futur : la période de 2071 à 2100

La période du climat présent a été fixé de 1979 à 2008 en raison des abondantes données disponibles sur cette période ; celle du climat futur a été déterminée du fait que les simulations s'étendaient jusqu'à 2100.

En effectuant des moyennes mensuelles des variables considérées sur la durée correspondant à celle de la climatologie, cette dernière est souvent ramené à une plage de temps annuelle : on obtient ce qui est appelé le cycle annuel climatologique.

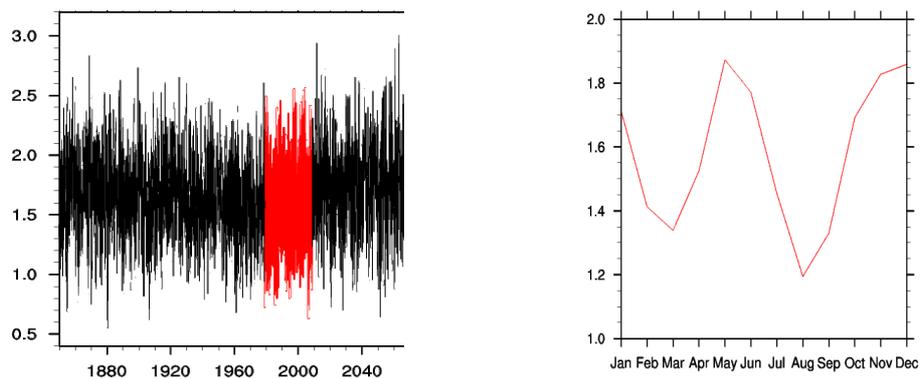


Figure 2 : Résultats du modèle CNRM-CM concernant les précipitations (en mm/jour) sur la période 1850-2060 moyennés sur l'Europe centrale. A gauche, les résultats bruts, avec en rouge la climatologies présente. A droite, le cycle annuel climatologique en climat présent, obtenue en faisant la moyenne annuelle de la partie rouge (qui correspond à la période présent) de la courbe de gauche. Le cycle annuel climatologique donne une idée des caractéristiques du climat présent.

Ainsi définie, une climatologie sert de données de base pour le traitement des résultats d'un modèle ou d'un système d'observation. En effet, une climatologie permet de traiter les résultats en tant qu'anomalie : une anomalie est l'écart d'un modèle à sa climatologie.

Pour un modèle en effet (resp, un système d'observation), on définit les anomalies par rapport à une climatologie comme étant les différences entre les valeurs des variables en un temps t (année y mois m jour d) et la valeur donnée par le cycle annuel climatologique de cette même variable au mois m . Une anomalie renseigne sur l'écart d'une variable, pour un certain temps, avec la climatologie (valeur correspondant à un climat de référence).

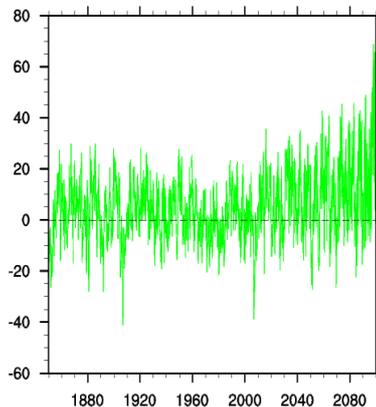


Figure 3 : Anomalie présent (ie par rapport à la climatologie présent) de W (en kg/m^2) fourni par le modèle du CNRM-CM, moyenné sur l'Europe centrale. On remarque que les anomalies se rapproche de 0 sur la période de la climatologie présent. De part la définition des anomalies, cela est cohérent.

Tendances et analyses

Il est à présent temps de passer aux résultats et analyses des modèles CMIP5. Si toutes les variables du bilan d'eau ont été analysées, par soucis de concision, seules quelques variables figurent sur ce rapport. L'objectif étant ici de mettre en évidence les incertitudes existant au niveau de la physique des modèles, cette restriction est suffisante.

Par ailleurs, comme le projet CMIP5 regroupe une quinzaine de modèles, la représentation sur un graphe de tous les modèles n'est pas toujours pertinente. Aussi, la méthode consistant à tracer sur un même graphe l'enveloppe (c'est à dire pour un certain temps, les valeurs maximum et minimum de la variable considérée donnée par les différents modèles), la moyenne (la moyenne des valeurs renvoyées par tous les modèles) et une bande d'écart type, a souvent été préférée.

Par ailleurs, afin de rendre compte des résultats des simulations SURFEX (les modèles CNRM-CM et ipsl, comme nous l'expliquerons, sont pris comme forçage pour les simulations SURFEX en climat futur), les modèles CNRM-CM et ipsl ont été mis en évidence.

Enfin, comme annoncé, les résultats ont été limités aux quatre zones géographiques précédemment définies.

Résultats

Incertitudes liées à la physique des modèles CMIP5

Nous avons ici représenté les résultats de la variable SMI. Cette dernière nous l'avons dit, renseigne sur l'humidité des sols.

Deux graphiques sont représentés :

- Les anomalies climatiques, qui représentent la différence entre deux climatologie (ici, la climatologie future et la climatologie présente). L'étude de ces anomalies peut renseigner sur la réponse de certaines variables au changement climatique.
- Les anomalies présentes (c'est à dire les anomalies calculées par rapport à la climatologie présent)

Pour les deux graphiques, l'enveloppe des modèles (c'est à dire la plage de valeur dans laquelle se situe tous les résultats des modèles) a été dessiné en bleu pâle.

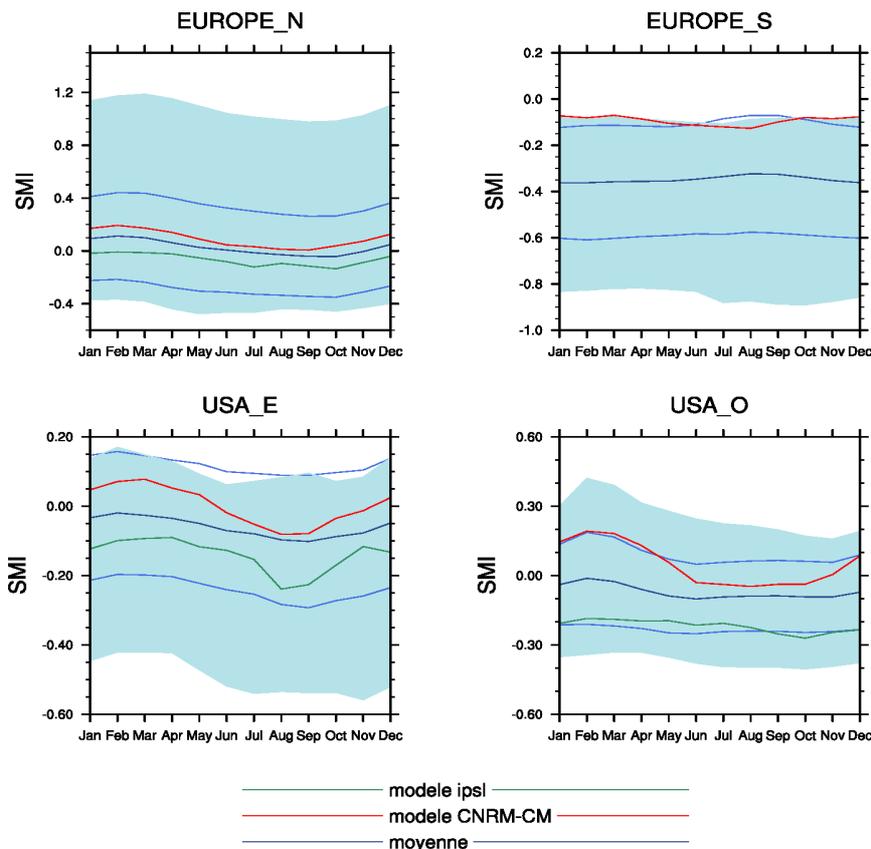


Figure 4 : Anomalie climatique de SMI (sans unité). Pour plus de lisibilité, tous les modèles n'ont pas été représentés ici. L'enveloppe des modèles est en bleu pâle. La moyenne correspond à la moyenne des résultats donnés par tous les modèles. Un écart type a par ailleurs été calculé.

Un aspect frappant de ces anomalies, aspect que nous retrouverons dans l'analyse des anomalies présentes, est l'importance de l'étendue (ie l'écart entre la valeur maximale et la valeur minimal) des résultats. Les modèles en effet, indiquent des résultats différents quant à la réponse hydrologique au réchauffement climatique. Le signe même de ces anomalies varie selon les modèles, si bien que cela empêche d'établir des hypothèses même qualitatives, quant à l'augmentation ou la diminution des variables du bilan d'eau dans le futur : par exemple pour l'Ouest des États-Unis, certains modèles (comme celui du CNRM), prévoient pour l'avenir une augmentation de l'humidité des sol en hivern, tandis que d'autres (comme celui du ipsl) sur la même saison, prévoient une diminution.

En Europe du Sud, tous les modèles donnent une anomalie négative. Cela semblerait montrer qu'un assèchement global des sols dans cette région est à attendre dans le prochain siècle.

Ci après les anomalies par rapport à la climatologie présente :

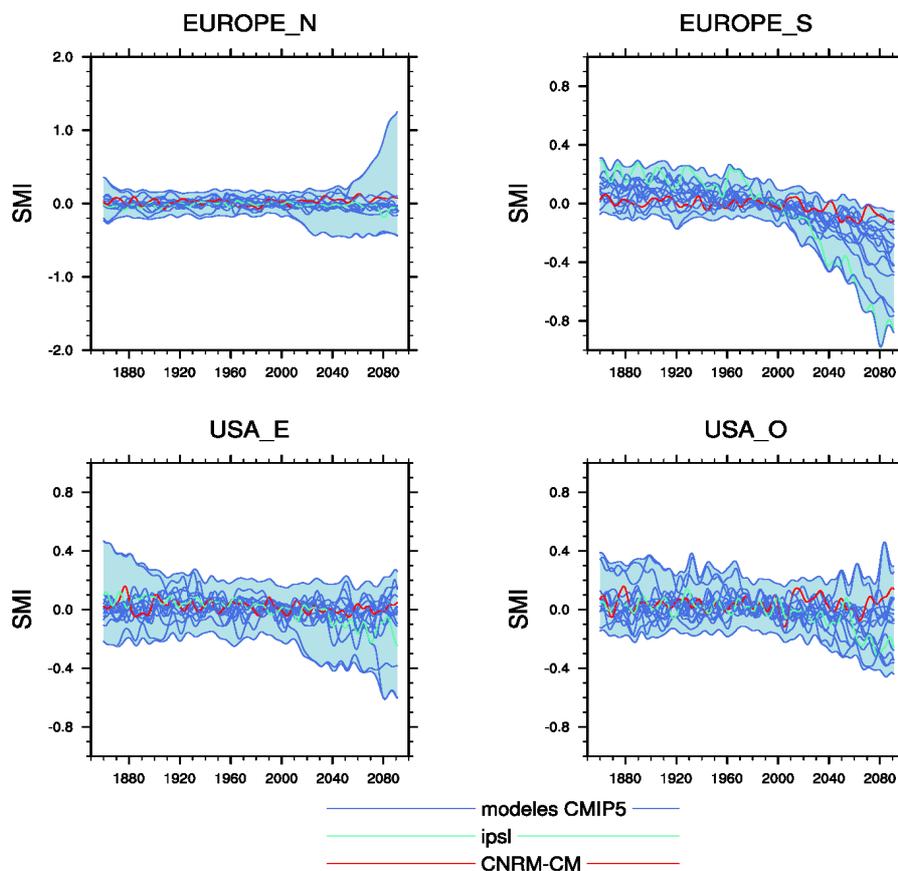


Figure 5 : Anomalies de la variable SMI pour les modèles CMIP5. L'enveloppe des modèles est en bleue pâle. Pour se rendre compte ici du comportement de chaque modèle, tous ont été représentés. Toutefois, les résultats des modèles montrant une grande variabilité annuelle, un filtre passe bas sur dix ans a été appliqué aux données : seules les variations de faibles fréquences ont été conservées.

Les conclusions de ce graphe rejoignent celles du précédent. Selon les modèles en effet, l'évolution des variables escomptée n'est pas la même. Les divergences existantes sur les évolutions envisagées sont évidentes. Seule la région de l'Europe du Sud semble faire consensus.

Malgré la disparité des résultats des modèles, afin de proposer quelques projections, des analyses supplémentaires peuvent être faite. Il est par exemple possible de raisonner en pondérant le résultat des modèles par le nombre de modèles donnant le dit résultat. L'idée est que si sur 10 modèles, 9 annoncent une diminution de l'humidité des sols, on peut conclure que les modèles s'accordent (à 90%) pour dire que cette diminution aura lieu. On peut alors obtenir des cartes de tendances, qui annoncent l'évolution d'une variable, associées au niveau de consensus des modèles.

Par exemple, ci dessous les cartes des modèles CMIP5 pour la variable SMI (Le lecteur trouvera de même les cartes de précipitation en annexe). La première carte représente le

niveau de consensus au niveau du signe des anomalies données par les modèles, la deuxième la moyenne des anomalies climatiques attendues, la dernière un écart type. Les résultats sont donnés pour la période JJAS, correspondant à l'été dans l'hémisphère Nord. Ce choix est justifié, étant donné que les zones étudiées se situent dans cet hémisphère, et que les dégâts causés par les sécheresses sont les plus notables à cette période.

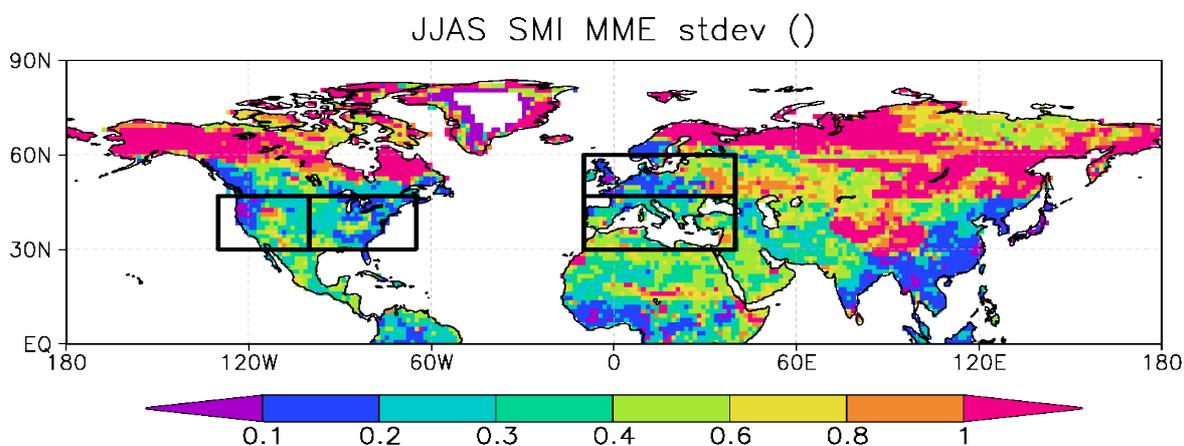
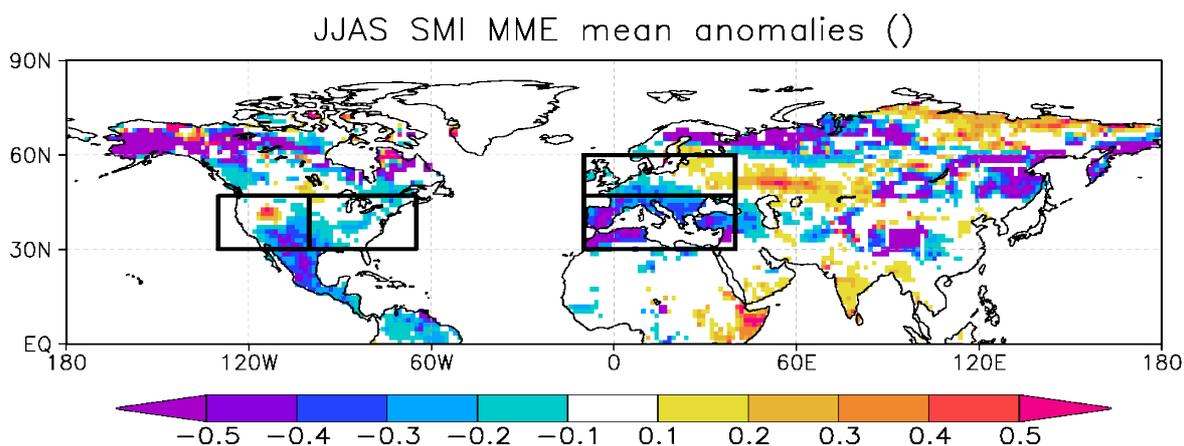
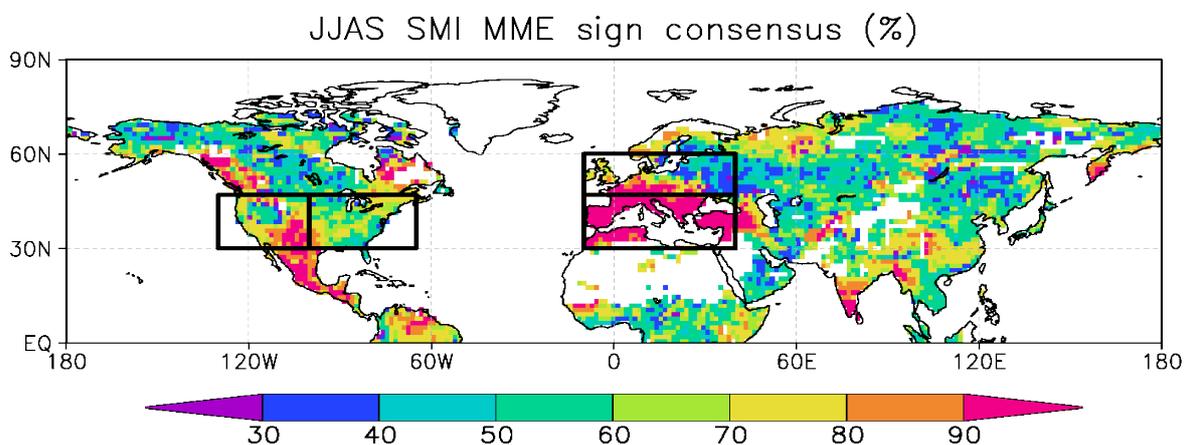


Figure 6 : SMI pour les MME (multi model ensemble) précédemment présentés. La première carte représente le niveau de consensus au niveau du signe des anomalies données par les modèles, la deuxième la moyenne des anomalies climatiques attendues, la dernière un écart type. Les quatre zones étudiées sont mises en évidence

Cette carte permet de dire qu'en Europe du Sud, ainsi qu'une grande partie des modèles le projettent, une baisse de l'humidité des sols est à attendre. A l'Ouest des USA, les modèles prévoient également une certaine baisse de l'humidité, bien que le taux de consensus des modèles soit moins net que pour l'Europe du Sud. La carte des écarts-types montre des écarts important entre les modèles à l'Ouest des USA. Le niveau de consensus dans cette zone étant pourtant correct, cela indique la présence de certains modèles qui annoncent une augmentation de l'humidité avec une grande amplitude. Ces modèles méritent peut-être une réanalyse. A l'Est des USA, les modèles annoncent une baisse de l'humidité du sol. Au Nord-Est de l'Europe, les écart-types sont important à l'Est. Cela montre qu'il aurait peut-être été judicieux de séparer la zone de l'Europe du Nord en deux parties Est et Ouest, celle étant à l'Ouest projetant une baisse de l'humidité.

L'analyse de ces cartes pour la variable SMI confirme donc les tendances relevées précédemment. Elles permettent par ailleurs de repérer certaines zones particulière, en particulier l'Europe de l'Est, et d'ainsi compléter les analyses précédentes.

De même, pour les précipitations, les cartes CMIP5 montrent que la tendance globale est à l'invariance aux USA et à la diminution en Europe, tout particulièrement en Europe du Sud.

Si l'analyse des cartes des modèles permet de dégager certaines projections, les résultats des modèles CMIP5 montrent combien il est difficile de prévoir la réponse des variables hydrologiques au changement climatiques. Les modèles en effet, ne prévoient pas les mêmes tendances. Pour parler en terme d'incertitude, du fait que les résultats obtenus soient très différents, on peut conclure que les incertitudes lié à la physique des modèles sont critiques. Un raffinement de la physique des modèles devra donc être fait pour avoir une chance de mieux étudier le climat futur.

Comparaison des incertitudes liées à la physique des modèles et celles liées à la variabilité interne des modèles pour le modèle CNRM-CM

Si nous venons de voir que les incertitudes liés à la physique des modèles sont assez importante pour rendre difficile la connaissance des tendances portant sur l'évolution du climat, il peut être assez intéressant de comparer ces incertitudes aux incertitudes liées à la variabilité interne des modèles. Pour cela, nous avons étudié la variabilité interne du modèle CNRM-CM.

En effet, le CNRM possède pour son modèle plusieurs réalisations, c'est à dire, pour un forçage donné, diverses expériences prenant en compte des conditions initiales distinctes. En analysant les résultats de cinq réalisations, on remarque que les résultats diffèrent : cela est du à la variabilité interne du modèle, qui, le climat étant un système chaotique, est sensible aux conditions initiales.

Ci dessous sont représentées cinq réalisations du modèle CNRM-CM sur la période 1850-2100, pour la variable SMI. La réalisation retenue pour le projet CMIP5 (donc la même représentée sur les graphes précédent), est tracée en rouge.

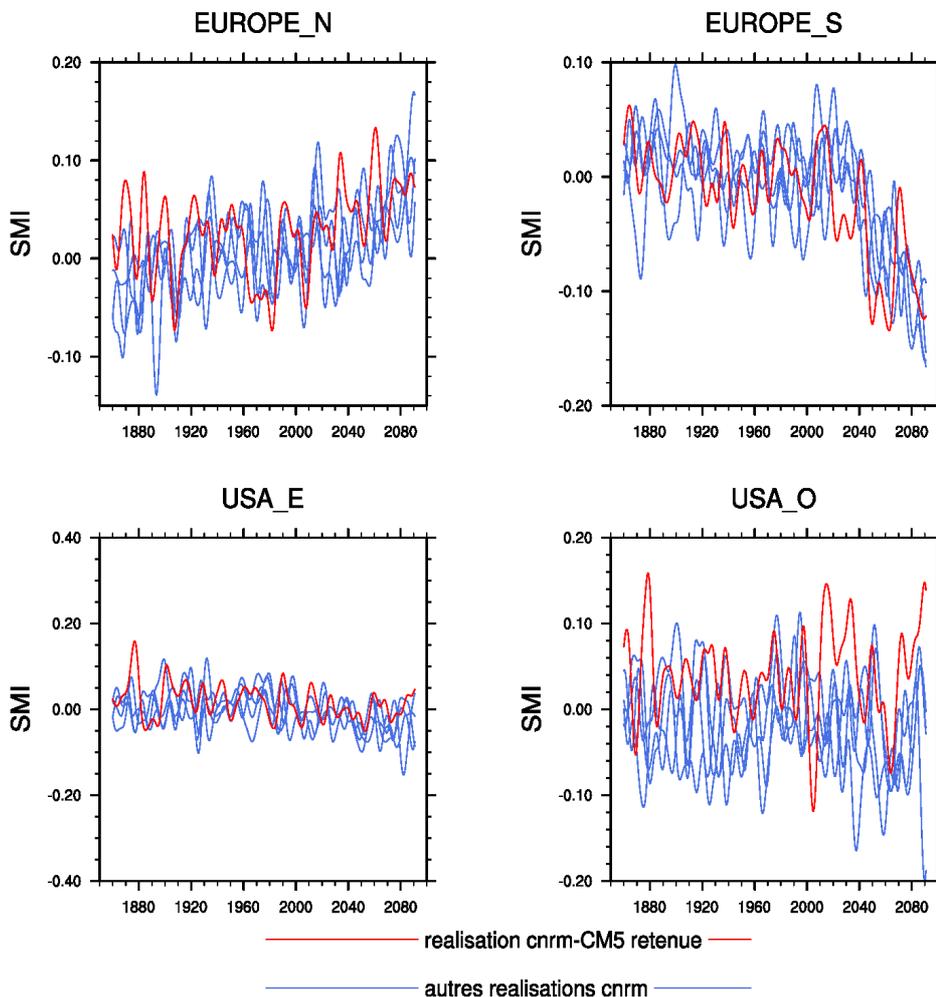


Figure 7 : Anomalies présentes des 5 réalisations du modèle CNRM-CM, pour la variable SMI. Un filtre 10 ans a été appliqué aux données.

Si les divergences dues à la variabilité interne du modèle existent bien, si sur une période donnée, les réalisations ne donnent pas les mêmes évolutions climatiques, on remarque que les écarts entre réalisations sont en général plus faibles que ceux existant dans les différents modèles CMIP5. Une exception peut être signalé pour l'Ouest des USA, où la variabilité interne, bien que pouvant être considérée négligeable, semble notable sur les dix dernières années.

En conclusion, pour les simulations étudiées, les incertitudes liées à la physique des modèles apparaissent plus importantes que celles liées à la variabilité interne des modèles. Cela est en partie du au fait que les simulations utilisent le scénario RCP 8,5, qui peut en quelque sorte masquer l'effet des incertitudes liées aux variations internes.

Résumé et conclusions

L'étude des résultats des modèles CMIP5 a permis de mettre en évidence les incertitudes liées à la physique des modèles. Ces incertitudes, relativement importantes, empêchent de donner des projections futures fiables quant à la réponse des variables hydrologiques au changement climatique. Des résultats semblent tout de même se dégager. En particulier, les modèles CMIP5 sont pessimistes sur l'évolution de l'humidité du sol en Europe du Sud pour les années à venir. Cela en effet, pourrait amener à une augmentation de phénomènes extrêmes de type sécheresse.

Si pour les simulations considérées, les incertitudes liées à la variabilité interne des modèles semblent négligeables devant celles liées à la physique des modèles, des simulations complémentaires pourraient élargir ce résultat ou au contraire mettre en évidence certains scénarios pour lesquels la variabilité interne des modèles serait une cause d'incertitude majeure.

Dans la précédente partie, par physique des modèles, il était aussi bien entendu la physique liée aux surface continentales que celle liée à l'atmosphère ou à l'océan. La deuxième partie du rapport étudie les incertitudes liées à la physique dans les modèles de surface. Cette étude a été réalisée au travers des trois simulations SURFEX dont nous avons parlé plus haut.

3 Résultats du modèle SURFEX en off-line.

Comme nous l'avons dit, trois simulations de la plateforme SURFEX ont été effectuées en off-line. En climat présent, ces simulations sont identiques (même forçage en particulier), hormis sur la physique du modèle ISBA, comme nous l'avons précisé en introduction. En « climat futur » (c'est à dire sur la période 1985-2100), pour les trois modèles, deux simulations ont été effectuées : l'une est forcée par le modèle CNRM-CM, l'autre par le modèle ipsl.

Pour chacun des trois schémas, les simulations présentes ont été confrontées aux observations. Les simulations futures ont dans un premier temps été confrontées aux simulations présentes afin d'évaluer la qualité des forçages utilisés ; dans un second temps, des analyses sur les résultats futurs ont été faites, ce qui a permis d'établir et de discuter de différentes projections.

a) Climat présent

La plateforme SURFEX permet de simuler l'évolution de différentes variables hydrologiques du bilan d'eau. La présente partie consiste à analyser en climat présent les résultats de ces variables pour les trois simulations off-line.

Parmi les variables simulées par SURFEX, des observations pour le ruissellement et l'humidité du sol sont disponibles. Afin de tester la performance des modèles, lorsque cela était possible, les résultats de ces deux variables simulées par SURFEX ont donc été comparées aux observations.

Confrontations aux observations, évaluation des forçages

Comme nous l'avons indiqué, l'objectif du modèle ISBA est de simuler l'évolution temporelle des variables physiques du sol. Or, les propriétés physiques du sol étant influencées par celle d'autres systèmes (comme l'atmosphère ou l'océan), le modèle ISBA nécessite la connaissance des variables de ces dits systèmes en paramètre. Cela constitue le forçage de la simulation. Dans le cadre du stage, les simulations SURFEX ont été faites en off-line, c'est à dire que la rétroaction des surfaces sur l'atmosphère n'a pas été prise en compte.

Le forçage utilisé a été fourni par l'université de Princeton (<http://hydrology.princeton.edu>). Il consiste en des données tri-horaires, à 1° de résolution. Ces données, qui sont des données météorologique observées, ont été soumise à des réanalyses et corrections de biais (corrections effectuées par Sheffield et al, 2006).

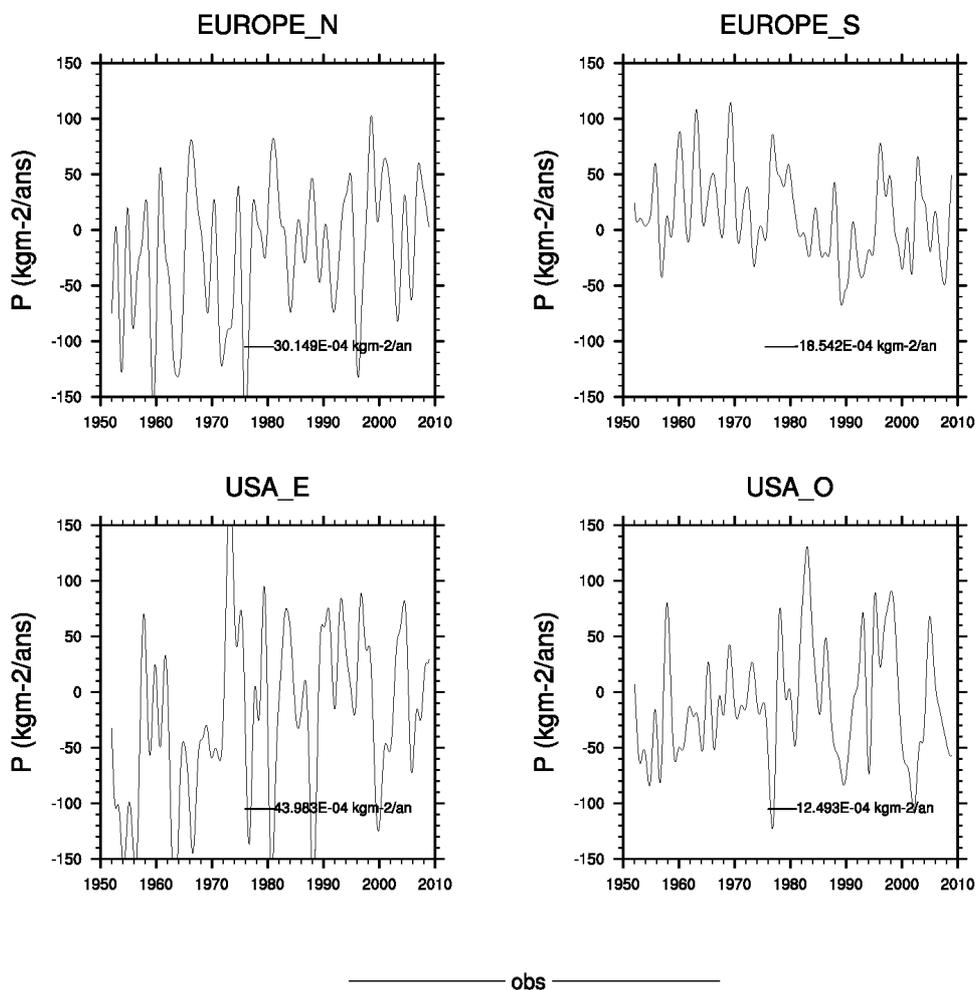


Figure 1 : évolution des précipitations en climat présent. Données du forçage de SURFEX en climat présent

Humidité du sol

GRACE

GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), est une mission spatiale de gravimétrie, lancé le 17 mars 2002 par la NASA. Elle comprend deux satellites, évoluant à environ 500 km d'altitude. Ses résultats après traitement, fournissent de précieuses informations sur les variables hydrologiques.

Les données brutes de GRACE correspondent aux variations mensuelles du géoïde terrestre, c'est à dire la surface correspondant à l'équipotentielle du champ de gravité la plus proche du niveau moyen des mers. La forme de ce géoïde étant intimement lié au champ de gravité terrestre, les données de GRACE permettent d'avoir des informations sur les variations de ce champ. Or, les variations du champ de pesanteur étant essentiellement dues aux échanges d'eau entre les différents compartiments terrestre (du moins sur des périodes de temps décennales), GRACE donne un aperçu des variations de la répartition en eau sur Terre. Divers organismes dans le monde sont chargés de convertir les données brutes de GRACE en données hydrologiques.

Ainsi, combinées à des observations et ou des sorties de modèles, les données de GRACE sont utilisées pour évaluer les résultats des modèles hydrologiques. Au cours du stage, les données de GRACE ont été considérées sur la période 2003-2010 (le mois de juin 2003 en moins(cette donnée étant manquante)). Par ailleurs, la variable TWS (cm), correspondant aux variations de masse des stocks d'eau continentale, a été étudiée. Elle peut être reliées aux autres variables hydrologiques par l'équation suivante :

$$\Delta TWS = \Delta WG + \Delta SN + \Delta WR + \Delta S + \Delta G \quad (1)$$

où WG est la contenue en eau du sol ; SN l'épaisseur de neige ; WR l'eau captée par la végétation ; S l'eau des fleuves ; G les réservoirs d'eau de type aquifère.

La variable TWS est fournie par GRACE sur la période 2003-2010. Ainsi, en la calculant pour les trois simulations, sur la période 2003-2010, les résultats des modèles ont pu être confrontés aux observations.

Cartes saisonnières

Dans cette partie, quelques outils statistiques de base ont été utilisés. Nous en rappelons ici les expressions.

Afin d'évaluer un modèle, lorsque des observations sont disponibles, la corrélation r , ainsi que le root-mean-square error (RMSE) sont calculés. Les expressions de ces grandeurs statistiques pour deux variables X et Y sont rappelées ci-après :

$$r(x, y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma(X)\sigma(Y)} \quad (1)$$

où cov est la fonction covariance et σ l'écart type. Comme son nom l'indique, r mesure la corrélation de deux variable. Sa valeur absolue est inférieure ou égale à 1 ; elle est égale à 1 lorsqu'il y a dépendance linéaire des deux variables. La corrélation évalue la dépendance linéaire de deux variables.

Le RMSE est défini comme suit :

$$RMSE = \sqrt{E((X - Y)^2)} \quad (2)$$

où E est la fonction moyenne. Le RMSE évalue l'écart (ou l'erreur, dans le cas d'un modèle) existant entre deux séries statistiques. Les deux séries sont d'autant plus proches que le RMSE est proche de 0.

Les cartes ci dessous montrent la distribution spatiale de la variable TWS simulée par les trois modèles et celle donnée par GRACE.

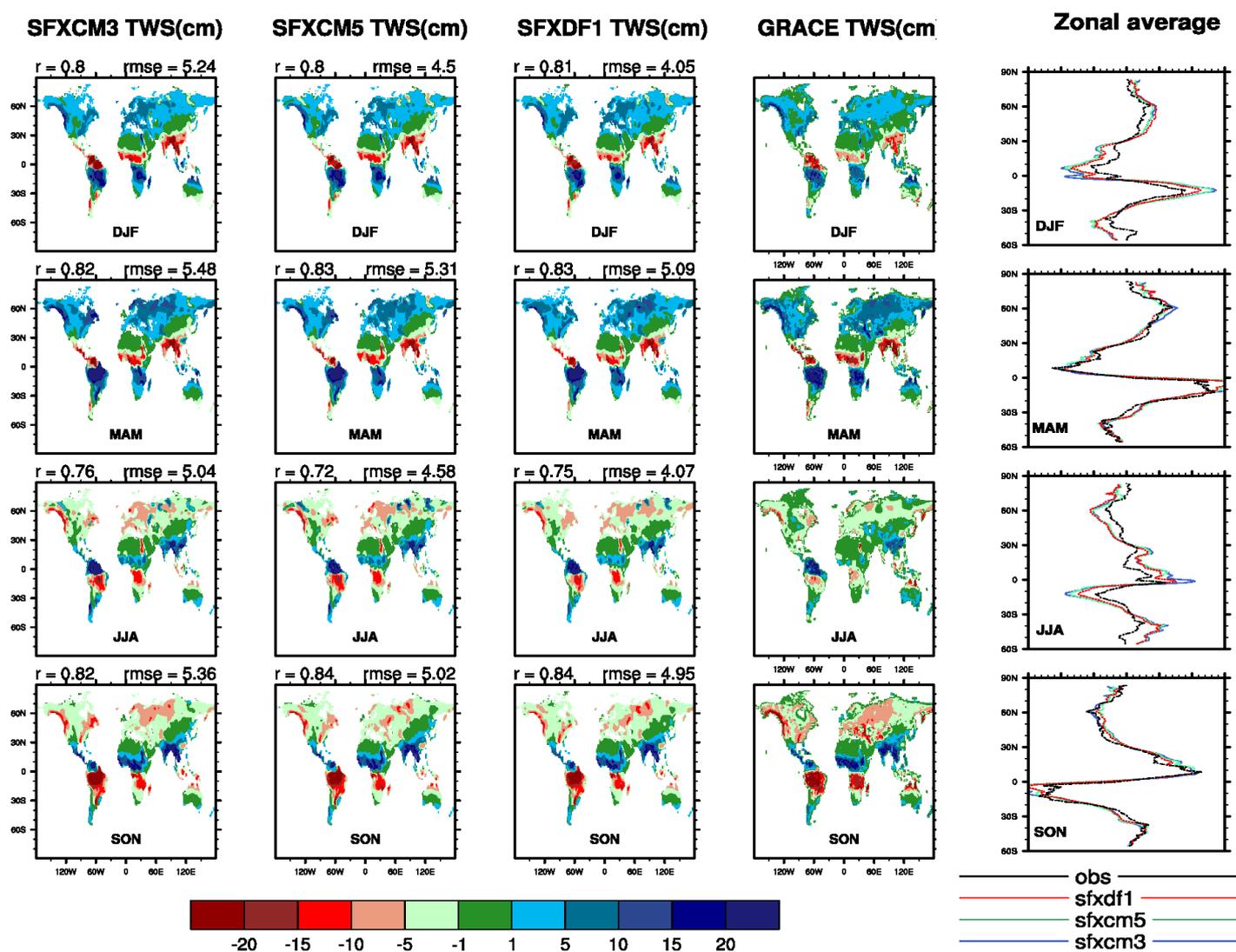


Figure 3 : A gauche, les cartes saisonnières de TWS données par les modèles et GRACE. De haut en bas : DJF (Décembre-Janvier-Février) et JJA (Juin-Juillet-Août) MAM et SON. A droite, les cartes zonales, centrées en 0, donnent la moyenne de TWS pour chaque latitude.

Globalement, le modèle sfxdf donne des résultats probants, avec une corrélation satisfaisant et un rmse raisonnable. La corrélation est plus faible en été (JJA) et, dans une

moindre mesure, en hivers (DJF), que dans les autres saisons. Cela est probablement dû au fait que les modèles ne prennent pas en compte les aquifères. En effet, dans les simulations modélisant les aquifères, la corrélation pour les saisons JJA et DJF est fortement améliorée (par rapport aux simulations ne prenant pas en compte les aquifères) ([Vergnes, 2012]). Ce phénomène peut se comprendre : pour ces deux saisons (JJA et DJF), qui correspondent à l'été dans un des deux hémisphères, les aquifères jouent un rôle clef dans la redistribution des masses d'eau.

Concernant les cartes zonales, Les variations de TWS semblent surestimées sur l'ensemble de l'année. On remarque que ces biais sont partiellement corrigés par la précision de la physique des sols (la simulation sfxdf donne de meilleurs résultats que les autres). Ces biais sont les plus importants au niveau des tropiques.

Confrontations des modèles aux observations de GRACE sur la période 2003-2010

Ci dessous les résultats de la variable TWS en climat présent :

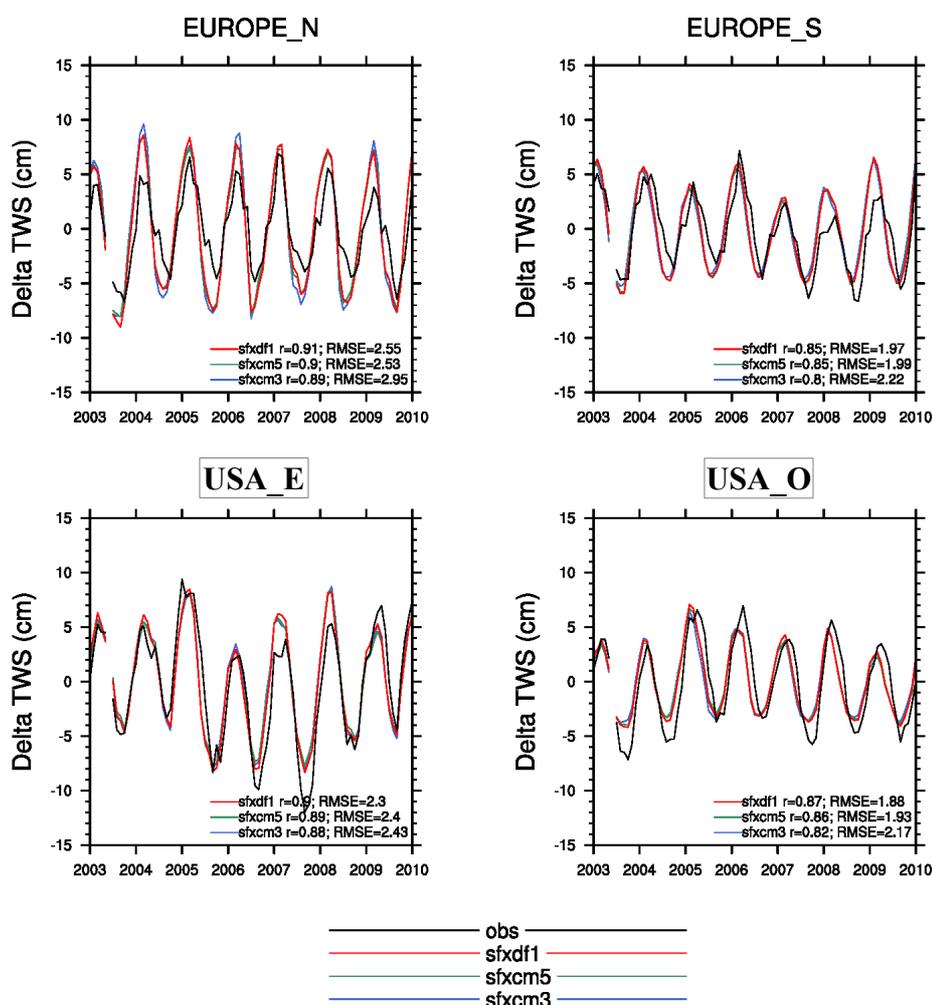


Figure 1 : variations de TWS en climat présent. Le moins de juin 2003, absent des données, a été retiré aux résultats des modèles

On remarque que les résultats des modèles approchent de façon convenable les observations. Les divergences existantes peuvent trouver différentes explications, notamment celle que les schémas utilisés ne prennent pas en compte les aquifères.

Les différences entre les modèles sont plus faibles que les différences entre les modèles et les observations. Dans toutes les zones, les simulations sfxdf et sfc5 surpassent la dernière en termes de corrélation et de RMSE. Cela est cohérent avec le fait que la physique de ces modèles est plus précise que celle de l'autre.

Les mêmes conclusions peuvent être apportées à l'étude du cycle annuel :

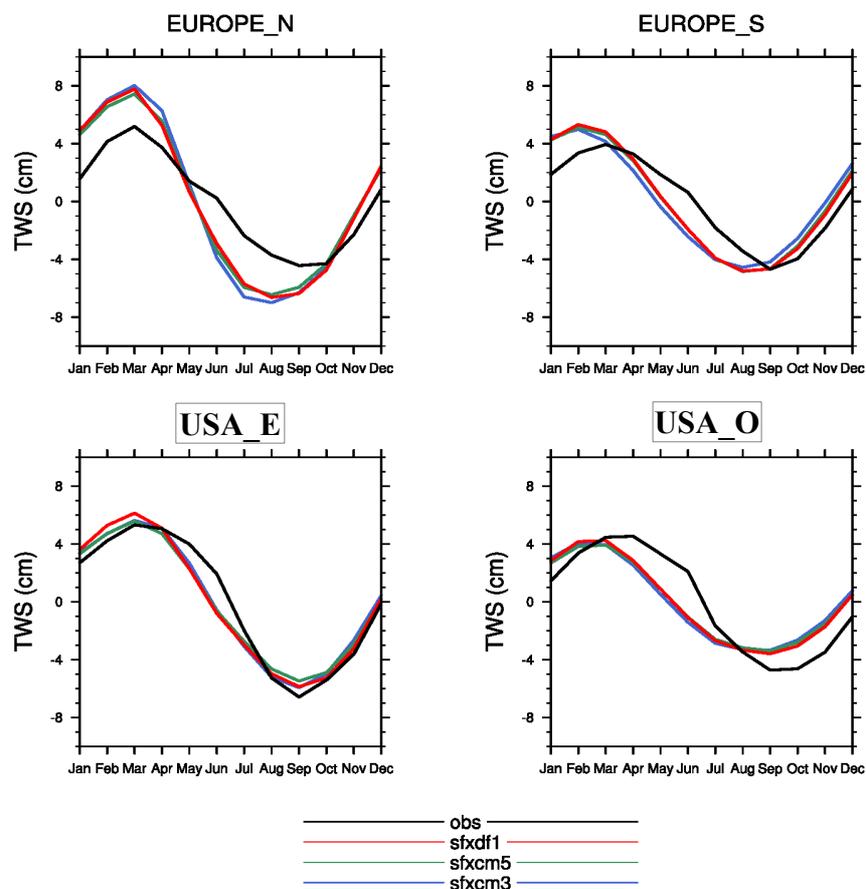


Figure 2 : cycle annuel de TWS en climat présent

Débits

De même que des résultats d'humidité du sol sont disponibles, le CNRM dispose aussi de données de débits pour divers grands fleuves. Dans le cadre du stage, quatre grands fleuves, présents dans les quatre zones étudiées, ont été considérés :

- Le Mississippi, fleuve d'Amérique de l'Est ; il se jette dans l'océan Atlantique, à l'Ouest de la Floride.
- Le Columbia, fleuve d'Amérique de l'Ouest, circulant au Canada et au Nord-Ouest des États-Unis avant de se jeter dans l'Océan Pacifique

- Le Pô, fleuve italien, se jetant dans la mer Adriatique
 - Le Danube, qui prend sa source en Allemagne et se jette dans la mer Noire.
- Les bassins versants de ces fleuves ont été représentés sur la figure ci dessous :

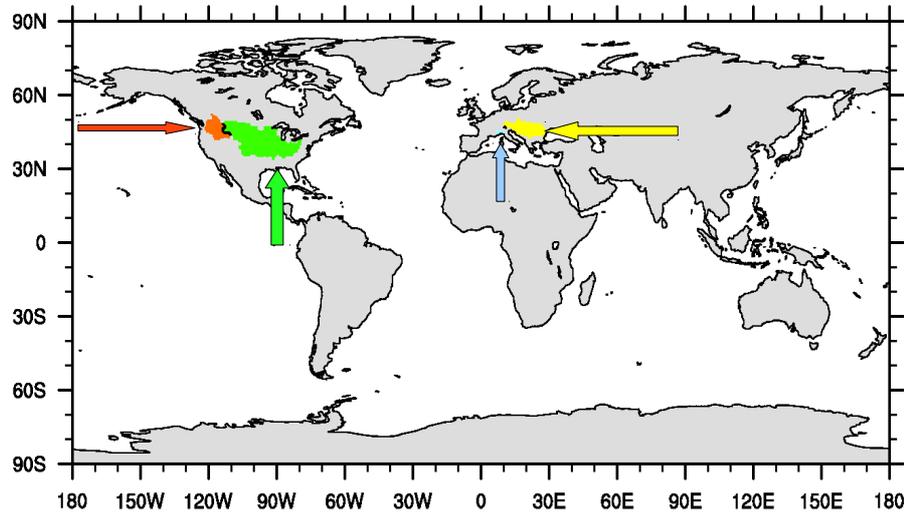


Figure 4 : Les bassins versants des différents fleuves considérés. En Rouge le Columbia, en vert le Mississippi, en bleu le Pô, en jaune le Danube. L'embouchure de chaque fleuve est indiquée par une flèche.

Des données relatives à ces fleuves permettent d'estimer la validité des simulations effectuées par SURFEX. Pour cela, en plus des coefficients de corrélation et de RMSE précédemment introduits, on définit pour les débits le critère d'efficacité (Eff) ([Nash et Sutcliffe, 1970]) qui mesure la capacité du modèle à reproduire la dynamique des débits journaliers observés :

$$Eff = 1 - \frac{\sum (Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t))^2}{\sum (Q_{sim}(t) - Q_{obs, moy})^2} \quad (3)$$

où $Q_{obs, moy}$ est la moyenne temporelle du débit observé. L'efficacité est négative si le modèle est très mauvais ; elle est au dessus de 0,5 pour une simulation des débits correcte.

Enfin, une dernière grandeur statistique utilisée pour les débits est le ratio annuel :

$$Ratio = \frac{Q_{sim}}{Q_{obs}} \quad (4)$$

Le ratio peut être supérieur ou inférieur à 1. Il est d'autant plus proche de 1 que les débits annuels sont bien simulés.

Ci dessous pour le Mississippi. Les autres résultats ont été mis en annexes.

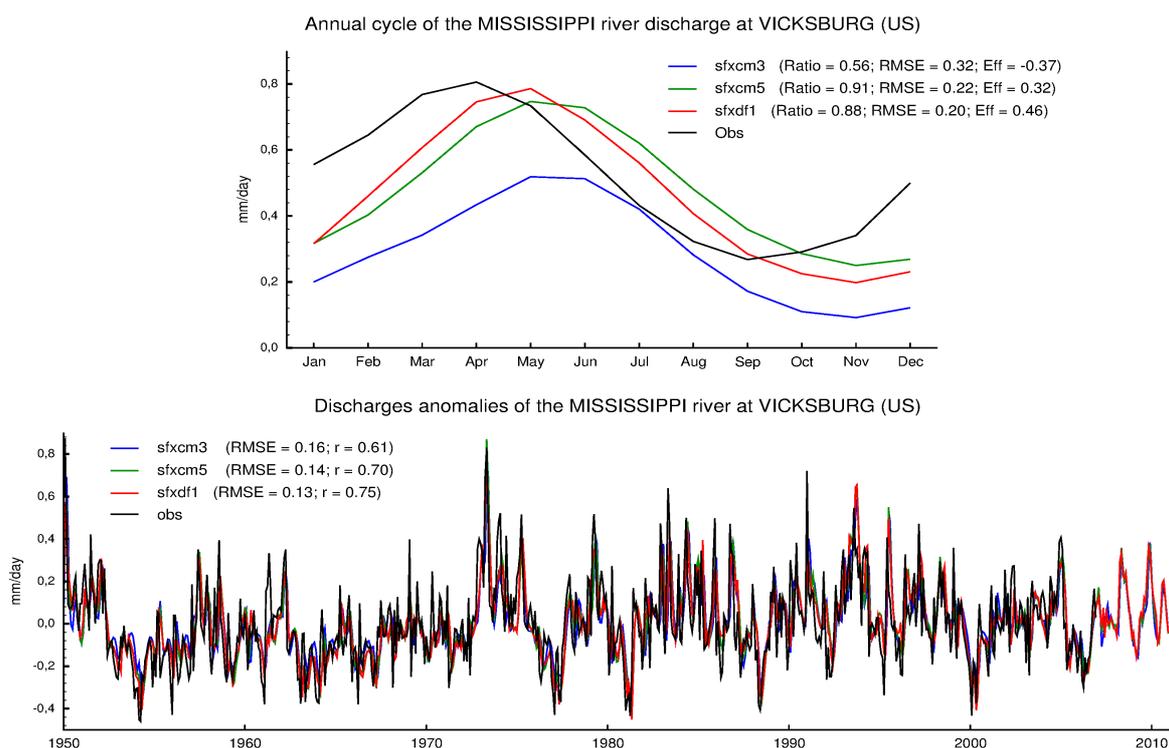


Figure 5 : Débits simulés par SURFEX et observations pour le Mississippi sur la période 1950-2010. En haut le cycle annuel, en bas les résultats sur la période 1950-2010 (climat présent)

De manière générale, pour les différents fleuves, pour les simulations réalisées, les variabilités annuelles sont bien reproduites. De même, le cycle annuel est correctement modélisé, en particulier par la simulation sfxdf.

Le cycle annuel montre qu'en été (JJA), les débits donnés par sfxdf sont plus proches des observations que la simulation sfxcm5. Cela est dû à l'effet tampon sur les masses d'eau qu'occasionne le schéma de diffusion en été, ce qui permet de mieux approcher les résultats observés. On constate tout de même un certain retard de cette simulation sur les observations.

Contrairement à l'humidité, l'écart entre les simulations est significatif par rapport à l'écart entre les simulations et les observations. Cela semble montrer, dans le cas des simulations considérées, qu'une sophistication de la physique des modèles a un impact plus important sur les débits que sur l'humidité du sol.

Toutefois, l'efficacité de la simulation sfxdf est particulièrement mauvaise (voir annexe, figure 1 partie simulations off-line, paragraphe Climat présent) dans le cas du Columbia (hormis le ratio, qui est proche de 1). Étant donné que le Columbia est un fleuve situé à l'Ouest des USA, ces mauvaises corrélations peuvent s'expliquer par les aquifères : si la présence d'aquifère améliore la qualité des simulations de débits, il a été démontré ([Vergnes,2012]) que cela était particulièrement vrai pour l'Ouest des USA.

Analyse des résultats sur la période 1950-2010

Des observations n'étant pas disponibles sur toute l'étendue de cette période, on ne peut dans ce paragraphe confronter les modèles aux observations. Il est cependant intéressant de

comparer les résultats des modèles entre eux sur toute cette période. Ci dessous les résultats pour l'humidité du sol. Par soucis de concision du rapport, les graphiques obtenus pour l'évaporation et le ruissellement ont été placés en annexe.

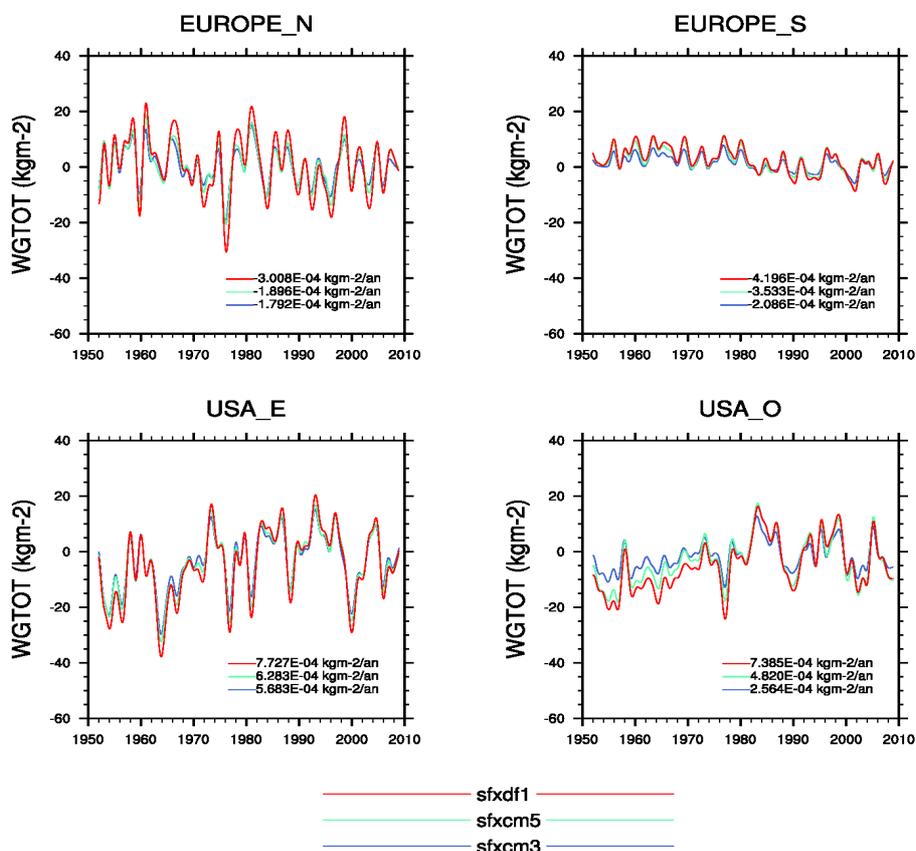


Figure 6 : évolution de l'humidité en climat présent pour les trois simulations off-line

De façon générale, on remarque que pour les trois simulations, pour les différentes variables (évaporation, ruissellement, humidité du sol), les modèles donnent des résultats très proches sur les quatre zones étudiées.

Toutefois, on remarque que l'humidité du sol simulées par la simulation de diffusion (sfxdf) donne des variations d'amplitudes plus grandes que les deux autres. Comme le modèle comprend une physique plus sophistiqué, ce résultat pouvait être espéré : des phénomènes physiques, qui n'étaient pris en compte dans les deux premiers modèles, sont ici modélisés. Le modèle par exemple, permet de simuler les remontées capillaire, ce qui fait varier l'humidité du sol ; ce phénomène n'est pas simulé par les deux autre simulations.

Concernant les tendances, les trois modèles relèvent une augmentation de l'évaporation en Europe du Nord, une augmentation du ruissellement à l'Ouest des USA, une diminution du ruissellement en Europe du Sud, une baisse de l'humidité en Europe (Sud comme Nord) et une augmentation de l'humidité aux USA (Ouest comme Est). Ces tendances amènent certaines hypothèses :

Dans l'Est des USA, l'augmentation des précipitations (voir figure 1 de la partie sur l'évaluation des forçages), pourraient expliquer l'augmentation du ruissellement (voir annexe, figure 5 de la partie SURFEX, climat présent) et de l'humidité (figure 6).

En Europe du Nord, la baisse de l'humidité du sol pourrait s'expliquer par l'augmentation de l'évaporation (voir annexe, figure 4 de la partie SURFEX, climat présent)

En Europe du Sud, une tendance à l'assèchement est constatée. La diminution des précipitations est à l'origine de la baisse de l'humidité du sol, les autres paramètres ne variant que peu par ailleurs.

Dans l'Ouest des USA enfin, l'augmentation des précipitations pourraient expliquer les phénomènes observés, à savoir principalement une augmentation de l'humidité.

Sècheresses

Les sécheresses sur la période 1985-2010 puis 1985-2100, ont été étudiées au moyen d'un indice basique. Ce dernier consiste à dire que l'on peut pour un lieu géographique donné, déclarer un mois comme étant en sécheresse si et seulement si la valeur de l'humidité du sol est inférieure au quantile 5 de l'humidité du sol, quantile calculé sur la période 1985-2010. Cette définition est en accord avec les notions présentées en introduction sur les sécheresse et revient à dire que la variable SMI est négative.

Une précision est à apporter ici : idéalement, il faudrait (comme cela a été fait avec les simulations CMIP5) calculer le premier quantile sur l'ère industrielle. Or, les simulations nous l'avons dit, ont été faites sur la période 1950-2100. Ainsi, le premier quantile (le quantile 5) a été calculé sur la période 1985-2010.

Soulignons par ailleurs que l'indice retenu est très basique. Une analyse basée sur d'autres indicateurs de sécheresse pourraient donner des conclusions en désaccord avec celles présentées ici.

Comme nous l'avons mentionné dans la partie introductive, les sécheresses se caractérisent par leur intensité et leur répartition spatiale. Ainsi, afin d'analyser ces phénomènes, nous avons tracé sur la période 1950-2010 puis 1985-2100 pour le climat futur l'intensité moyenne des sécheresses (intensité que nous définissons comme étant la valeur moyenne des SMI déclarés négatifs sur une zone donnée, pour une date fixée), ainsi que la couverture spatiale, c'est à dire pour une date fixée, le pourcentage d'une zone géographique dont la variable SMI est négative.

Les zones étudiées étant dans l'hémisphère Nord, pour des raison d'économies de calcul, il a parfois été préféré de se limiter à l'étude des mois JJAS (juin juillet août septembre), qui correspondent aux mois les plus chauds dans ces régions.

Ci après les résultats de la couverture spatiale des sécheresse sur la période 1985-2010. Les résultats sur l'intensité ne donnant d'analyses complémentaires, ces derniers n'ont pas été mis dans le rapport :

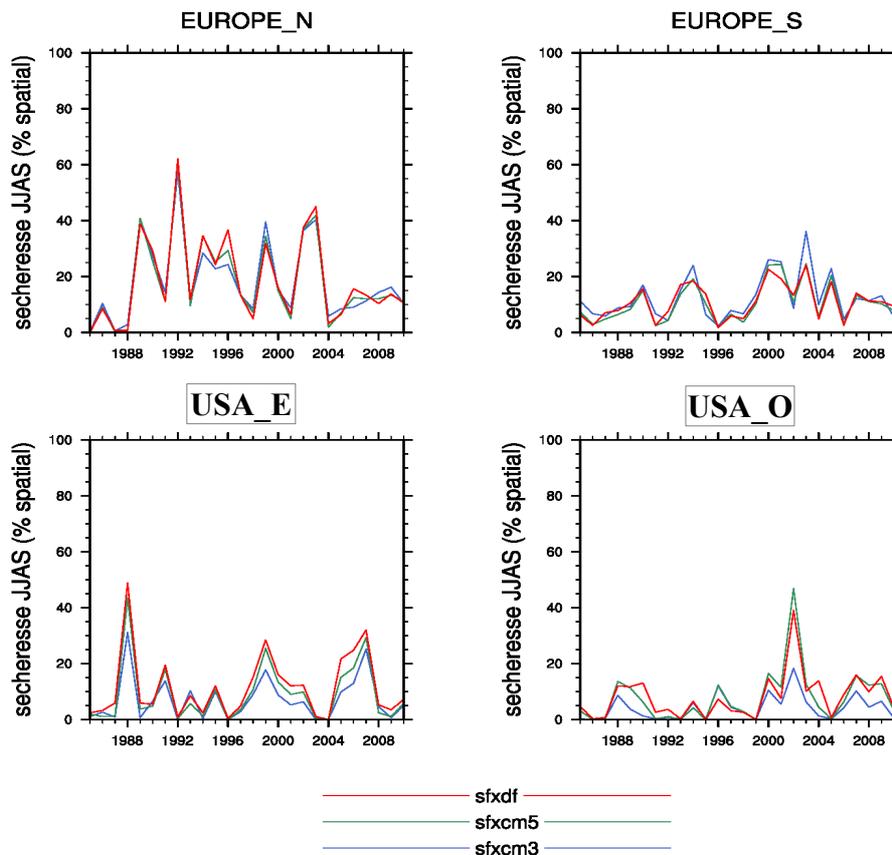


Figure 7 : couverture spatiale des sècheresses donnée par les simulations off-line sur la période 1985-2010, définie comme étant la fraction de domaine déclarée en sècheresse. Le graphe ne prend en compte que les mois JJAS de chaque années.

Les simulations donnent toutes un profil semblable. Toutefois, dans certains cas, des différences significatives sont à noter. Pour l'Ouest des USA par exemple, en 2002, le modèle sfxcm3 annonce que 20 % du domaine est en sècheresse, alors que les deux autres en annonce le double. Bien que ces divergences ne soient pas fréquentes dans les simulations réalisées, les sècheresses étant des phénomènes ponctuels, il est nécessaire de les prendre en considération.

Ainsi, pour les simulations effectuées, selon la physique des modèles, l'analyse des sècheresses diffère. Un même mois en effet, peut être déclarée en état de sècheresse par un modèle, mais pas par les autres. Si les différences notées entre les modèles concernant l'humidité du sol ont été jugées faibles (voir partie confrontations aux observations, évaluation des forçages, paragraphe humidité) l'étude des phénomènes extrêmes tels que les sècheresses semblent ici accentuer les divergences existant entre les modèles.

En conclusion, et cette remarque sera à prendre en compte dans l'étude des sècheresses en climat futur, l'étude des sècheresses par les modèles est relative aux modèles utilisés.

Résumé et conclusions

Du fait des résultats des modèles sfxdf et sfxcm5, qui globalement s'accordent mieux avec les observations que ceux du modèle sfxcm3, cette étude montre l'intérêt de préciser la physique des modèles de surface, en particulier la pertinence de prendre en compte les phénomènes d'hydrologie sous maille. En outre, si ici sfxdf et sfxcm5 donnent des résultats similaires, des expériences réalisées à une échelle plus locale donneraient certainement de meilleurs résultats pour le modèle sfxdf, qui résout les équations de Richards de façon explicite.

Concernant les incertitudes des modèles, comme le montre la comparaison entre les résultats des différentes simulations et les observations, une précision de la physique des modèles permet de corriger certaines divergences existant entre modèles et observations. Pour les simulations réalisées, plus la physique est sophistiquée, plus les simulations se rapprochent des observations.

Les modèles conçus restent cependant éloignés des observations. Cela est dû à des approximations faites par les modèles, en particulier :

- Les simulations ne modélisent pas les aquifères. Or, comme l'ont montré différents travaux ([Vergnes, 2012]) la prise en compte des aquifères dans les modèles de surface améliore significativement la précision des résultats.
- La vitesse d'écoulement donnée par le modèle de routage est supposée constante
- La précision des forçages utilisés peut être améliorée
-

b) Climat futur

Comme nous l'avons dit, les simulations « futures » s'étendent sur la période 1985-2100. Dans cette partie, la qualité du forçage utilisé est discuté, en analysant les résultats sur la période 1985-2010. Dans un deuxième temps, les simulations sont étudiées sur l'intégralité de la période 1985-2100, où le comportement et les divergences des différents modèles en climat futur seront mises en évidence. Nous terminerons par quelques projections suggérées par les résultats des modèles.

Confrontations aux observations, évaluation des forçages

Contrairement aux simulations présentes, où ils étaient basés sur des observations, les forçages ont ici été réalisés avec les sorties d'un modèle couplé. Afin de comparer l'influence du changement du modèle forceur, ainsi que pour comparer les incertitudes des modèles de surfaces à celles des modèles climatiques, deux simulations ont été réalisées, l'une forcée par le modèle CNRM-CM, l'autre par le modèle ipsl, modèles que nous avons déjà rencontré dans les études des modèles CMIP5. Les résultats d'un modèle couplé CMIP5 sont précieux pour forcer les modèles dans le futur, où les observations sont évidemment manquantes. Avant néanmoins d'être utilisés en tant que forçage, les résultats des modèles couplés ont été soumis à une correction des biais par l'intermédiaire de la méthode quantile-quantile.

Afin de tester la qualité du forçage des simulations futures, les simulations présentes et futures se recourent sur la période 1985-2010. Sur cette période, il est attendu que les résultats du forçage soient comparables aux observations.

Ci après le cycle saisonnier des précipitations, calculé sur la période 1985-2010 :

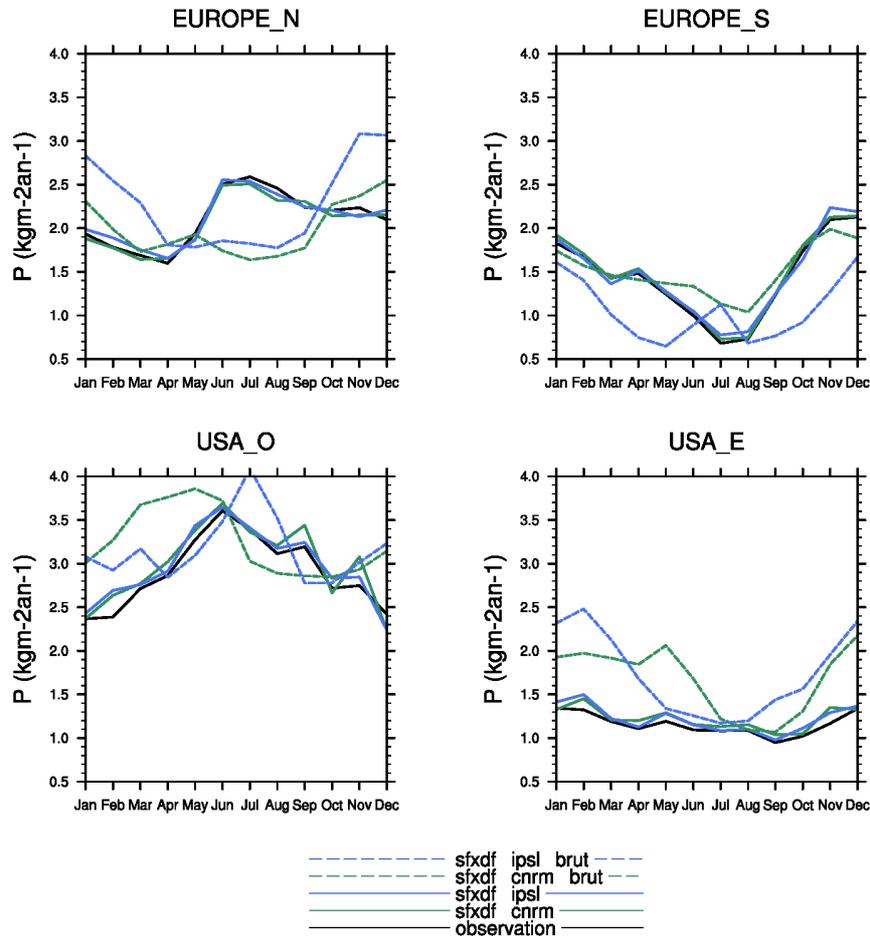


Figure 1 : cycle saisonnier des précipitations du forçage, calculé sur la période 1985-2010.

Les données brutes correspondent aux sorties des modèles. Les autres courbes ont été obtenues après réanalyses et corrections des biais par la méthode quantile-quantile

La figure ci dessus montre que la méthode quantile-quantile est une méthode de correction des biais satisfaisante : alors que les résultats bruts des modèles divergent des observations, les résultats corrigés leur sont plus proches. Cette méthode n'est cependant pas parfaite. Pour des problèmes de calibrations, des biais existent encore entre les résultats et les observations. Ce problème devra être traité dans les années à venir. Les mêmes commentaires sont applicables aux autres variables du forçage.

Humidité du sol

Ayant discuté de la méthode quantile-quantile sur les variables des forçages, examinons maintenant les résultats de l'humidité et des débits rendus par les simulations sur la période 1985-2010.

La figure ci dessous est la superposition des résultats des simulations présentes et des simulations forcées par le modèle CNRM-CM, ainsi que des données de GRACE sur cette période.

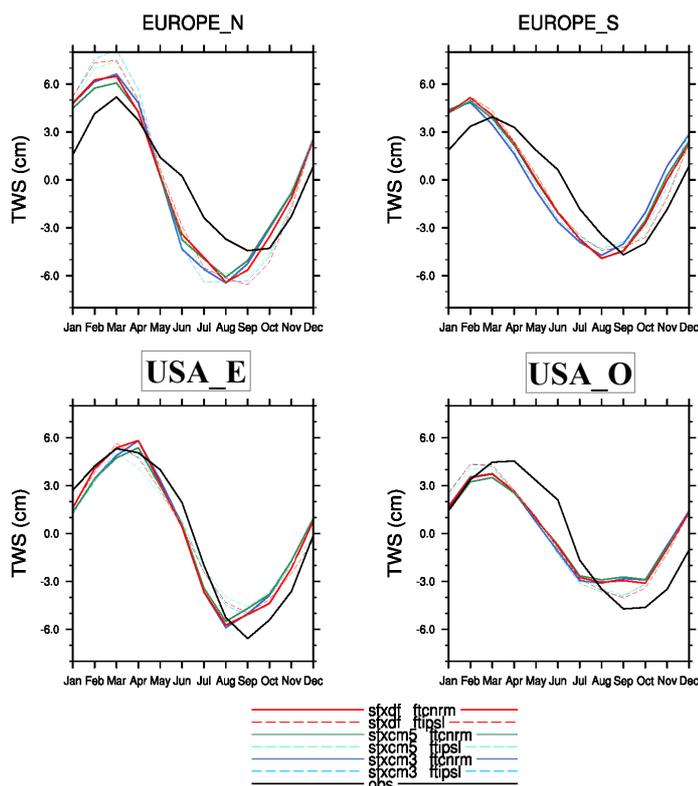


Figure 2 : Cycle saisonnier et comparaisons des résultats de TWS (cm) pour les simulations futures forcées par le modèle CNRM-CM et forcées par le modèle ipsi. Dans tous les graphiques, les résultats de GRACE sont en noir.

On remarque que les résultats de l'humidité pour les simulations en climat futur approchent les observations de façon satisfaisantes.

Par rapport aux simulations en climat présent, (voir annexe, figure 1 de la partie climat futur, paragraphe humidité), les simulations futures forcées par le modèle CNRM-CM approchent moins bien les résultats fournis par GRACE pour les Etats-Unis. Cela est en accord avec le fait que les forçages pour les simulations futures, basés sur les résultats d'un modèle, sont moins précises que les premières. Toutefois, les simulations futures donnent au contraire de meilleurs résultats pour l'Europe. De façon globale, les divergences entre simulations présent et futur sont toutefois relativement faibles. Elles sont par ailleurs dues aux erreurs de calibration persistant dans la méthode quantile-quantile dont nous avons parlé dans le paragraphe précédent.

Débâts

De même que pour l'humidité, ci après les comparaisons des observations, simulations en climat présent et futur :

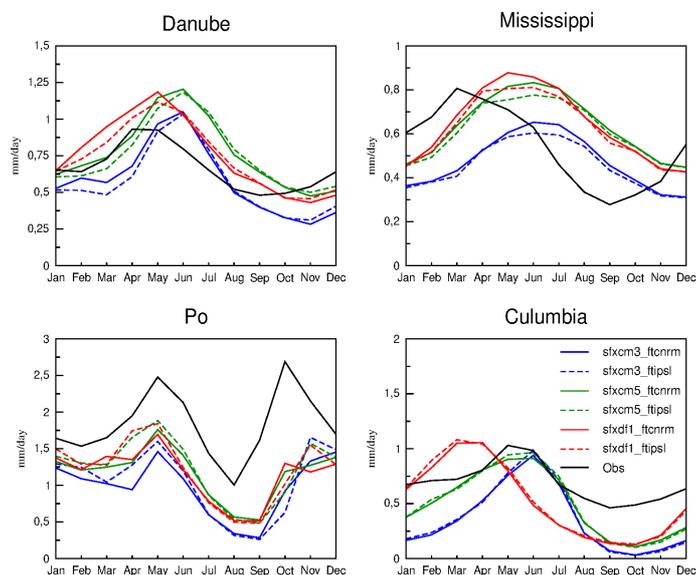


Figure 3 : Comparaisons des débits (en mm/jour) pour les simulations futures forcées par le modèle CNRM-CM et forcées par le modèle ipsl. Dans tous les graphiques, les résultats des observations sont en noir.

De même que pour l'humidité, pour chaque simulation, les résultats des modèles en climat futur pour les deux forçages sont équivalents. Ils approchent par ailleurs de façon convenable les résultats des simulations en climat présent. L'anomalie constatée en climat présent concernant le modèle à diffusion pour le Columbia est toujours présente.

Concernant la comparaison des résultats des simulations en climat futur et en climat présent (voir annexes, figure 2 de la partie climat futur, paragraphe Débâts), de même que pour l'humidité, de faibles divergences existent, dues à des erreurs de calibration dans la méthode de correction des biais.

En conclusion de cette partie, les trois derniers paragraphes sur les variables du forçage, l'humidité du sol et les débits permettent de conclure que les forçages utilisés, bien que moins précis que ceux utilisés dans les simulations présentes, s'accordent avec les observations en climat présent. Si ce résultat ne permet entièrement de valider les forçages et modèles utilisés, il garantit tout de même une certaine cohérence dans les résultats obtenus.

L'analyse des résultats sur la période 1985-2100 est donc pertinente. Dans les projections faites, il faudra toutefois tenir compte des incertitudes dues aux forçages, incertitudes que nous avons mis en évidence dans ce début de partie.

Analyse des résultats sur la période 1985-2100

Ci dessous les résultats de l'humidité du sol pour les trois modèles, forcés par les modèles ipsl et CNRM. Le lecteur trouvera en annexe les résultats pour l'évaporation et le ruissellement :

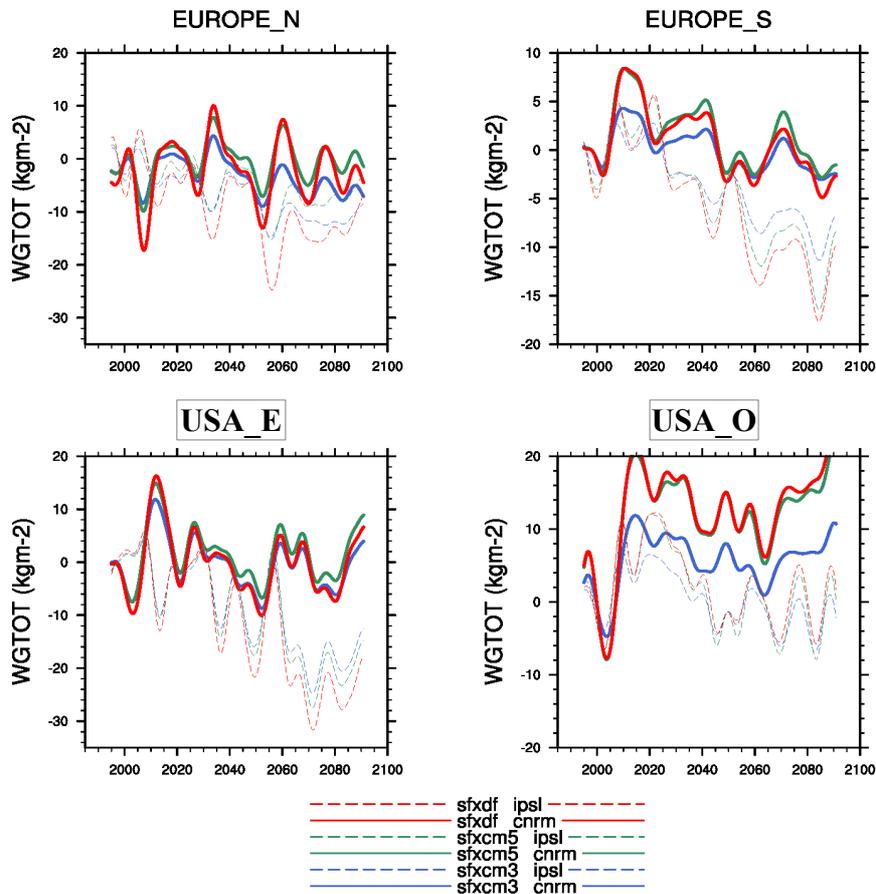


Figure 4 : Humidité du sol (kg/m^2) pour les trois modèles off-line. Les résultats pour les 2 forçages (ipsl et CNRM) sont représentés. Pour plus de lisibilité, les résultats ont été filtrés sur 10 ans.

En terme d'incertitudes, la lecture de la figure ci dessus doit se faire comme suit : les différences entre courbes en trait plein et courbes en pointillées renseignent sur les incertitudes liées aux forçages, c'est à dire à la physique des modèles CMIP5 ; les différences entre les courbes de différentes couleurs renseignent sur les incertitudes liées à la physique des modèles de surface. Ainsi, en règle générale, on remarque que dans les simulations réalisées, les incertitudes liées au modèle forceur sont plus importantes que celles liées à la physique des modèles de surface.

Une remarque est toutefois à apporter pour le cas du Nord de l'Europe et de l'Ouest des USA. Pour ces deux régions en effet, les incertitudes des modèles de surface ne sont pas négligeables devant celles liées au modèle forceur.

Au Nord de l'Europe, cette remarque peut s'expliquer en considérant les résultats de la partie des modèles CMIP5. La figure représentant le SMI en effet, montre que pour l'Europe du Nord, les deux modèles ont un comportement similaire. La similitude des modèles forceurs expliquerait donc les faibles différences entre les résultats obtenues pour l'humidité.

On voit ici les limites de ce stage, qui n'a pris en compte que deux modèles forceurs. La prise en compte de tous les modèles CMIP5 aurait permis de lever le problème précédent.

Pour l'Ouest des USA, pour le forçage CNRM, le schéma sfxcm3 donne un sol nettement plus sec que les deux autres. Les différences sont aussi importantes que celles liées au modèle forceur. Le comportement du modèle sfxcm3 peut s'expliquer : on remarque en effet (voir annexe, figure 3 de la partie climat futur, paragraphe Analyse des résultats sur la période 1985-2100) que globalement, pour les zones étudiées, les résultats donnés par la simulation sfxcm3 sous-estiment le ruissellement par rapport à sfxcm5 et au contraire sur-estiment l'évaporation. La simulation sfxdf se trouve bornée entre les deux autres ; elle reste cependant proche de sfxcm5. Pour l'humidité, qui d'après le bilan d'eau vérifie :

$$dW/dt = P - Q_s - Q_g - ET \quad (1)$$

comme nous le constatons sur la figure ci-dessus, les divergences sur le ruissellement et l'évaporation semblent se compenser sur toutes les zones sauf dans le cas de l'Ouest des USA, où la sur-estimation de l'évaporation donnée par sfxcm3 prime sur le déficit de ruissellement et donne un sol plus sec.

Par ailleurs, constat plus général, déjà observé en climat présent, pour les deux forçages (CNRM-CM et ipsl), pour l'humidité du sol, les variations du modèle de diffusion sont souvent plus grandes que les deux autres. Cela est dû au fait que le modèle de diffusion permet de simuler les remontées capillaires.

Enfin, en termes de comparaisons entre les deux forçages (CNRM et ipsl), on remarque que les humidités diminuent plus rapidement et nettement lorsque les simulations sont forcées par le modèle ipsl. Les résultats des simulations forcées par ce modèle présentent en effet dans toutes les zones un assèchement plus marqué. Ces résultats s'expliquent en considérant les précipitations données par les deux modèles. En effet, à la différence du modèle CNRM-CM, le modèle ipsl projette une nette baisse des précipitations pour les 100 prochaines années, comme le montre la figure ci-après. Les autres variables du bilan d'eau (évaporation et ruissellement, disponibles en annexes), ne présentent quant à elle de différences significatives pouvant expliquer ce phénomène.

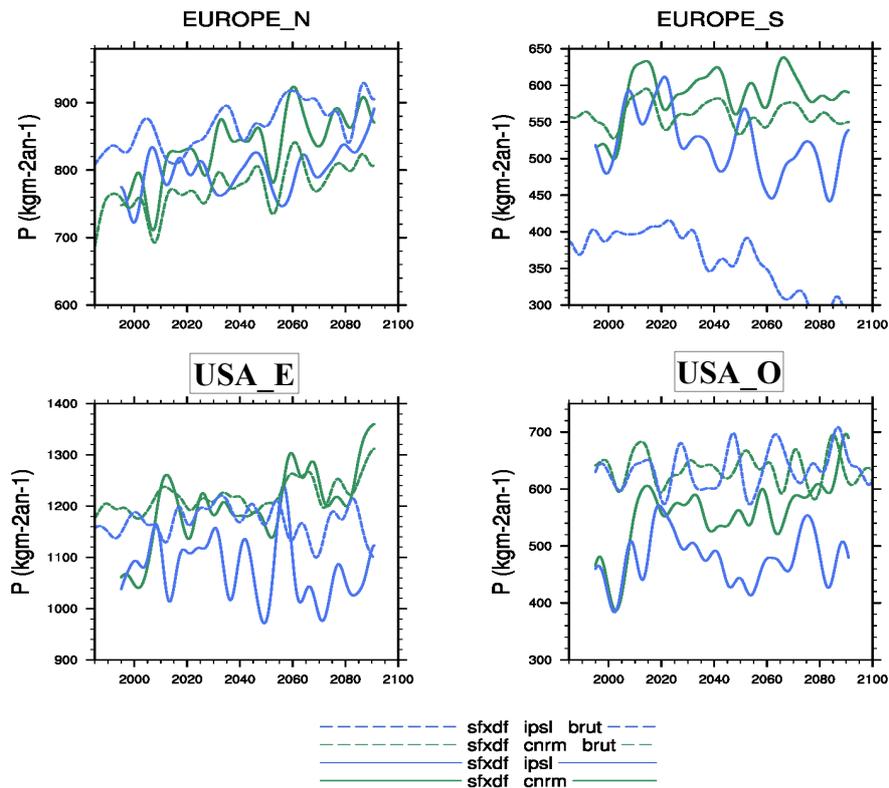


Figure 5 : Précipitations rendues par les modèles CNRM-CM et ipsl. Les données après corrections des biais sont représentées en traits plein.

En conclusion, les divergences observées montrent ainsi l'importance jouée par les forçages dans les résultats des modèles en climat futur. En terme d'incertitude, ce résultat semble montrer que les incertitudes liées à la physique atmosphérique et océanique priment sur celles liées à la physique des surface. Il est toutefois nécessaire de préciser que cette interprétation a été faite suite à des simulation en mode off-line, pour deux modèles forceurs uniquement. Des simulations couplées, avec un nombre plus important de modèles forceur, permettraient de compléter cette analyse.

Sécheresses

Ci après sont présentés deux résultats. Le premier renseigne sur l'évolution de l'intensité des sécheresses selon les modèles, les autres sur l'évolution de leur couverture spatiale.

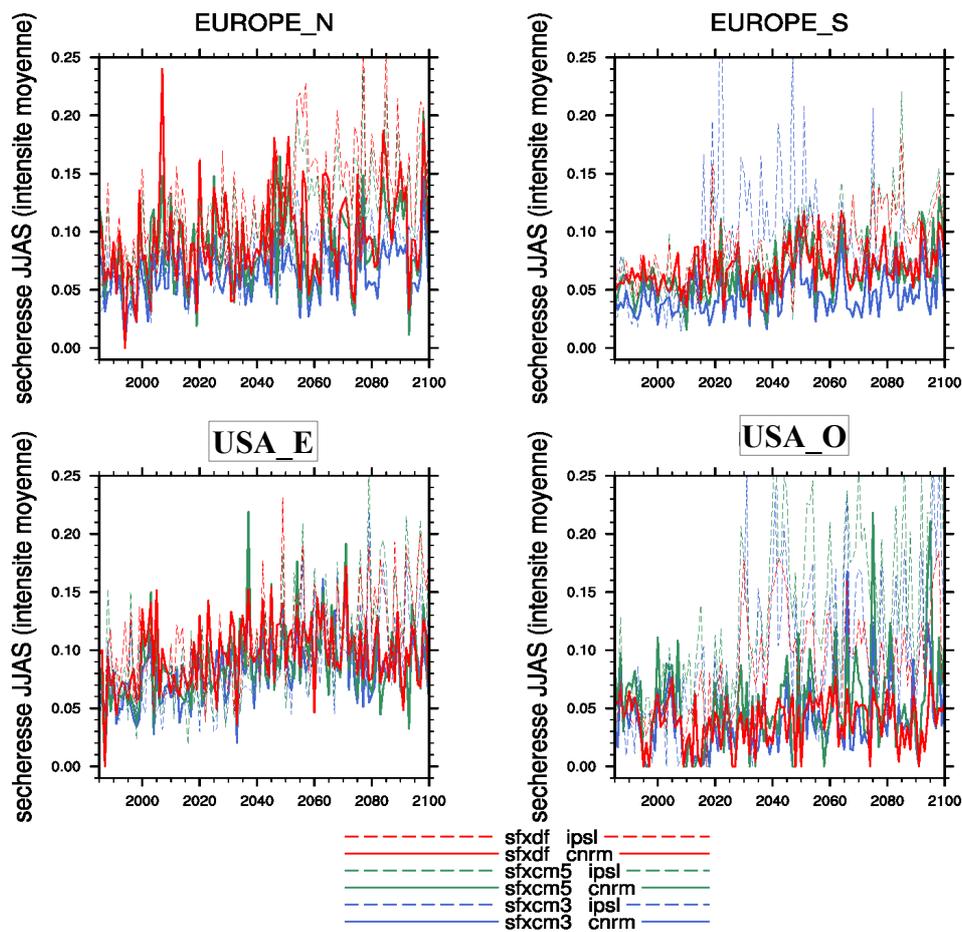


Figure 6 : Intensité des sécheresses donnée par les simulations off-line pour le forçage cnrm. On prend ici l'opposé de la moyenne des SMI négatifs pour chaque année (ce qui correspond à l'intensité moyenne des sécheresses observées la dite année), en période estivale. Les sécheresses étant des phénomènes ponctuels, bien que donnant un graphe chargé, les données n'ont pas été filtrées.

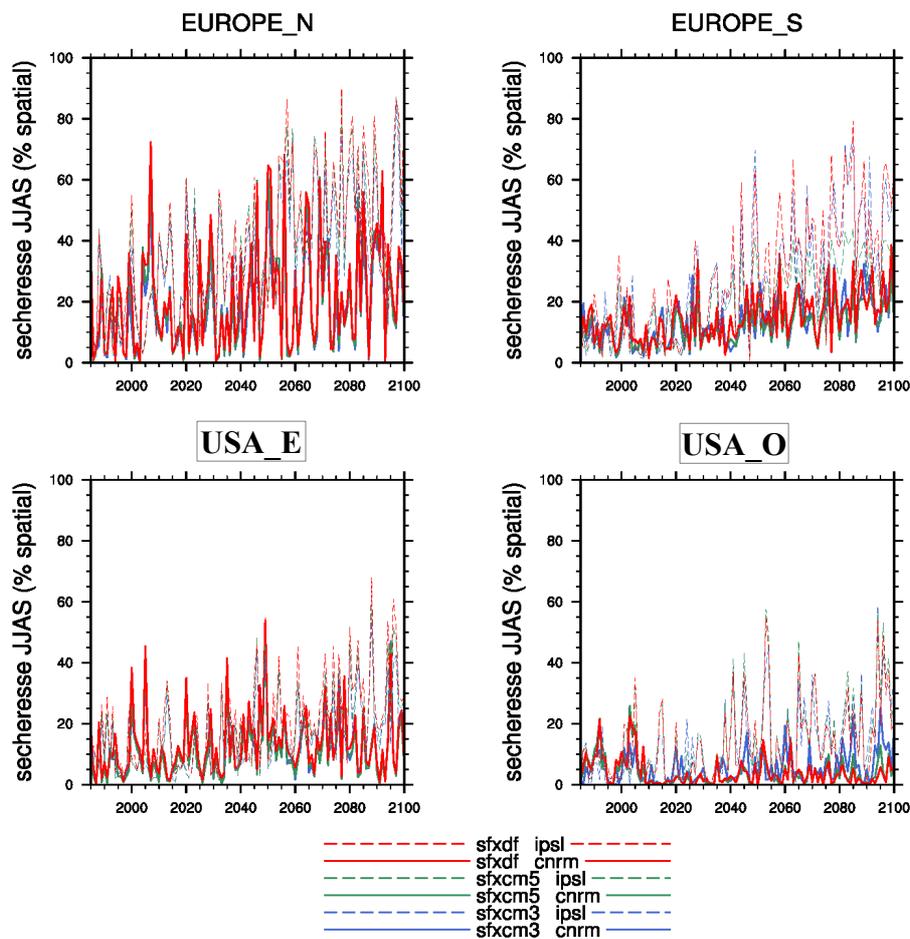


Figure 7 : couverture spatiale des sècheresses sur la période 1985-2100, définit comme étant la fraction de domaine déclarée en sècheresse. Le graphe ne prend en compte que les mois JJAS de chaque années.

Pour les deux dernières figures relatives aux sècheresses, de même que la figure 4 sur l'humidité du sol en climat futur, en termes d'incertitudes, les différences entre courbes en trait plein et courbes en pointillées renseignent sur les incertitudes liées aux forçages, c'est à dire à la physique des modèles CMIP5, tandis que les différences entre les courbes de différentes couleurs renseignent sur les incertitudes liées à la physique des modèles de surface. Ainsi, de même que pour l'étude de l'humidité du sol, on remarque en règle générale que dans les simulations réalisées, concernant l'étude des sècheresses, les incertitudes liées au modèle forceur sont plus importantes que celles liées à la physique des modèles de surface. Ce résultat est toutefois à reconsidérer dans certains cas, où les incertitudes liées aux modèles de surface sont aussi importantes que celles liées au forçages (voir par exemple figure 6, intensité des sècheresses, zone USA_E).

En termes de comparaisons entre les forçages CNRM et ipsl, il a déjà été mentionné que les résultats donnés par le forçage ipsl présentaient une forte tendance à l'assèchement ; cela se note également dans l'analyse des sècheresses : les résultats donnés par le forçage ipsl sont plus sévères en termes de sècheresses que ceux donnés par le forçage CNRM.

Toutefois, bien que l'étude des sécheresses par les modèles soit relative aux modèles utilisés, on remarque malgré les disparités existant entre les modèles, que l'intensité et la fréquence des sécheresses est susceptible d'augmenter dans les quatre zones étudiées, en particulier en Europe du Sud, comme cela a déjà été mentionné dans la partie des modèles CMIP5. Les tendances données par les modèles (non représentées ici par soucis de concision mais calculées par ailleurs), plus ou moins marquées, sont en effet toutes positives.

Résumé et conclusions

Concernant la validité des forçages, la comparaison des résultats corrigés et des observations montre que la méthode quantile-quantile s'avère satisfaisante. Des problèmes de calibration, auxquels il sera nécessaire de remédier dans les années à venir, rend toutefois la méthode imparfaite.

La modification du modèle forceur (ici CNRM-CM ou ipsl), donne des résultats divergents. Dans le cadre de ce stage, il a été montré que les résultats donnés par les modèles forcés par le modèle ipsl présentaient une plus grande tendance à l'assèchement que ceux donnés par les modèles forcés par le modèle CNRM-CM.

En termes d'incertitudes, celles liées à la physique des modèles CMIP5 semblent primer sur celles liées aux modèles de surface. Néanmoins, pour des raisons pratiques, le stage n'a pris en compte que deux modèles forceurs. Une étude plus approfondie pourra reprendre les orientations de ce stage et étudier les résultats pour tous les modèles CMIP5, et différents modèles de surface.

Les conclusions concernant les sécheresses et autres événements extrêmes dépendent des modèles de surface et de leur modèle forceur. Il est toutefois à noter que tous les modèles utilisés ici indiquent une certaine tendance à l'assèchement, en termes d'intensité et de surface concernée, dans les zones étudiées.

VI. Conclusions et perspectives

Les processus hydrologique continentaux jouent un rôle essentiel dans le système climatique global en influençant les échanges d'eau et d'énergie entre les surfaces continentales et l'atmosphère. Du fait de l'actuel réchauffement de la planète, le cycle hydrologique est aujourd'hui modifié. La communauté scientifique a mis en place des modèles globaux permettant d'étudier l'évolution des variables hydrologiques et leur réponse au réchauffement climatique. Ces études ont mis en évidence l'augmentation probable dans le futur de phénomènes extrêmes comme les sécheresses.

Toutefois, malgré les progrès réguliers effectués en matière de modélisation du climat et la résolution croissante des modèles mis en oeuvre pour réaliser des scénarios climatiques du 21ème siècle, les scénarios donnés par les modèles climatiques sont encore entachés de larges incertitudes, en particulier concernant les conséquences hydrologiques du réchauffement global. Au delà des incertitudes liées à l'évolution des concentrations de gaz à effet de serre ou à la variabilité interne du climat, la formulation des modèles (en particulier les paramétrisations physiques rendant compte des processus non résolus à l'échelle d'une maille typiquement de l'ordre de 100 à 300 km de côté) reste ainsi la principale source d'incertitude pour anticiper l'évolution des précipitations, mais plus encore de l'humidité du sol et des risques de sécheresse.

Au sein des modèles de climat, les modèles de surfaces continentales, permettant le calcul du bilan d'énergie et d'eau liquide ou solide en surface, ne représentent pas la principale source d'incertitude, notamment à l'échelle globale où la physique de l'atmosphère (en particulier la rétroaction des nuages) demeure l'une des difficultés majeures. Néanmoins, à l'échelle régionale, la formulation des modèles de surface est aussi une source d'incertitude non négligeable pour les scénarios hydrologiques. Notons que cette source n'a pas pu être explorée de manière approfondie lors de ce stage puisque les 3 versions utilisées du modèle SURFEX du CNRM ne reflètent pas toute la diversité des modèles de surface mis en oeuvre au sein des modèles CMIP5. Par ailleurs, les simulations « off-line » réalisées pendant le stage ne permettent pas de rendre compte des rétroactions des surfaces continentales sur l'atmosphère et du fait que changer la formulation du modèle de surface devrait en toute rigueur se traduire par une modification du forçage atmosphérique. Au delà de ce stage, différents projets européens et internationaux devraient permettre de lever ces difficultés et de mieux apprécier l'influence des surfaces continentales sur les projections climatiques / hydrologiques et sur les incertitudes associées.

Malgré ses limites et ses résultats très préliminaires, ce stage laisse entrevoir un risque croissant de sécheresses estivales aux moyennes latitudes de l'Hémisphère Nord, justifiant de poursuivre l'amélioration des modèles (et des méthodes de calibration) afin de réduire les incertitudes quant à l'amplitude et au rythme de cette tendance inquiétante pour de nombreux secteurs économiques et notamment pour répondre à une demande croissante de denrées agricoles à l'échelle mondiale.

VII. Bibliographie

Le site du CNRM :

<http://www.cnrm.meteo.fr/spip.php?rubrique1>

Présentation du GIEC et des scénarios climatiques :

ONRC : Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Découvrir-les-nouveaux-scenarios.html>

1 A propos de SURFEX

Alkama et al, 2009 : Global Evaluation of the ISBA-TRIP Continental Hydrological System. Part I : Comparison to GRACE terrestrial water storage estimates and in situ river discharges

Alkama et al, 2011 : Trends in Global and Basin-Scale Runoff over the Late Twentieth Century: Methodological Issues and Sources of Uncertainty

Decharme, 2005 : Développement et validation d'une modélisation hydrologique globale incluant les effets sous maille et la représentation des zones inondées

Decharme et al, 2005 : Introduction of a sub-grid hydrology in the ISBA land surface model

Decharme et al, 2009 : Global Evaluation of the ISBA-TRIP Continental Hydrological System. Part II : Uncertainties in river routing simulation related to flow velocity and groundwater storage.

Decharme et al, 2011 : Global off-line evaluation of the ISBA-TRIP flood model

Decharme et al, 2011 : Local evaluation of the interaction between Soil Biosphere Atmosphere soil multilayer diffusion scheme using four pedotransfert fonctions

Decharme et al, 2013 : Reconciling soil thermal and hydrological lower boundary conditions in land surface model

Le Moigne et al, 2009 : Surfex scientific documentation

Masson et al, 2012 : The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or off-line simulation of earth surface variables and fluxes

Nash, J et J Sutcliffe (1970) River flow forecasting through conceptual models part 1

Noilhan et al, 1988 : A simple parameterization of land surface processes for meteorological models

Vergnes et al, 2011 : A simple Groundwater scheme for hydrological and Climate Applications:Description and off-line Evaluation over France (Sur la prise en compte d'un modèle aquifère

Vergnes, 2012 : Développement et modélisation hydrologique incluant la représentation des aquifères : évaluation sur la France et à l'échelle globale

2 A propos des évènements climatiques extrêmes

Dai, 2010 : Drought under global warming: a review

Dai, 2012 : Characteristic and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900-2008

Douville et al, 2006 : On the tropical origin of uncertainties in the global land precipitation response to global warming

Douville et al, 2012 : Anthropogenic influence on multidecadal changes in reconstructed global evapotranspiration

Hunt et al,2008 : The development and evaluation of a soil moisture index

Joetzjer et al, 2013 : Hydrologic benchmarking of meteorological drought indices at interannual to climate change timescales: a case study over the Amazon and Mississippi river basins

Norwegian meteorological institute, 2013 : Extreme weather events in Europe : preparing for climate change adaptation

Sheffield et al, 2008 : Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations

Sheffield et al, 2012 : Little change in global drought over the past 60 years

Trenberth, 2011 : Changes in precipitation with climate change

VIII. Annexes

1 Le langage NCL

Les graphiques présentés dans ce rapport ont été réalisés au moyen de NCAR Command Language, un langage de programmation à usage scientifique, prenant en entrée des fichiers NetCDF (Network Common Data Language), fichiers directement fournis par les résultats de simulations, et renvoyant divers types de graphiques (pour plus d'informations : <http://www.ncl.ucar.edu>).

2 Les modèles CMIP5

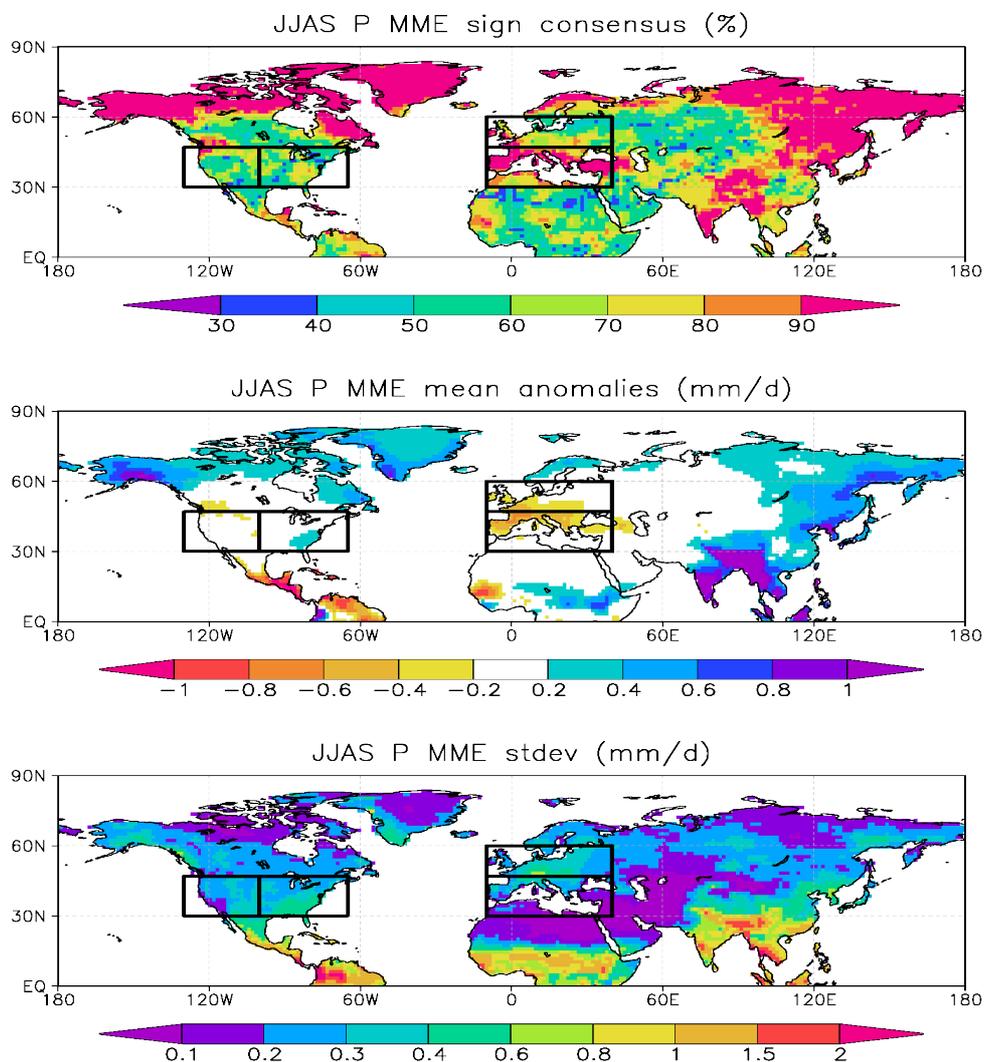


Figure 1 : Précipitations pour les MME (multi model ensemble) CMIP5. La première carte représente le niveau de consensus au niveau du signe des anomalies données par les modèles, la deuxième la moyenne des anomalies climatiques attendues, la dernière un écart type. Les quatre zones étudiées sont mises en évidence

3 Les simulations off-line

a) Climat présent

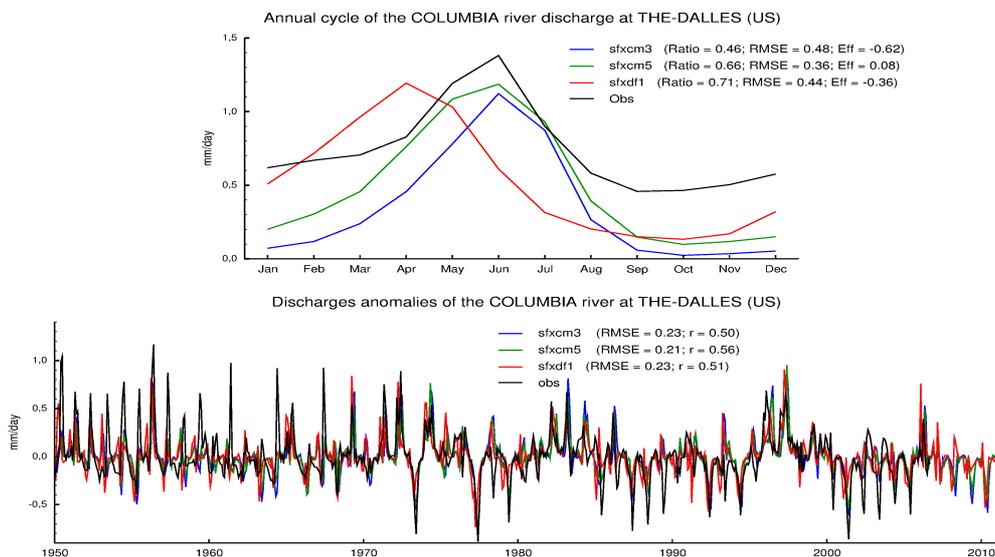


Figure 1 : Confrontation des débits simulés par SURFEX aux observations pour le Columbia sur la période 1950-2010. On note l'anomalie du modèle à diffusion.

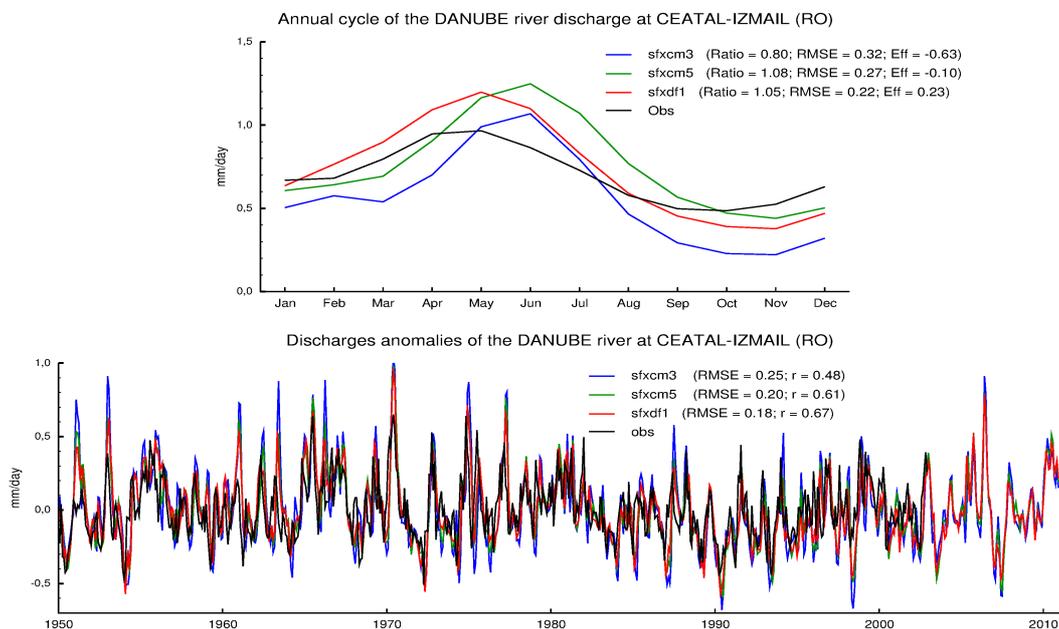


Figure 2 : Confrontation des débits simulés par SURFEX aux observations pour le Danube sur la période 1950-2010

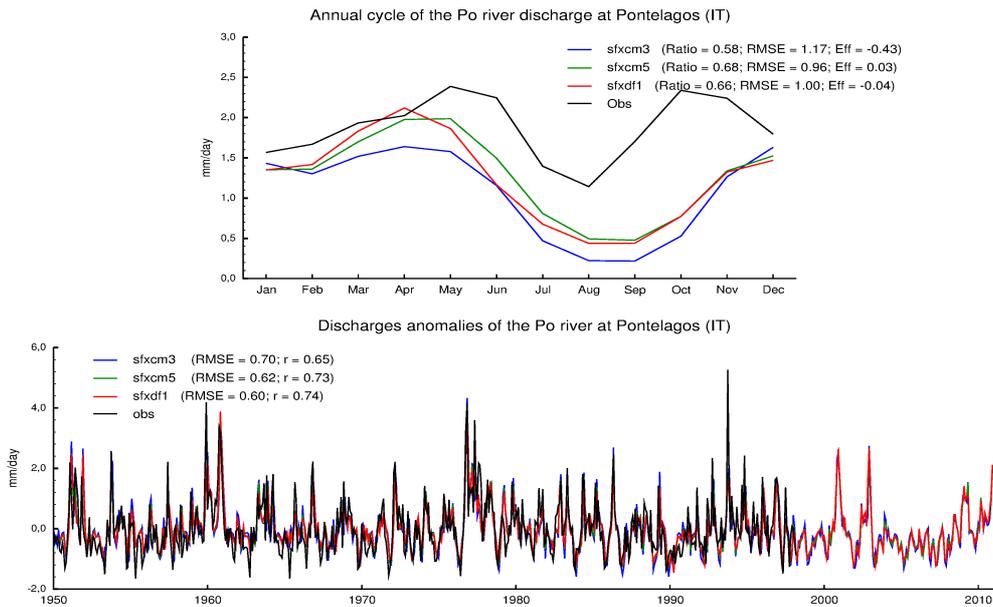


Figure 3 : Confrontation des débits simulés par SURFEX aux observations pour le Pô sur la période 1950-2010

Ci après les évolutions de l'humidité du sol, de l'évaporation, du ruissellement et des précipitations des modèles off-line en climat présent. Les résultats ont été filtrés sur deux ans :

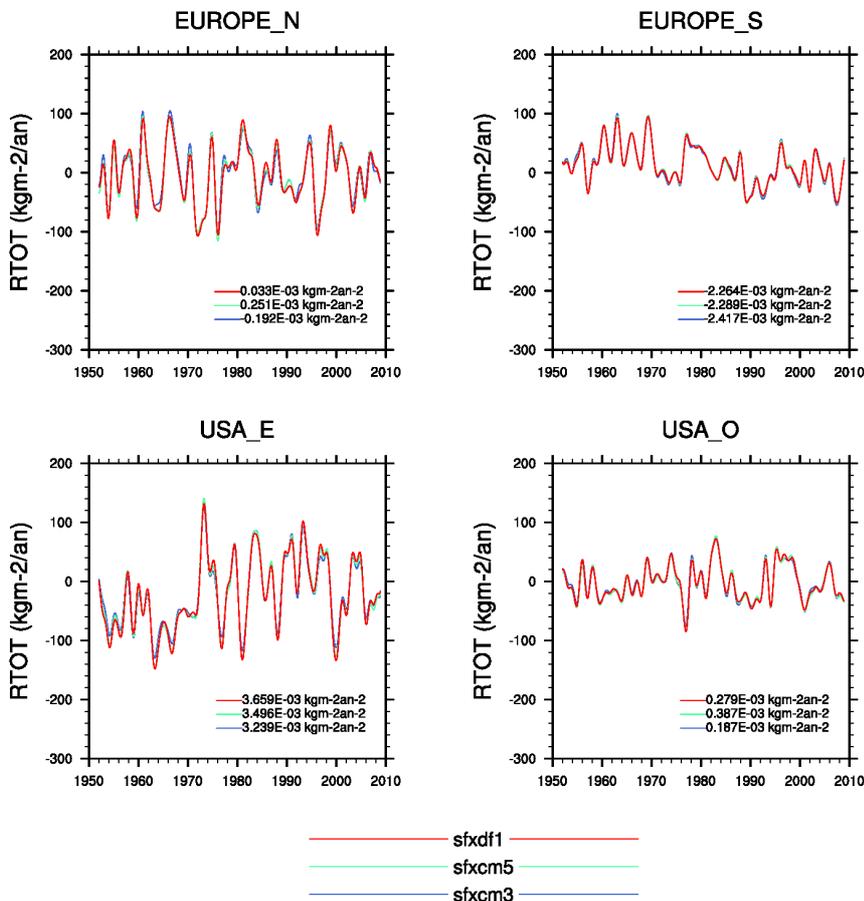


Figure 4 : Evolution du ruissellement en climat présent pour les trois simulations off-line. Les résultats sont filtrés sur 2 ans.

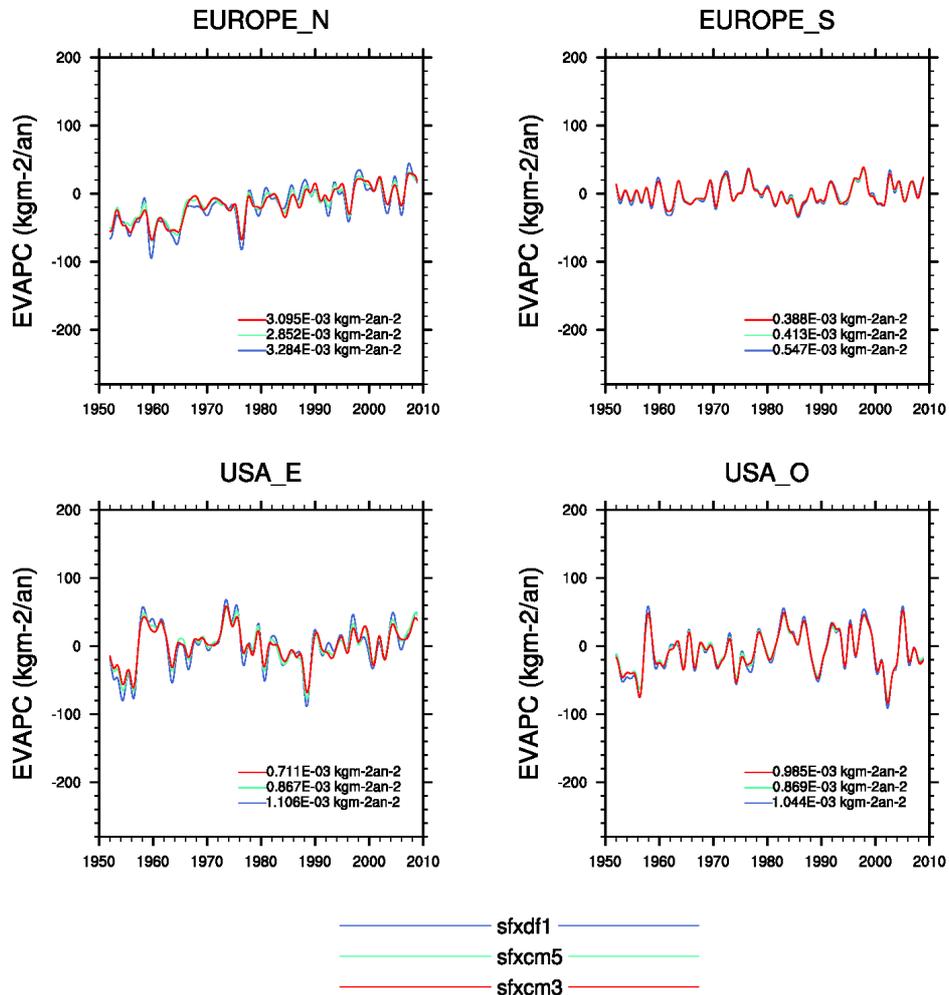


Figure 5 : évolution de l'évaporation en climat présent pour les trois simulations off-line. Les résultats sont filtrés sur 2 ans.

b) Climat futur

Ci après l'évaporation et le ruissellement des simulations off-line en climat futur, forcées par les modèles cnrm et ipsl. Les résultats ont été filtrés sur 10 ans.

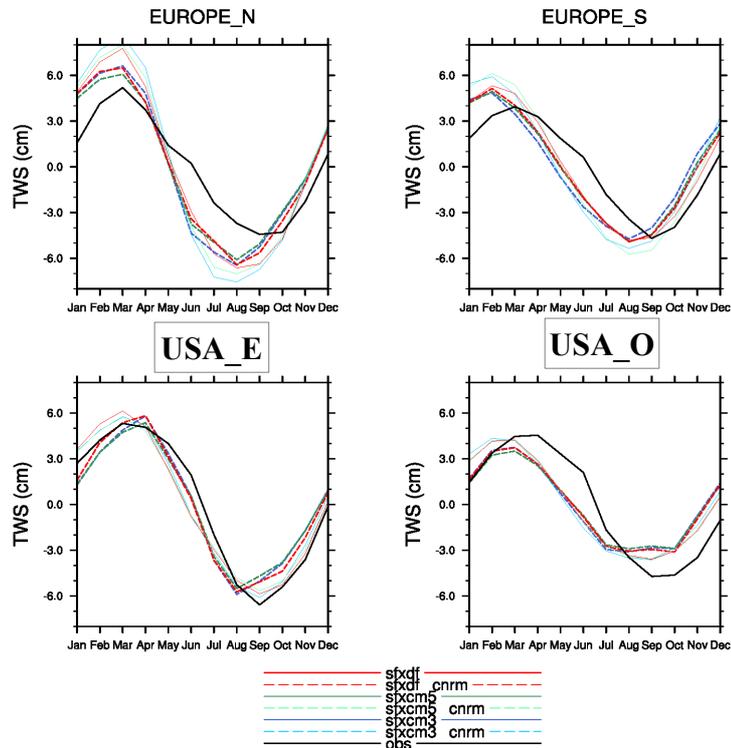


Figure 1 : Comparaisons des résultats de TWS (cm) pour les simulations présentes et futures forcées par le modèle CNRM-CM. Dans tous les graphiques, les résultats de GRACE sont en noir. Les divergences entre les simulations sont dues aux erreurs de calibration dans l'application de la méthode quantile-quantile.

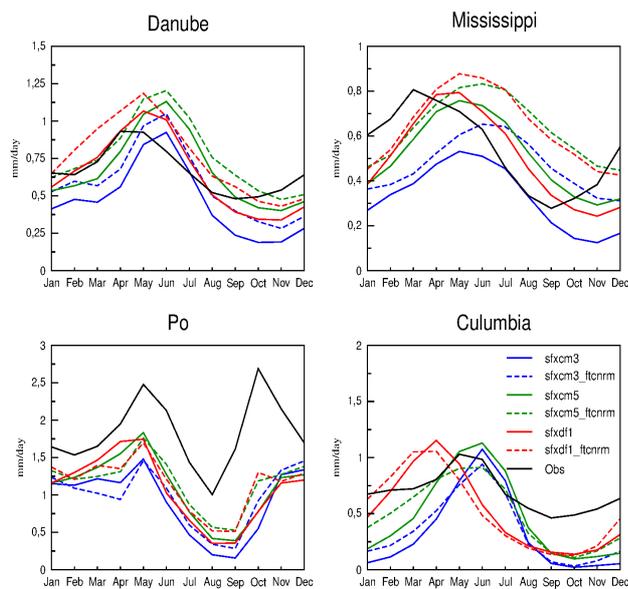


Figure 2 : Comparaisons des débits (en mm/jour) pour les simulations présentes et futures forcées par le modèle CNRM-CM. Dans tous les graphiques, les résultats des observations

sont en noir. Les divergences entre les simulations sont dues aux erreurs de calibration dans l'application de la méthode quantile-quantile

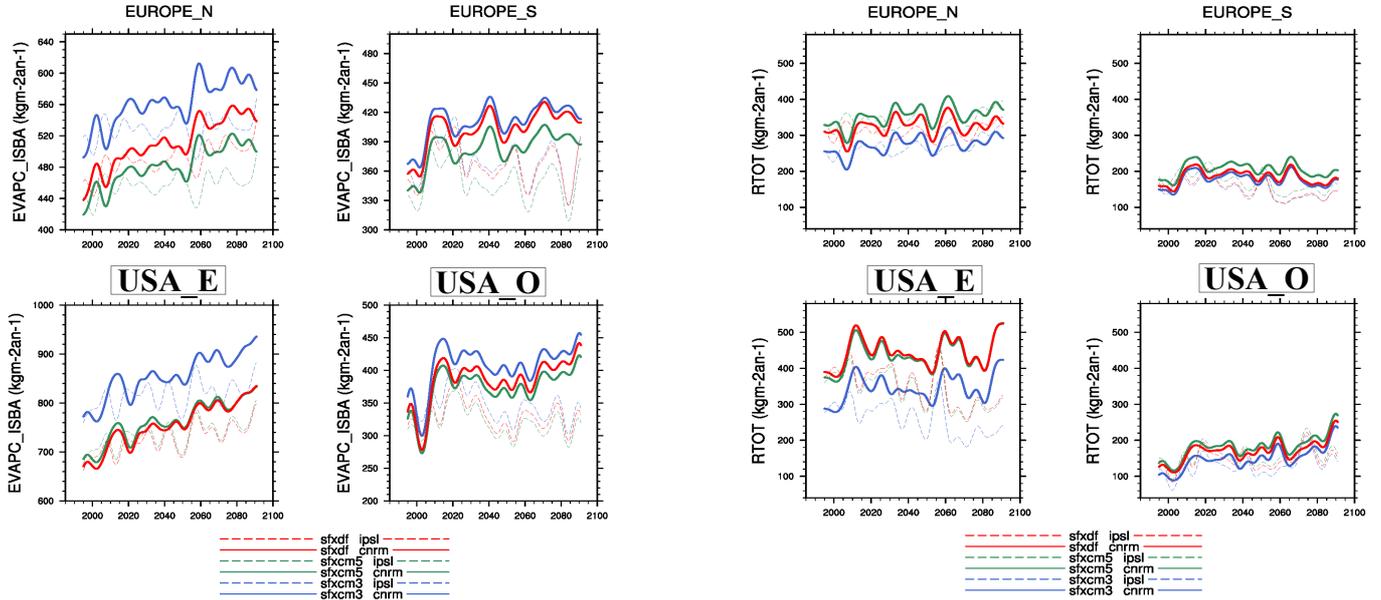


Figure 3 : évolution de l'évaporation (gauche) et du ruissellement (droite) en climat futur pour les trois simulations off-line