



Modélisation du bilan d'énergie des forêts boréales et tropicales : Évaluation du schéma ISBA-MEB de l'échelle locale à l'échelle globale.



Figure 1: Tour de mesure du site canadien OAS du programme BERMS

Rapport de Projet de Fin d'Études

LAUNAY Léa

Encadré par : DECHARME Bertrand (CNRM/GMGEC/EST)
BOONE Aaron (CNRM/GMME/SURFACE)

1^{er} Février 2021 – 30 Juillet 2021

ÉCOLE NATIONALE DE LA METEOROLOGIE
CENTRE NATIONAL DE RECHERCHES METEOROLOGIQUES

Promotion 2018-2021

12/08/21

Table des matières

Introduction.....	1
I. Description des modèles.....	4
A. ISBA.....	4
1. Schéma actuel.....	4
2. Résultats obtenus actuellement.....	5
B. ISBA-MEB.....	7
1. Schéma.....	7
<i>a. Canopée.....</i>	<i>7</i>
<i>b. Litière.....</i>	<i>7</i>
2. Résultats attendus.....	8
II. Description des données.....	9
A. Sites canadiens.....	9
B. Sites amazoniens.....	10
C. Échelle globale.....	10
1. Les forçages atmosphériques.....	10
2. Les observations.....	11
i. Neige.....	12
ii. Évapotranspiration.....	12
III. Résultats.....	14
A. L'échelle locale.....	14
1. Sites canadiens.....	14
<i>a. Hauteur de neige.....</i>	<i>14</i>
<i>b. Dernier jour de neige.....</i>	<i>15</i>
<i>c. Flux.....</i>	<i>15</i>
2. Sites amazoniens.....	16
<i>a. Les flux.....</i>	<i>16</i>
<i>b. Tests de sensibilité.....</i>	<i>18</i>
i. Transmission.....	19
ii. Coefficient d'atténuation du moment.....	19
B. L'échelle globale.....	20
1. Neige.....	20
2. Évapotranspiration.....	22
3. Fraction évaporative.....	24
Conclusion.....	28
IV. Bibliographie.....	30
V. Index.....	31

Remerciements

En premier lieu, je voudrais remercier Bertrand pour tout le temps qu'il a passé à m'expliquer et m'apprendre des trucs, notamment sur ISBA. Il a réussi à me montrer qu'on pouvait s'investir et contribuer à un projet intéressant même pour un stage de 6 mois seulement.

Je voudrais également remercier Aaron pour son temps. Recevoir des explications sur ISBA-MEB directement d'un de ses développeurs s'est avéré vraiment enrichissant.

Je tiens aussi à remercier mes collègues stagiaires et thésards du CNRM qui ont rendu les pauses café et les déjeuners si agréables.

Résumé

L'option ISBA-MEB est une nouvelle option du schéma ISBA (composante sol et végétation de SURFEX, modèle de surface du CNRM) qui permet la représentation explicite de la végétation haute dans ISBA, c'est à dire des forêts. Cette option permettra de corriger certaines limites du schéma actuel comme, par exemple, la fonte trop précoce de la neige printanière sous les forêts boréales. Cette fonte trop précoce est la résultante de la non-représentation dans ISBA de l'effet d'ombrage des grands arbres sur le manteau neigeux.

Les résultats présentés ici rapportent l'évaluation du comportement du nouveau schéma ISBA-MEB. Tant à l'échelle locale que globale en mode offline, c'est à dire en utilisant des forçages atmosphériques observés ou issus de réanalyses. Au niveau des forêts boréales, ISBA-MEB propose bien une amélioration du timing de la fonte de la neige. Sur les forêts tropicales, après l'ajustement d'un paramètre à une valeur plus adaptée à cet environnement, une amélioration de la représentation des différents flux d'énergie est également mise en avant. Enfin, à l'échelle globale, ISBA-MEB apporte également une meilleure représentation du comportement du manteau neigeux et de l'évapotranspiration par rapport à ISBA. Au-delà de ce stage, il sera intéressant d'évaluer les performances d'ISBA-MEB en mode couplé avec le modèle atmosphérique CNRM-CM6.

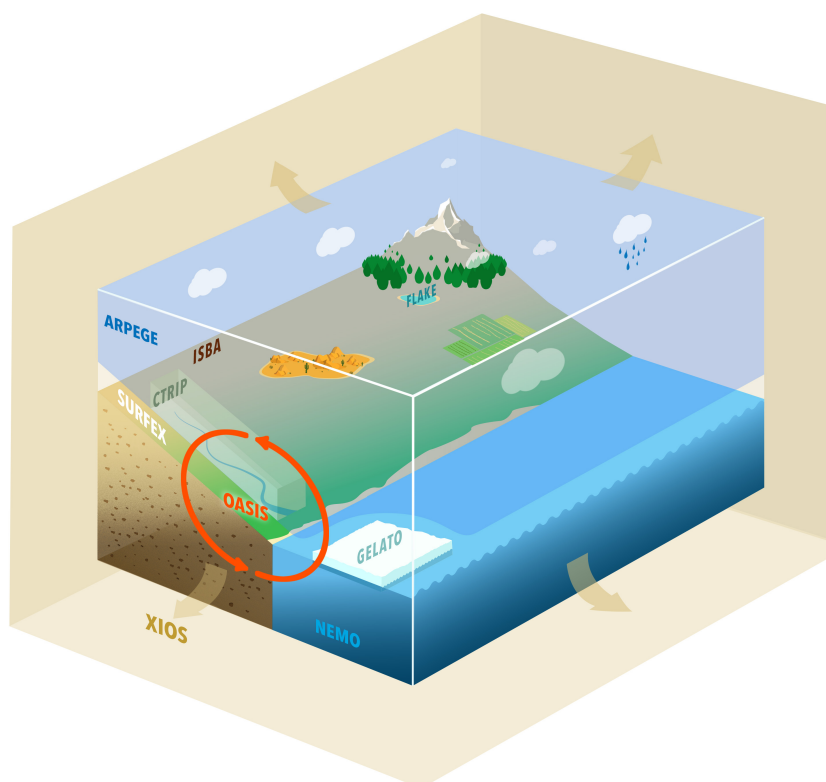
Introduction

Le système climatique terrestre regroupe plusieurs composantes dont les principales sont l'atmosphère, les surfaces continentales, les océans et la biosphère. Le climat est la résultante de toutes les interactions entre les composantes de ce système que ce soit en termes d'échange d'eau, de chaleur ou d'énergie. La source essentielle d'énergie apportée au système provient du rayonnement solaire incident. L'évolution du climat au cours du temps se fait notamment sous l'effet de processus d'échange internes au système comme le cycle de l'eau (qui regroupe les transferts entre les océans, l'atmosphère ou la végétation par évaporation, transpiration ou précipitation) ou encore l'effet de serre (qui en piégeant l'énergie réémise par la surface dans l'atmosphère, augmente la température de surface de la Terre). L'ensemble de ces processus constitue la variabilité interne du climat. Le climat peut aussi évoluer sous l'influence de contraintes ou forçages externes qu'ils soient naturels ou anthropiques. L'activité volcanique et les rejets d'émissions qui, lors de fortes éruptions, peuvent faire diminuer la température globale terrestre de quelques degrés sur plusieurs années, sont un exemple de forçage externe d'origine naturelle. La variabilité de l'énergie solaire reçue par la Terre est aussi un mécanisme de forçage naturel, que ce soit dû aux variations de l'orbite terrestre ou aux éruptions solaires. Au contraire, les forçages anthropiques regroupent les activités humaines ayant un impact sur le climat comme la modification de la nature des sols avec la présence de villes ou la déforestation (modifiant les capacités d'un sol à chauffer ou à retenir l'eau par exemple) ou encore les émissions supplémentaires de gaz à effet de serre causées par les industries, les transports ou encore l'élevage.

Bien que l'évolution naturelle du système climatique soit surtout pilotée par l'atmosphère et l'océan, les continents – qui représentent 30 % de la surface de la Terre – sont de plus en plus considérés comme un acteur important de ce système. Les modèles de surface développés aujourd'hui représentent les échanges entre les surfaces continentales et les autres composantes du système climatique en fonction du type de sol (cultures, forêts, désert...) et des ses caractéristiques (albédo, rugosité, topographie...). Les caractéristiques locales de la surface comme le type de végétation ou l'albédo vont fortement moduler la fraction d'énergie absorbée par le sol ou celle réfléchie vers l'atmosphère et ainsi jouer sur le bilan d'énergie à l'interface continent-atmosphère. Selon la topographie et le type de végétation, les surfaces continentales peuvent également induire des frottements en surface qui vont avoir un impact sur la couche limite atmosphérique. Les surfaces peuvent aussi influencer le cycle continental de l'eau avec l'effet de la topographie qui va canaliser les eaux de pluies vers les rivières et déterminer leur débit en fonction de la pente, ou encore la présence de végétation qui va augmenter l'évapotranspiration continentale. Les surfaces continentales ont ainsi un impact à la fois sur le bilan d'énergie à l'interface sol-atmosphère, sur l'atmosphère de basse couche mais aussi sur le bilan hydrologique continental. Leur représentation devient donc aujourd'hui essentielle dans la modélisation du climat global.

Les modèles de climat ont pour objectif de simuler le fonctionnement du système climatique afin de mieux comprendre son évolution et sa variabilité. Depuis plusieurs années, le CNRM et le CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique) développent en collaboration des modèles de circulation générale couplés atmosphère-océan. Ces modèles se basent sur un couplage (via un outil nommé OASIS), entre plusieurs composantes développées de manière indépendante comme ARPEGE-Climat, qui inclut le schéma ISBA pour les surfaces continentales, avec le modèle océanique OPA. Ils sont progressivement enrichis avec l'ajout de nouvelles composantes comme la plateforme de modélisation SURFEX, le schéma de routage des rivières TRIP, ou encore le modèle de glace de mer GELATO (Figure 2). Le modèle actuellement développé pour la sixième phase du Projet d'Intercomparaison des Modèles Couplés, s'appelle CNRM-CM6-1. Il participe ainsi à l'exercice CMIP6 et à la rédaction du sixième rapport du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat).

En comparaison avec son prédécesseur CNRM-CM5.1, le modèle CNRM-CM6-1 a connu un certain nombre d'améliorations, notamment au niveau de l'atmosphère et des surfaces continentales (Voltaire et al. 2019). Il comprend maintenant la version 6.4 d'ARPEGE-Climat et la version 8.0 de SURFEX, versions dont les paramétrisations physiques ont été entièrement revues. Les autres modèles composant le système ont également été mis à jour dans leur dernière version et ont subi quelques changements. L'ensemble surface-atmosphère formé par ARPEGE-Climat et SURFEX est lui-même couplé à la version 3.6 de NEMO pour l'océan, à la version 6 de GELATO pour la glace de mer et une nouvelle version de TRIP (Total Runoff Integrating Pathways) développée au CNRM et donc appelée CTRIP, pour le routage des rivières. Le logiciel de couplage a également été mis à jour vers la version OASIS3-MCT. Avec toutes les améliorations apportées, CNRM-CM6 devrait mieux représenter le système climatique que son prédécesseur, que ce soit au niveau de son état moyen ou de sa variabilité.



CNRM-CM

Figure 2: Schéma du modèle de climat CNRM-CM6-1. D'après Voltaire et al. 2019

La représentation des surfaces continentales dans le modèle de climat CNRM-CM6-1 a récemment subi beaucoup de changement avec, entre autre, le nouveau couplage ISBA-CTRIP (Decharme et al. 2019). La modélisation des continents avec ISBA a été améliorée par la résolution explicite du transport de la chaleur et de l'eau dans le sol et le manteau neigeux. La modélisation des débits et routage des fleuves avec CTRIP (version CNRM du modèle TRIP) a également été remanié avec le calcul dynamique de la vitesse d'écoulement et l'affinement de sa résolution. Le couplage entre les deux modèles (rendu possible grâce à une interface de couplage standardisée dans SURFEX), a présenté des performances supérieures aux modèles précédents, notamment au niveau de la représentation des débits et crues des grands fleuves et de leur variabilité saisonnière.

Malgré les améliorations récentes apportées par la représentation multi-couches du sol et du manteau neigeux, le schéma utilisé actuellement dans ISBA atteint progressivement ses limites. En effet, le schéma composite sol-végétation proposé dans ISBA ne permet pas de représenter la végétation haute dans le modèle et ne permet ainsi pas de représenter correctement les forêts. Or sans la représentation des forêts, il

est par exemple impossible de modéliser l'effet d'ombrage des grands arbres des forêts boréales sur le manteau neigeux et le fait que la présence d'arbres va limiter le rayonnement arrivant en surface, retardant ainsi la fonte de la neige. A cause de cette limitation, la fonte du manteau neigeux au printemps sera donc précocée de deux à trois semaines (Decharme et al. 2019).

Pour résoudre ces limitations, le nouveau schéma ISBA-MEB propose une représentation explicite de la végétation en calculant des bilans d'énergie distincts pour le sol, la neige et la végétation (Boone et al. 2017). Cette option laisse donc la possibilité de représenter une couche de végétation haute découplée du sol et du manteau neigeux, ce qui permettra de mieux simuler le comportement du manteau neigeux sous les forêts et corrigera donc potentiellement le problème de la fonte trop précocée de la neige printanière au niveau des régions boréales. L'objectif du développement d'ISBA-MEB est donc de représenter proprement la végétation haute dans ISBA et d'ainsi pouvoir corriger certaines limitations causées par le schéma actuel. Une description détaillée des schémas ISBA et ISBA-MEB sera faite en première partie de ce rapport.

L'objectif final de mon projet de fin d'étude est d'évaluer ISBA-MEB à l'échelle globale afin de pouvoir, par la suite, remplacer le schéma actuel ISBA par ISBA-MEB à l'échelle globale dans la future version de SURFEX puis de manière opérationnelle.

Pour cela, j'ai tout d'abord réalisé des études locales sur le comportement d'ISBA-MEB sur des sites forestiers : (1) sur des sites situés en forêt boréale où une étude montrait déjà une amélioration des performances du modèle avec ISBA-MEB par rapport à ISBA (Napoly et al. 2020) ; et (2) sur des sites localisés en forêt tropicales où ISBA-MEB n'a jamais été testé auparavant. Enfin, j'ai aussi évalué le comportement d'ISBA-MEB à l'échelle globale en mode offline. Il était initialement prévu de le tester dans ARPEGE-Climat – donc couplé à l'atmosphère – mais le couplage entre les deux modèles a généré des instabilités qui ne m'ont pas permis de réaliser des expériences. Notons que c'était la première fois qu'ISBA-MEB était couplé à ARPEGE-Climat et que le travail pour comprendre et corriger ces instabilités numériques vont bien au-delà de mon stage et de mes compétences.

Dans ce rapport, vous trouverez donc au préalable une description du cadre numérique avec la présentation des schémas ISBA et ISBA-MEB. Vous trouverez ensuite une description des données utilisées, que ce soit les données d'observations exploitées pour la comparaison aux modèles ou les différents produits de forçage. Pour finir, les résultats seront rassemblés dans une troisième et dernière partie en commençant par ceux concernant l'étude locale sur les forêts boréales puis tropicales et enfin les résultats de l'étude globale en mode offline.

I. Description des modèles

A. ISBA

Pour commencer, afin de mieux comprendre les améliorations apportées par ISBA-MEB, je vous propose une description du schéma ISBA utilisé actuellement.

1. Schéma actuel

SURFEX est la plateforme de modélisation de surface développée au CNRM. Elle inclut 4 modèles distincts : TEB qui modélise les processus des zones urbanisées, FLAKE ceux des lacs, ECUME pour les mers et océans et enfin ISBA, qui simule les transferts d'eau et de chaleur entre sol, végétation, neige ainsi que l'hydrologie artificielle comme le ruissellement ou le drainage. La plateforme SURFEX est dite externalisée car elle peut s'utiliser à la fois en mode offline (c'est à dire en autonomie) ou en mode couplé avec un autre modèle atmosphérique ou hydrologique (c'est à dire deux modèles capables de rétroagir l'un avec l'autre de manière plus réaliste).

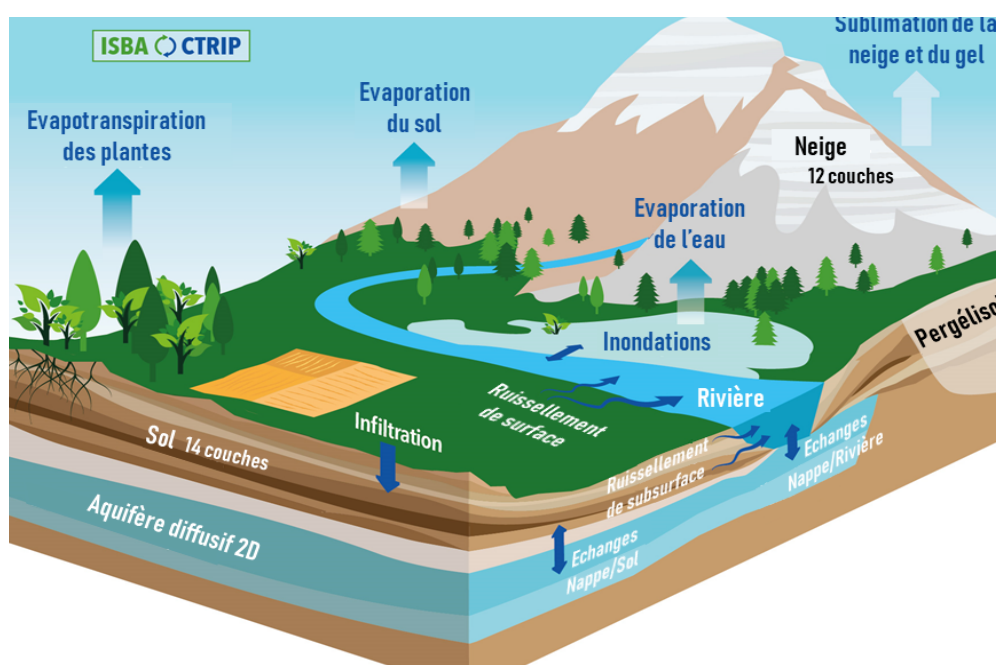


Figure 3: Schéma du cycle continental de l'eau actuellement utilisé dans ISBA. D'après Decharme et al. 2019

La modélisation des surfaces continentales dans les modèles de climat a beaucoup évolué au cours du temps et ISBA a subi beaucoup de changements et d'amélioration depuis sa création (Decharme et al. 2020). La version d'ISBA la plus récente (Figure 3) propose ainsi une représentation multi-couches de la neige et du sol. Le sol est ainsi découpé en 14 couches de propriétés différentes, de la surface jusque 12m de profondeur et d'épaisseur croissante avec la profondeur. Dans la même idée, une représentation du manteau neigeux en 12 couches a également été développée.

Ce schéma multi-couches permet d'avoir une modélisation assez fine dans le premier mètre du sol et dans la zone racinaire, essentielle pour les processus hydriques et thermiques en surface, tout en conservant un coût numérique et un temps de calcul raisonnables. De plus, la résolution de l'équation de la chaleur jusqu'à une profondeur de 12 mètres permet de mieux simuler le profil de température dans le premier mètre du sol.

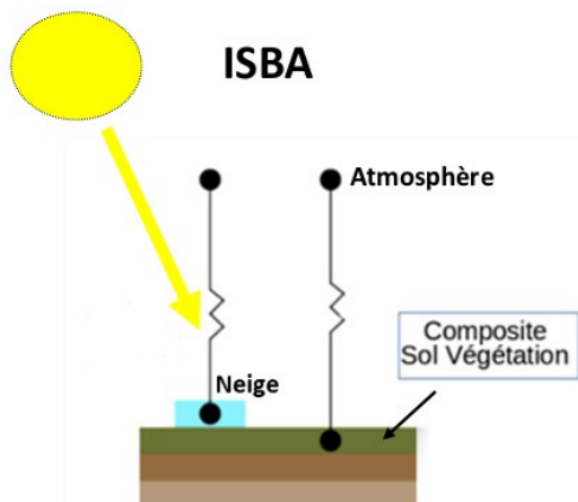


Figure 4: Schéma d'ISBA en période de neige sur un site forestier. D'après HDR Decharme 2020

Cependant, malgré ces améliorations récentes, le schéma composite sol-végétation (*Figure 4*), qui rassemble et calcule un seul bilan d'énergie pour le sol et la végétation (Noilhan et Planton 1989), est toujours utilisé dans ISBA et atteint aujourd'hui ses limites. Comme les arbres « n'existe pas » dans ISBA et que la neige simule déjà son propre bilan d'énergie, elle voit tout le rayonnement atmosphérique même en présence de forêt : il devient donc nécessaire de séparer explicitement la végétation du sol pour continuer à améliorer ISBA et représenter de nouveaux processus comme l'effet d'ombrage des grands arbres des forêts boréales sur le manteau neigeux.

2. Résultats obtenus actuellement

Une fois le modèle ISBA décrit, je vous propose une rapide présentation des résultats obtenus actuellement avec ce schéma. Par la suite, je vais donc comparer ces résultats avec ceux obtenus avec ISBA-MEB afin de déterminer si il y a bien une amélioration des résultats en utilisant ISBA-MEB.

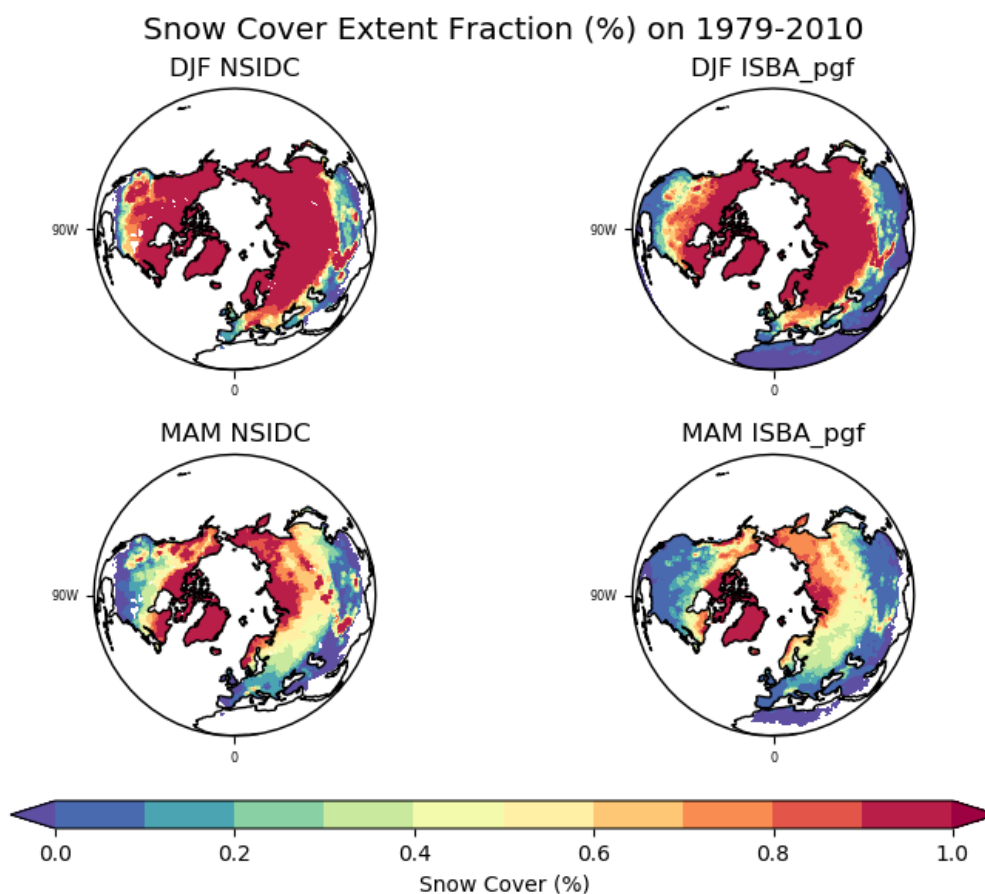


Figure 5: Couverture neigeuse moyenne sur la période 1979-2010 au printemps (MAM) et en hiver (DJF) estimée par satellite NSIDC et simulée par ISBA forcé par pgf.

La *Figure 5* présente la climatologie sur 1979-2010 de la distribution spatiale de la couverture de neige simulée par ISBA en hiver et au printemps. En hiver, elle est relativement proche de celle estimée sauf sur quelques zones de montagnes telles que les Rocheuses en Amérique du Nord où la couverture neigeuse simulée est plus faible que celle observée. Si on s'intéresse aux moyennes zonales de ces distributions (*Figure 6*), pour une latitude comprise entre 30 et 60°N, la couverture neigeuse simulée par ISBA est légèrement plus faible que celle estimée. Le comportement du manteau neigeux avec ISBA en hiver est donc bon mais encore à améliorer.

Au printemps, ISBA simule une distribution de couverture neigeuse plus faible et moins étendue que celle estimée (*Figure 5*). Entre les latitudes 50 et 70°N, zones où sont situées les forêts boréales, la quantité de neige simulée est toujours sous-estimée par rapport aux estimations NSIDC (*Figure 6*), ce qui signifie bien qu'ISBA simule une fonte de la neige trop précoce au printemps au niveau de la Taïga.

Il s'agit typiquement du type de limitations qu'on espère pouvoir résoudre avec ISBA-MEB, dont la description est faite ci-après.

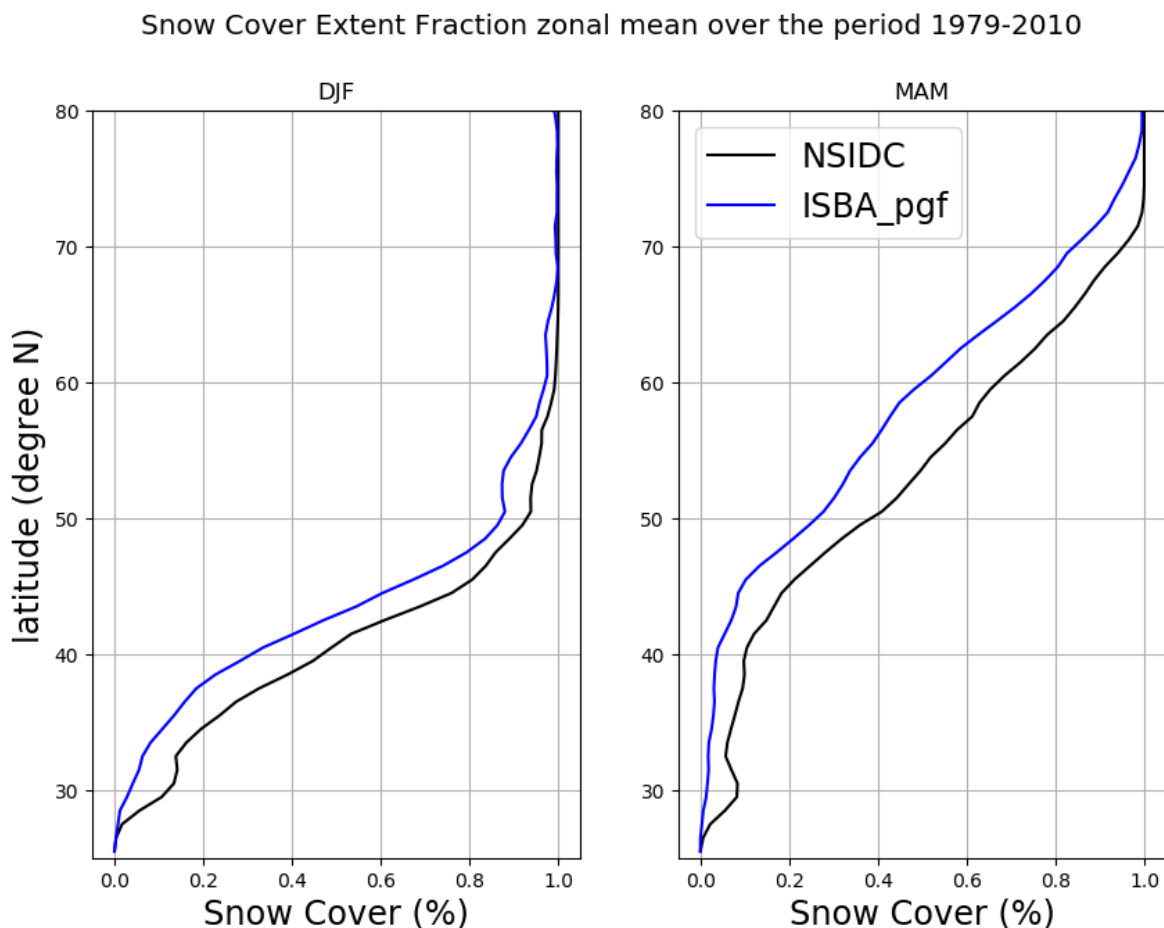


Figure 6: Moyennes zonales associées aux distributions de couverture neigeuse moyenne sur la période 1979-2010 au printemps (MAM et en hiver (DJF) estimées par satellite NSIDC ou simulées par ISBA.

B. ISBA-MEB

Pour pouvoir comparer ISBA et ISBA-MEB et bien comprendre leurs différences, je vais ici vous présenter le schéma d'ISBA-MEB (Boone et al. 2017).

1. Schéma

Pour répondre aux limitations du schéma actuel de végétation haute dans ISBA, la nouvelle paramétrisation ISBA-MEB a été développée avec comme objectif la représentation explicite de la végétation dans ISBA.

En opposition au schéma composite sol-végétation d'ISBA, ISBA-MEB calcule un bilan d'énergie distinct pour le sol, la végétation et la neige (*Figure 7*). En l'absence de neige, un modèle classique à 2 sources calcule un bilan d'énergie explicite pour le sol et la végétation. En présence de neige, le modèle est étendu à 3 sources avec l'ajout de la représentation explicite du manteau neigeux. Ce nouveau schéma permet donc de modéliser les interactions entre neige, sol et végétation, ce qui n'était pas le cas auparavant.

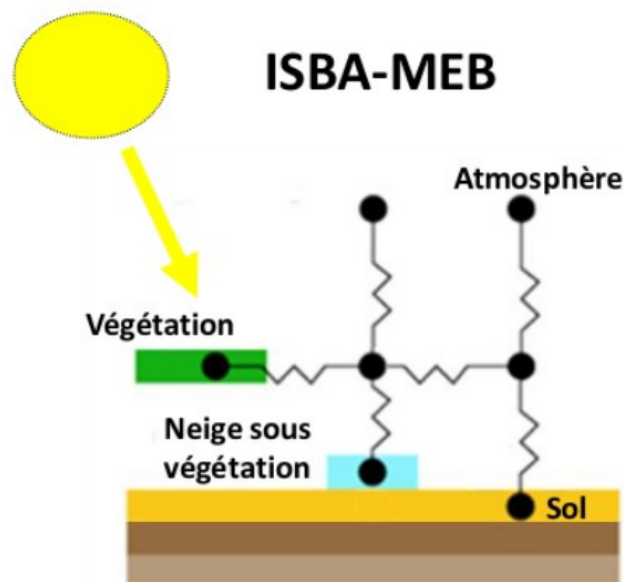


Figure 7: Schéma d'ISBA-MEB en période de neige sur un site forestier. D'après Boone et al. 2017.

a. Canopée

Une nouvelle couche de végétation, découplée du sol et appelée la canopée, permet dorénavant de simuler la végétation haute. De nouveaux processus comme l'interception de la neige (lorsque de la neige est retenue et stockée temporairement dans la végétation), le déchargement (lorsqu'une certaine quantité de neige interceptée est atteinte, la neige retombe depuis la végétation sur le sol), l'atténuation de la vitesse du vent sous les arbres ou encore l'ombre créée par les arbres limitant le rayonnement solaire arrivant en surface, peuvent être représentés. La méthode « big leaf » est utilisée pour représenter cette canopée, c'est à dire que toute la végétation est traitée comme « une seule grosse feuille » pour déterminer les paramètres qui rentrent en compte dans le calcul des différents bilans d'énergie et flux.

b. Litière

Une autre couche appelée la couche de litière a été ajoutée dans ISBA-MEB (Napoly et al. 2017) entre la couche de végétation et la couche supérieure du sol. Sa paramétrisation a pour objectif de représenter les effets hydrologiques et énergétiques du sol des forêts recouvert par des feuilles mortes, branches, aiguilles et toute autre matière organique. Cette couche pouvant parfois être épaisse et très isolante à cause de sa faible diffusivité thermique, elle peut avoir un fort impact sur le cycle diurne de la température et du flux de conduction du sol, causer une réduction du flux d'évaporation ou encore constituer un réservoir d'interception d'eau liquide grâce à sa porosité. Au delà de la taïga sur laquelle cette étude se concentre, ISBA-MEB permet de mieux modéliser le sol de la toundra et les interactions entre les petits arbustes et la neige.

En résumé, ISBA-MEB regroupe donc un couplage entre des schémas de sol et de neige multi-couches, (Decharme et al. 2019), une couche de litière forestière (Napoly et al. 2017), une couche de canopée (Boone et al. 2017) et l'atmosphère.

2. Résultats attendus

Avec la représentation explicite de la végétation dans ISBA-MEB et l'ajout de nouvelles couches de végétation comme la couche de canopée et la couche de litière, une amélioration de la performance d'ISBA-MEB par rapport à ISBA est attendue. La possibilité de modéliser de nouveaux processus liés à l'interaction végétation-neige devrait permettre une amélioration de la représentation de la quantité de neige en hiver et au printemps ainsi que du timing de la fonte de la neige. La présence d'une couche de canopée devrait ainsi retarder la fonte du manteau neigeux avec l'ajout de l'effet d'ombrage des grands arbres sur le manteau neigeux et corriger cette avance de 2 à 3 semaines. L'ajout de la couche de litière et sa capacité d'isolation du sol devrait permettre de mieux représenter les différents échanges énergétiques, thermiques et hydrologiques en surface.

Les résultats finalement obtenus seront présentés en partie III de ce rapport.

II. Description des données

Maintenant que les deux modèles et leurs différences ont été décrits, je vais ici vous présenter les données utilisées pour forcer les modèles et les comparer aux observations.

A. Sites canadiens

Comme annoncé en introduction, la première partie de mon stage concerne l'évaluation d'ISBA-MEB sur 3 sites canadiens (Napoly et al. 2020) localisés en forêt boréale au Canada près de Saskatchewan (*Figure 8*). Ils font partie du programme BERMS (Boreal Ecosystem Research and Monitoring) et sont nommés d'après leur caractéristiques : OAS (Old Aspen Site), OBS (Old Black Spruce) et OJP (Old Jack Pine). On retrouve sur ces sites la végétation caractéristique de forêt en région polaire comme des conifères très hauts (pins ou épicéa de 12 à 21 m selon les sites) et une épaisseur de couche de litière forestière relativement importante (de 8 à 10 cm).

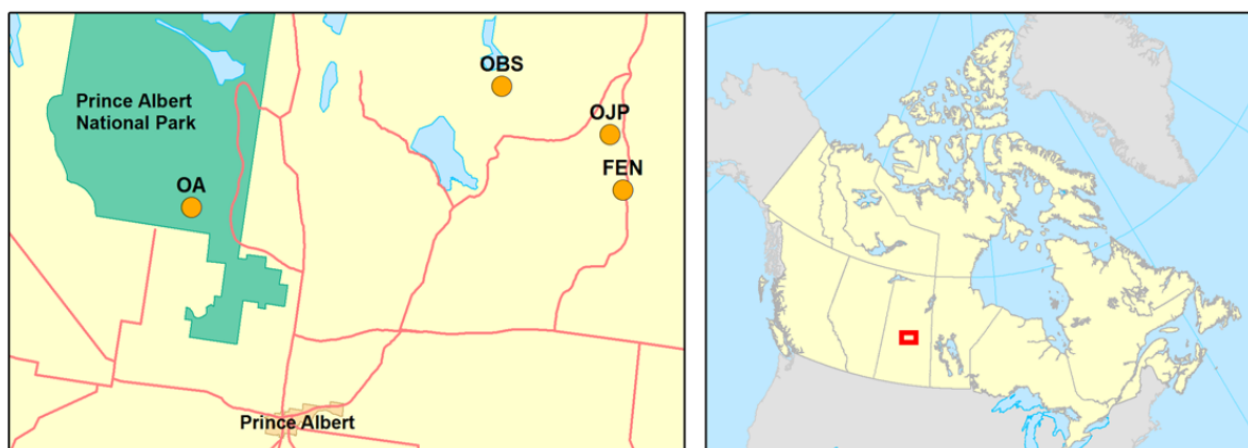


Figure 8: Localisation des 3 sites canadiens OAS, OBS et OJP. Carte extraite du site du Global Institute for Water Security de l'Université de Saskatchewan.

Les données d'observations y sont disponibles de 1997 à 2016 ou 2018 selon les sites au pas de temps mi-horaire mais cette étude se concentre sur une période de 12 ans du 1^{er} janvier 1999 au 31 décembre 2010. Ces sites sont équipés de nombreux instruments de mesure donnant accès à grand nombre de données météorologiques et de propriétés du sol comme l'épaisseur du manteau neigeux, les précipitations, les chutes de neige, les flux radiatifs, les flux de chaleur du sol sous la canopée, la teneur en eau du sol ou encore le LAI (Leaf Area Index, indice de surface foliaire). Les mesures de hauteur de neige sont faites de manière automatique toutes les 30 minutes et des mesures manuelles sont effectuées 2 fois par an pour corriger au besoin les mesures automatiques. La plupart des instruments sont attachés à une tour de mesure (*Figure 9*) dont la hauteur peut atteindre 2 fois celle des arbres.



Figure 9: Tours de mesure des sites OBS et OJP du programme BERMS. Extraite du site du Changing Cold Regions Network

B. Sites amazoniens

La seconde partie de l'étude portera sur le comportement d'ISBA-MEB en forêt tropicale, jamais évalué auparavant.

Les sites de mesure utilisés pour étudier le comportement d'ISBA-MEB sur les forêts tropicales sont localisés dans la forêt amazonienne (*Figure 10*). Quatre d'entre eux sont situées au Brésil : Manaus_km34, Reserva_Jaru, Santarem_km67, Santarem_km83 et font partie du programme LBA (Large-scale Biosphere Atmosphere Experiment in Amazonia). Le cinquième, nommé GuyaFlux, est situé en Guyane Française à Paracou. Tous ces sites présentent les caractéristiques typiques d'une forêt tropicale humide soit une forte densité de végétation, peu de lumière atteignant la surface et un vent très faible sous la canopée.

Sur chacun des sites est présente une tour de mesure qui permet d'avoir accès à des données de terrain telles que les flux radiatifs, les flux de chaleur latente et sensible, les précipitations, l'humidité et la température du sol. En fonction des sites, les données ne sont pas disponibles sur la même période : elles sont disponibles de 2007 à 2009 pour GuyaFlux, de 2002 à 2005 pour Manaus_km34 et Santarem_km67, seulement l'année 2002 pour Reserva_Jaru et de 2001 à 2003 pour Santarem_km83.

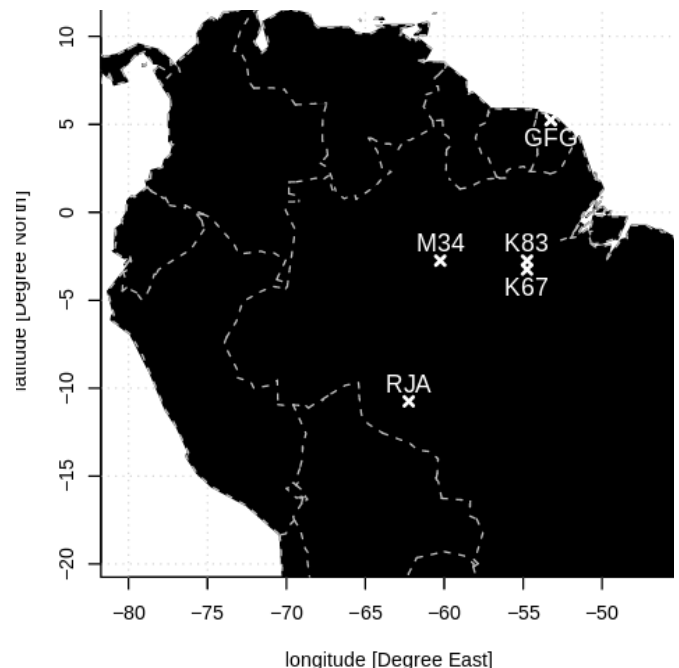


Figure 10: Localisation des 5 sites amazoniens. Carte extraite du Joetzjer et al. 2015.

C. Échelle globale

1. Les forçages atmosphériques

A l'échelle globale, j'ai testé l'option ISBA-MEB avec différents forçages pour bien différencier les améliorations réellement apportées et la variabilité liée au choix de forçage. Du fait des incertitudes liées aux forçages atmosphériques globaux (car ils sont obtenus à partir de réanalyses), il peut être intéressant de tester la sensibilité du comportement d'ISBA-MEB au forçage choisi. Dans mon cas, j'ai utilisé trois produits :

1. PGF (Princeton Global Forcing) : Il se base sur des réanalyses corrigées du NCEP-NCAR (National Center of Environmental Prediction). Il est disponible à une fréquence tri-horaire et à une résolution de 1°.
2. E2O : Il se base sur les réanalyses ERA-Interim avec une fréquence 3 heures et regriddé à une résolution de 1°. Il est fourni par le projet européen Earth2Observe qui avait vocation à créer une réanalyse hydrologique sur l'Europe.
3. GSWP3 : Il se base sur les réanalyses 20CR, du projet 20th Century Reanalysis de la NOAA-CIRES-DOE, avec une fréquence 3 heures et regriddé à une résolution de 1°. Il est fourni par GSWP3 (Global Soil Wetness Project phase 3) qui est un projet international en cours dont l'objectif est de produire des données globales de flux de surface et de variables hydrologiques. Il est aussi utilisé pour les simulations land-hist de CMIP6.

J'ai réalisé au préalable une comparaison entre ces trois produits (*Figure 11*) pour distinguer leurs différences et mettre en évidence le comportement d'ISBA-MEB en fonction des caractéristiques de chaque forçage. J'ai pris arbitrairement ici le forçage E2O comme référence. Le forçage GSWP3 semble par exemple plus froid que E2O tandis que PGF semble plus chaud. Le forçage PGF se distingue également par son humidité qui s'avère plus forte globalement que dans les autres forçages.

Differences of pgf and gswp3 forcing compared to e2o reference forcing over 1979-2010

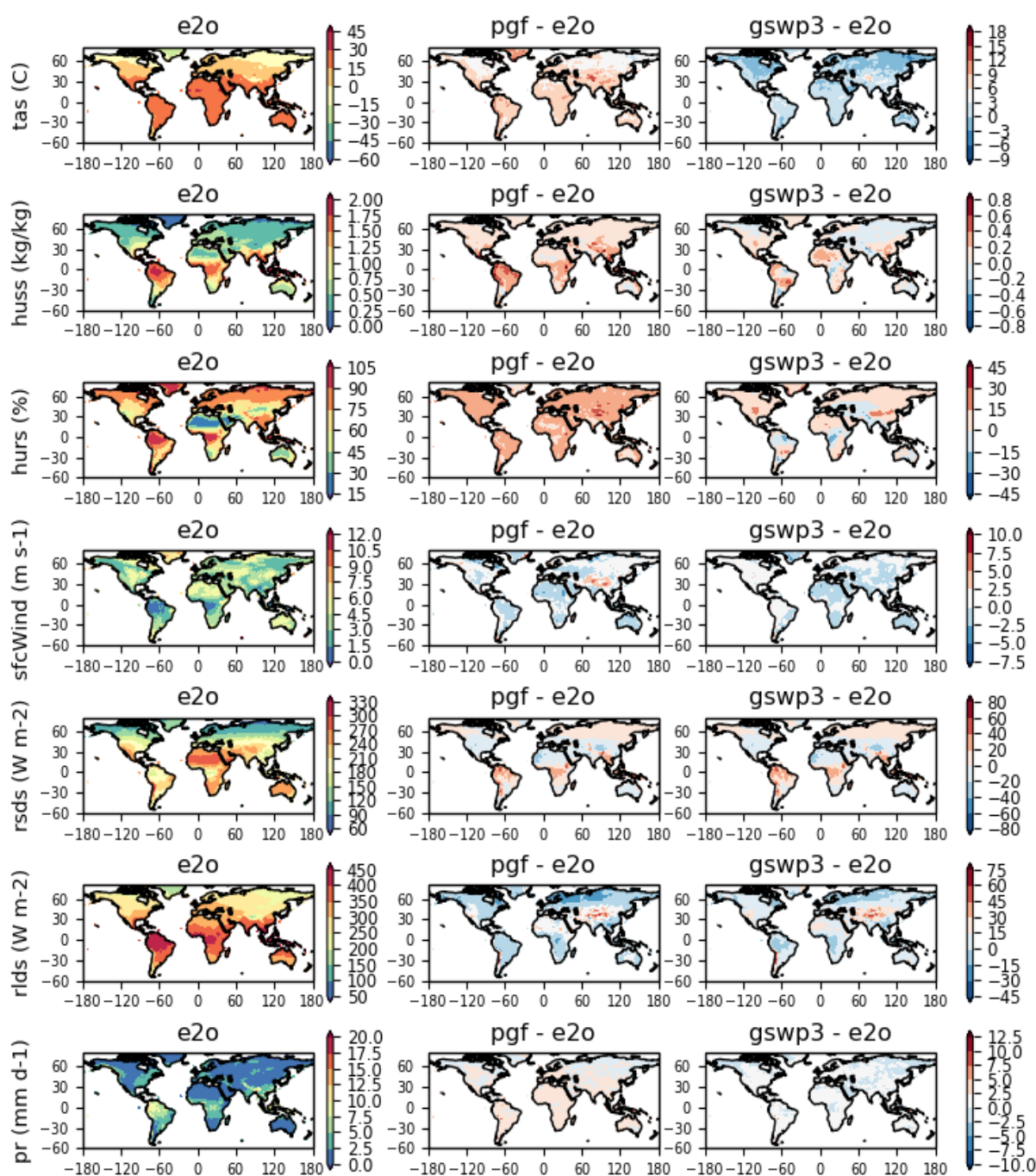


Figure 11: Distribution des moyennes annuelles de la température de l'air à 2m (tas), de l'humidité spécifique (huss) et relative (hurs), de la vitesse du vent (sfcWind), le rayonnement incident shortwave (rsds) et longwave (rlds), et les précipitations (pr) du produit de forçage e2o et sa différence avec pgf et gswp3

2. Les observations

A l'échelle globale, je présenterais seulement dans ce rapport la comparaison entre observation et simulation de la couverture neigeuse et de l'évapotranspiration par soucis de synthèse.

i. Neige

Les données d'observations de couverture neigeuse sont des estimations satellites réalisées par le NSIDC (National Snow and Ice Data Center), disponibles sur la période 1967-2010 à fréquence hebdomadaire à une résolution de 25km (*Figure 12*). Dans le cadre de ce stage, elles ont été adaptées à une résolution de 1° (soit en moyenne 111km) à fréquence mensuelle.

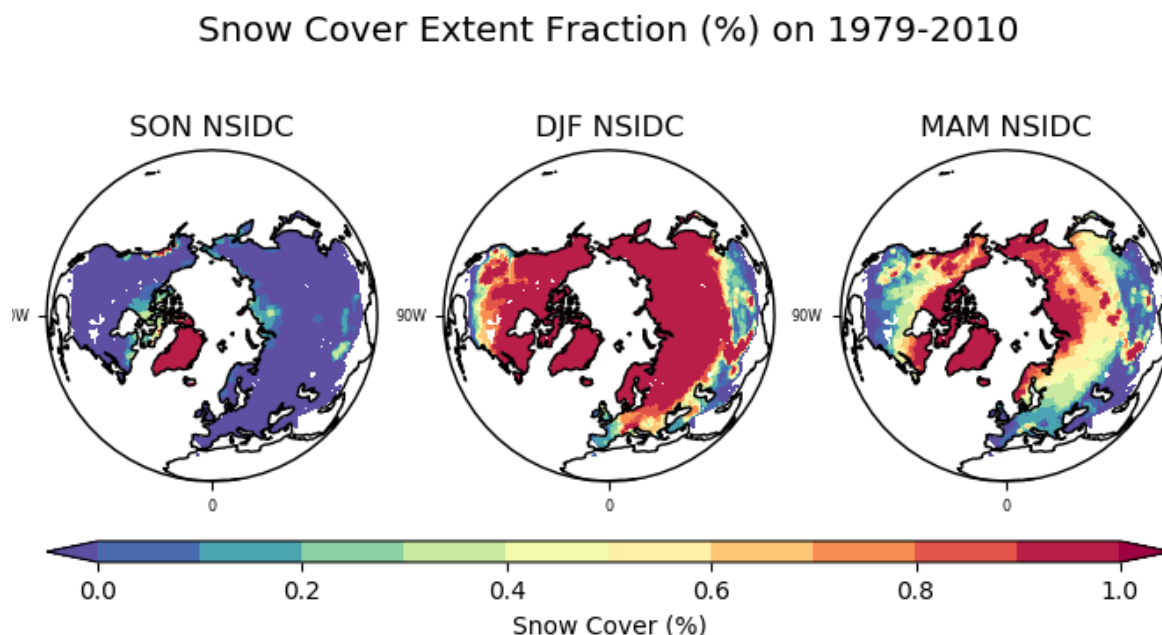


Figure 12: Couverture neigeuse moyenne sur la période 1979-2010 en automne (SON), en hiver (DJF) et au printemps (MAM) estimée par satellite NSIDC.

ii. Évapotranspiration

L'évapotranspiration c'est le total des évaporations liées aux surfaces continentales, c'est à dire l'évaporation ou la sublimation de la neige, l'évaporation de l'eau libre en surface, l'évaporation de l'eau contenu sur les feuilles ou dans le sol, la sublimation du gel du sol et enfin la transpiration des plantes.

Il y a encore quelques années, il existait très peu d'observations d'évapotranspiration à l'échelle régionale ou globale car c'est une variable difficile à mesurer à grande échelle. Depuis, différentes méthodes ont été développées pour estimer l'évapotranspiration globale comme la méthode Penman-Monteith qui calcule l'évapotranspiration à partir de données météorologiques ou agronomiques comme la température, l'humidité, l'albédo, la conductivité stomatale des plantes ou encore le type de sol. D'autres méthodes se basent plutôt sur une approche physique selon laquelle l'évapotranspiration correspondrait au flux de chaleur latente (Q_e) dans le bilan d'énergie (1), et pourrait ainsi être estimée à partir de données du rayonnement net (R_n), du flux de chaleur sensible (Q_h) et du flux de conduction du sol (G). Un troisième type de méthode repose sur l'estimation séparée de toutes les composantes qui constituent l'évapotranspiration.

$$Q_e = R_n - Q_h - G \quad (1)$$

Les trois produits d'évapotranspiration utilisés ici pour comparer ISBA et ISBA-MEB sont tous basés sur des méthodes différentes. L'intérêt d'utiliser plusieurs produits est d'évaluer des incertitudes sur ces estimations globales d'évapotranspiration.

Les trois produits d'estimation utilisés dans cette étude se nomment MTE, PML et GLEAM sont assez semblables malgré quelques différences dans l'hémisphère Nord (*Figure 13*). MTE (Multi-Tree Ensemble) est un produit estimé sur la période 1982-2008 à fréquence mensuelle pour une résolution de 0,5°. Cette estimation est obtenue à partir de données satellites et de données d'observations in situ du réseau FLUXNET (réseau global de 800 sites de mesures utilisant la méthode de covariance de Foucault pour mesurer les flux disponibles sur <https://fluxnet.org/>). PML (Penman-Monteith-Leuning) correspond à des données d'évapotranspiration contraintes par des modèles et estimées à l'échelle globale à une résolution de 0,5° et à fréquence mensuelle sur la période 1981-2012. GLEAM (Global Land Evaporation Amsterdam Model) est un produit qui contient des estimations globales d'humidité du sol et d'évapotranspiration disponibles à fréquence mensuelle sur la période 1980-2020 à une résolution spatiale de 0,5°. Ces estimations sont réalisées à partir de données satellites et de réanalyses ERA-Interim.

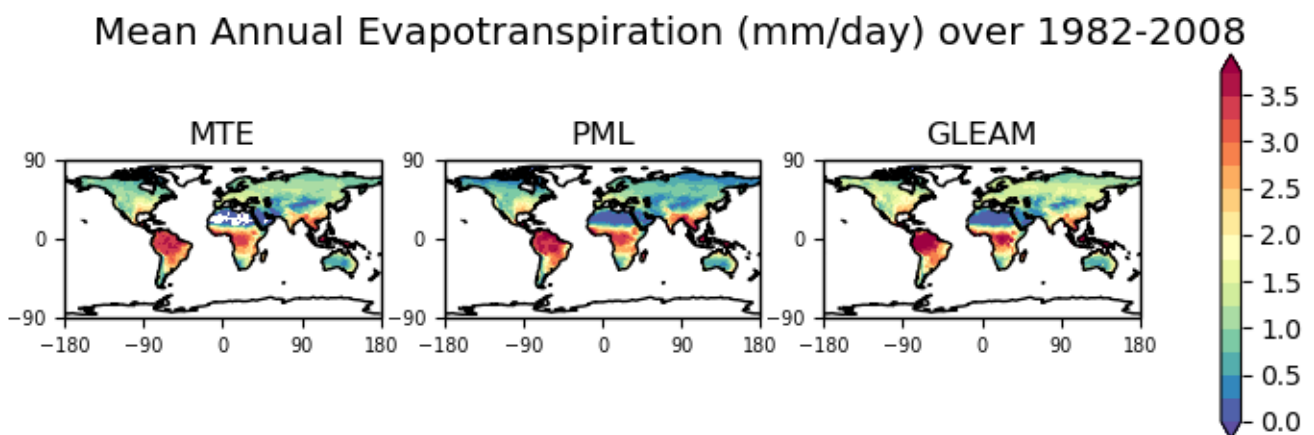


Figure 13: Évapotranspiration moyenne annuelle sur la période 1982-2008 estimée par 3 produits (MTE, PML et GLEAM).

III. Résultats

A. L'échelle locale

Comme énoncé dans l'introduction, je vais présenter ici les résultats obtenus sur des sites expérimentés, d'abord localisés en pleine forêt boréale où une analyse a déjà été conduite (Napoly et al. 2020) puis en forêt amazonienne où ISBA-MEB n'a jamais été testé auparavant.

1. Sites canadiens

Ici, je vais m'attacher à étudier les performances d'ISBA-MEB à reproduire le comportement des forêts boréales. Une étude similaire ayant déjà été faite l'année passée (Napoly et al. 2020), l'objectif est de retrouver les résultats d'amélioration des performances d'ISBA-MEB par rapport à ISBA sur de tels sites. Différents paramètres sont ainsi évalués, comme la hauteur de neige, le critère de dernier jour de neige et les échanges et flux d'énergie.

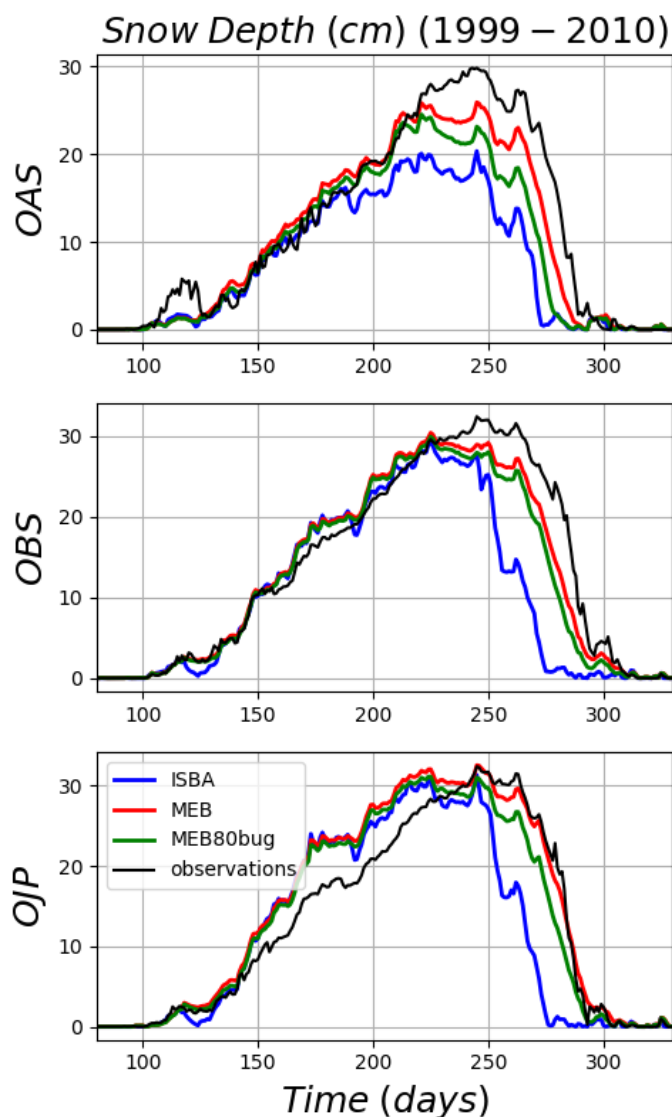


Figure 14: Cycle annuel moyen de hauteur de neige (cm) sur la période 1999-2010 observée et simulé par ISBA et ISBA_MEB sur les 3 sites de BERMS.

La version de SURFEX actuellement utilisée dans les modèles de climat et sur laquelle je vais travailler est la version V8.0 tandis que la nouvelle option ISBA-MEB a été développée à partir de la version V8.1. L'intérêt de reprendre l'étude de 2020 est donc de vérifier que l'on obtient bien les mêmes résultats que ce soit avec la V8.0 ou la V8.1 et de corriger les éventuelles erreurs qui apparaîtraient quant à l'emploi d'ISBA-MEB avec la V8.0.

a. Hauteur de neige

Le premier paramètre à l'étude est la hauteur de neige (*Figure 14*). Sur chacun des trois sites du programme BERMS, présentés en partie II, sont comparées les sorties de simulations ISBA et ISBA-MEB avec les observations in situ.

Les résultats obtenus dans un premier temps (*MEB80bug*), mettent en évidence qu'il manque bien une correction dans la version V8.0 de SURFEX pour qu'elle soit compatible avec l'utilisation d'ISBA-MEB, car il n'étaient pas aussi bons que ceux obtenus avec la V8.1. Pour retrouver des résultats aussi performants, une correction (concernant la hauteur de référence à laquelle la température atmosphérique et le vent sont couplés à ISBA-MEB) a donc du être apportée par la suite dans la V8.0.

Une fois cette correction faite, on retrouve bien qu'ISBA-MEB simule : (1) une meilleure représentation du pic de quantité de neige en hiver (*Figure 14*) ; et (2) un meilleur timing de fonte au printemps. Alors qu'ISBA simule une fonte de la neige (c'est à dire une hauteur de neige nulle)

environ 30 jours trop tôt dans l'année, ISBA-MEB simule cette fonte largement plus à-propos par rapport à la fonte observée. De plus, ISBA-MEB modélise une hauteur maximale de neige en hiver plus importante et donc plus proche des observations qu'ISBA.

b. Dernier jour de neige

Un second paramètre intéressant à regarder pour comparer ISBA et ISBA-MEB est le dernier jour de neige. Il s'agit d'un critère défini pour représenter au mieux le moment de la fonte de la neige au printemps. Il est défini comme le moment où la hauteur de neige passe en dessous de 2cm et que la moyenne de hauteur de neige reste en dessous de ce seuil de 2 cm sur les 2 semaines suivantes au moins (Napoly et al. 2020).

	OAS	OBS	OJP
ISBA	- 27.1 ± 4.3	- 24.0 ± 11.2	- 20.1 ± 7.1
ISBA-MEB	- 6.6 ± 11.4	- 0.8 ± 4.7	4.8 ± 4.9

Tableau 1: Moyenne et écart-type du biais entre modèle et observations du dernier jour de neige pour les 3 sites de BERMS.

	OAS	OBS	OJP
ISBA	0.670	0.746	0.717
ISBA-MEB	0.866	0.924	0.918

Tableau 2: Coefficient de corrélation de Pearson entre observations et modèles ISBA et ISBA-MEB pour les 3 sites OAS, OBS et OJP

En moyenne sur les 3 sites, le biais du dernier jour de neige est de 24 jours avec ISBA et de 2.6 jours avec ISBA-MEB (Tableau 1). Cela signifie que le dernier jour de neige est simulé en moyenne 24 jours trop tôt dans l'année avec ISBA et seulement 2.6 trop tôt avec ISBA-MEB. De plus, le coefficient de corrélation entre observations et modèles est plus grand avec ISBA-MEB qu'avec ISBA et ce pour les 3 sites (Tableau 2). ISBA-MEB propose donc une meilleure simulation du timing de fonte de la neige printanière sous des sites de forêts boréales qu'ISBA.

c. Flux

Une fois ISBA-MEB évalué sur le comportement du manteau neigeux et de sa fonte, j'ai tracé les différents flux de surface afin d'estimer l'impact de la présence d'une couche de canopée et d'une couche de litière sur les échanges d'énergie. Les résultats sont présentés ici uniquement pour le site OJP car c'est celui qui dispose le plus d'observations in situ, notamment pour le flux de conduction du sol G.

Les rayonnements shortwave montant (SWUP) simulés par ISBA et ISBA-MEB sont relativement proches de ceux observés (Figure 15). ISBA-MEB a tendance à mieux simuler les pics diurnes durant l'été (d'avril à octobre) qu'ISBA qui les surestime mais les sous-estime durant l'hiver (de novembre à mars). Le rayonnement longwave montant (LWUP) simulé est proche de celui observé que soit avec ISBA ou avec ISBA-MEB.

Grâce à l'effet d'ombrage de la canopée sur le sol et l'effet d'isolation de la litière au sol, le flux de chaleur sensible H est quant à lui nettement mieux simulé avec ISBA-MEB qu'avec ISBA (Figure 15). Il en va de même pour le flux de chaleur latente LE et le flux de conduction du sol G . ISBA surestime en effet beaucoup le pic diurne de ces deux derniers flux, surtout en été, surestimation que corrige ISBA-MEB même si il reste encore à améliorer. L'amélioration apportée par ISBA-MEB est encore plus visible durant les mois d'hiver durant lesquels la représentation du manteau neigeux isole d'autant plus le sol.

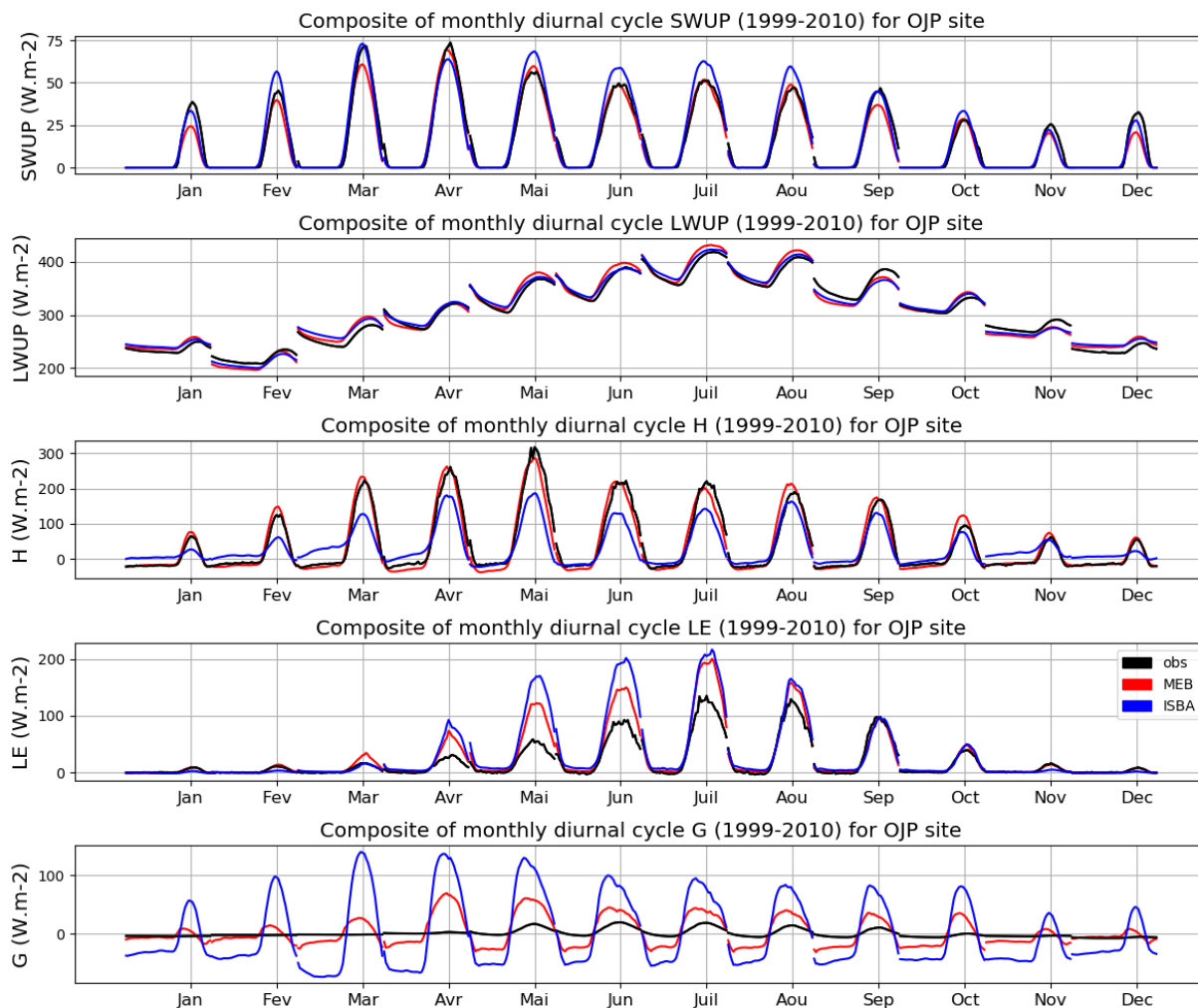


Figure 15: Cycle diurne moyen des flux de surface du site OJP.

Les résultats positifs de la performance d'ISBA-MEB en forêt boréale ont donc été retrouvés. Le comportement du manteau neigeux sous les forêts et sa fonte sont améliorés avec ISBA-MEB, tout comme les échanges d'énergie et les flux de surface.

2. Sites amazoniens

Une fois les résultats prometteurs d'ISBA-MEB validés en forêt boréale, je vais tester pour la première fois son comportement en forêt tropicale, entre autres sur les sites amazoniens présentés en partie II. L'objectif étant de vérifier qu'utiliser ISBA-MEB sur des sites sans neige aux caractéristiques différentes de celles des forêts boréales n'engendre pas de nouvelles limitations. Par soucis de synthèse, j'ai ici choisi de vous montrer seulement les résultats concernant le site Santarem_km83 car même si l'étude a bien sûr été effectuée sur les cinq sites, des résultats similaires ont été trouvés sur tous les sites. Comme il n'y a pas de neige en Amazonie – bien évidemment – la comparaison entre données modèles et observations se fera sur les flux radiatifs et flux turbulents.

a. Les flux

Pour étudier le bilan d'énergie, le cycle diurne des différents flux de surface simulés par ISBA-MEB et ISBA est comparé aux observations lorsqu'elles sont disponibles (*Figure 16*). Le rayonnement net RN est bien représenté que ce soit avec ISBA ou ISBA-MEB. Les flux SWU (short wave upwelling radiation) et LWU (long wave upwelling radiation) sont simulés de manière similaires avec ISBA et ISBA-MEB. Le maximum de SWU dans la journée est diminué avec ISBA-MEB par la présence de la canopée qui réduit le rayonnement incident.

Cependant, une surestimation d'environ 10 W.m^{-2} du flux de chaleur latente LE la nuit sur le site est mise en évidence. En effet, les observations de flux d'évaporation sont proches de zéro la nuit. Il a été démontré que l'évaporation de surface sous la canopée des forêts tropicales est quasiment nulle la nuit (Joetzjer et al. 2020). De plus, le pic maximum de LE atteint dans la journée est lui aussi surestimé certains mois de l'année.

La variabilité journalière du flux de conduction du sol $GFLUX$ est moins importante et plus proche des observations avec ISBA-MEB qu'avec ISBA grâce à la couche de litière et son pouvoir isolant qui permet de mieux simuler les flux de chaleur dans le sol. En contrepartie, la variabilité journalière du flux de chaleur sensible H est amplifiée avec ISBA-MEB ce qui l'éloigne des observations.

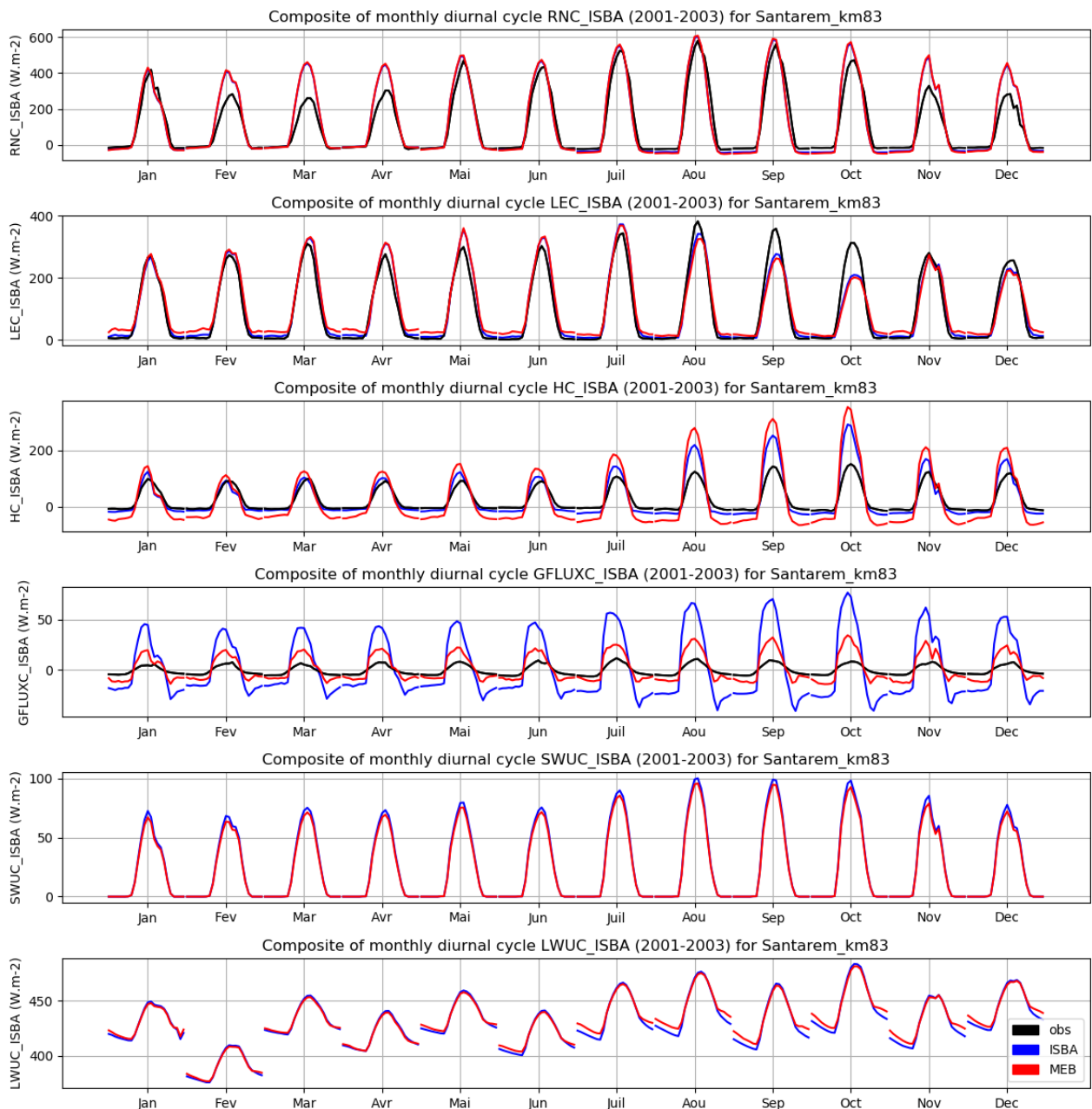


Figure 16: Cycle diurne moyen des flux de surface du site Santarem_km83

Pour tenter de comprendre l'origine de cette surestimation d'évaporation nocturne, j'ai réalisé une étude plus détaillée des composantes du flux d'évaporation (Figure 17). Le flux LE a alors été décomposé en ses différentes sources : le flux d'évaporation du sol LEG , le flux d'évaporation de la canopée LER et le flux de transpiration de la végétation $LETR$.

Même sans observations, on identifie rapidement que la source principale de la surestimation d'ISBA-MEB par rapport à ISBA est liée à l'évaporation du sol *LEG*. En effet, ISBA simule une évaporation du sol nulle et ISBA-MEB devrait en simuler très peu voire pas du tout. La composante d'évaporation par la canopée présente elle aussi une légère surestimation la nuit. La composante de transpiration de la végétation est quant à elle confondue avec ISBA et ne présente donc pas de surestimation.

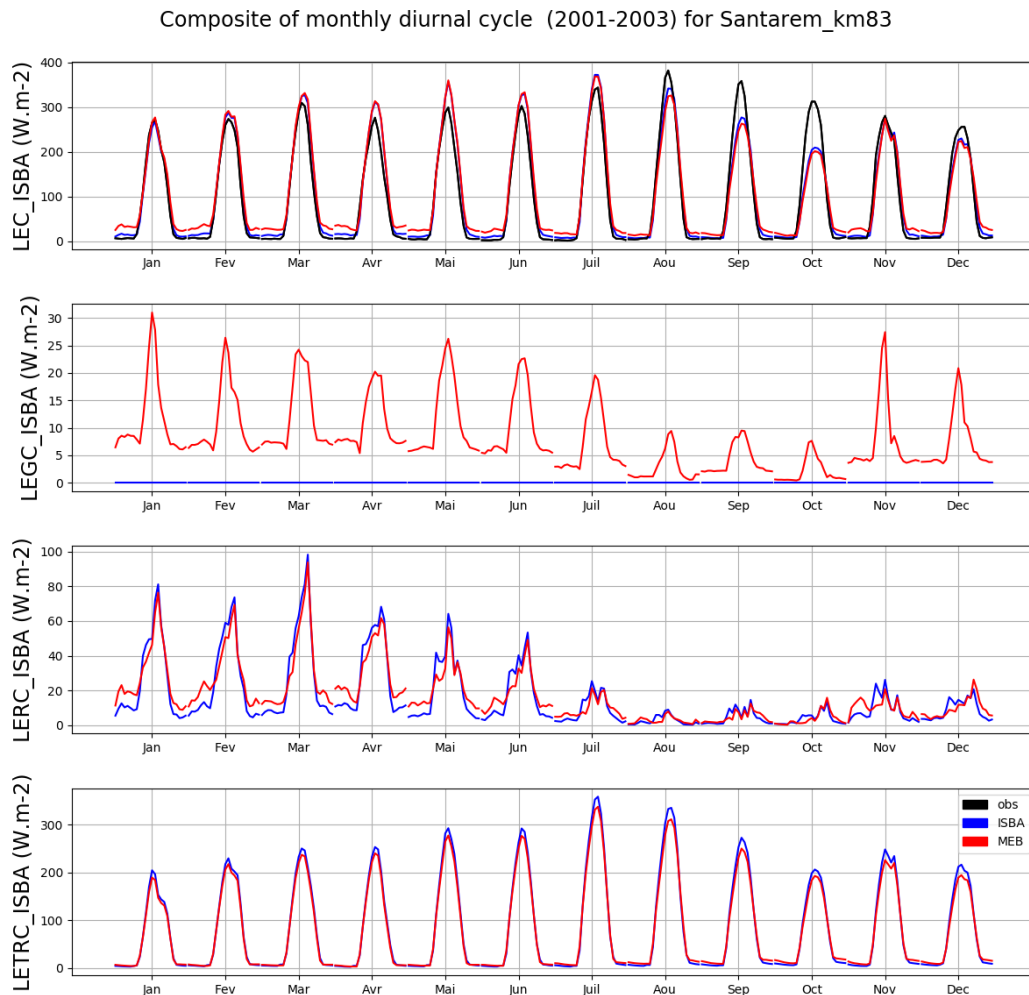


Figure 17: Cycle diurne moyen des composantes du flux de chaleur latente LE du site Santarem_km83.

Le problème mis en lumière ici est que les forêts tropicales ont des caractéristiques très différentes des forêts boréales. Elles sont très denses avec peu de rayonnement atteignant la surface et un vent très faible sous la canopée, égal à environ 1 à 5 % du vent au dessus des arbres (Baynton et al. 1965). Or certains paramètres d'ISBA-MEB ont été choisis pour les forêts boréales et ne sont pas adaptés aux forêts tropicales.

Des tests de sensibilité à certains paramètres vont donc être effectués pour déterminer au mieux ces paramètres. Une analyse de sensibilité d'ISBA-MEB déjà effectuée sur des cultures au Maroc a par exemple montré récemment que la nouvelle option démontrait une forte sensibilité aux paramètres liés à la turbulence (Aouade et al. 2020).

b. Tests de sensibilité

Deux principales pistes sont alors envisagées pour expliquer le surplus d'évaporation du sol avec ISBA-MEB : soit le rayonnement *SW* arrivant en surface est trop important et induit un excès d'énergie au niveau de la surface compensé par un surplus d'évaporation ; soit le vent calculé sous la canopée par le modèle est trop fort et comme l'évaporation du sol dépend du profil de vent, il engendrerait un excès d'évaporation.

TR	- 50 %	- 75 %	- 95 %
ZALPHA	8	10	12

Tableau 3: Récapitulatif des tests de sensibilité réalisés sur les paramètres de transmission et de coefficient d'atténuation du moment

i. Transmission

Pour tester la sensibilité du flux de chaleur latente au rayonnement arrivant au sol, des simulations ont été lancées en réduisant le paramètre de transmission du rayonnement à travers la canopée. Les tests ont été effectués en réduisant la transmission de 50, 75 et 95 % (Tableau 3).

Effectivement, lorsque l'on diminue la transmission du rayonnement à travers la canopée, la surestimation nocturne et le pic du maximum dans la journée d'évaporation du sol sont bien diminués (Figure 18). Cependant, on commence réellement à voir un effet en diminuant la transmission de 95 % soit pour une valeur égale à 5 % de la transmission initiale, ce qui paraît trop faible et irréaliste. Au final, la transmission ne semble pas avoir une influence très importante puisqu'il faut la diminuer très fortement pour voir un effet sur l'évaporation du sol.

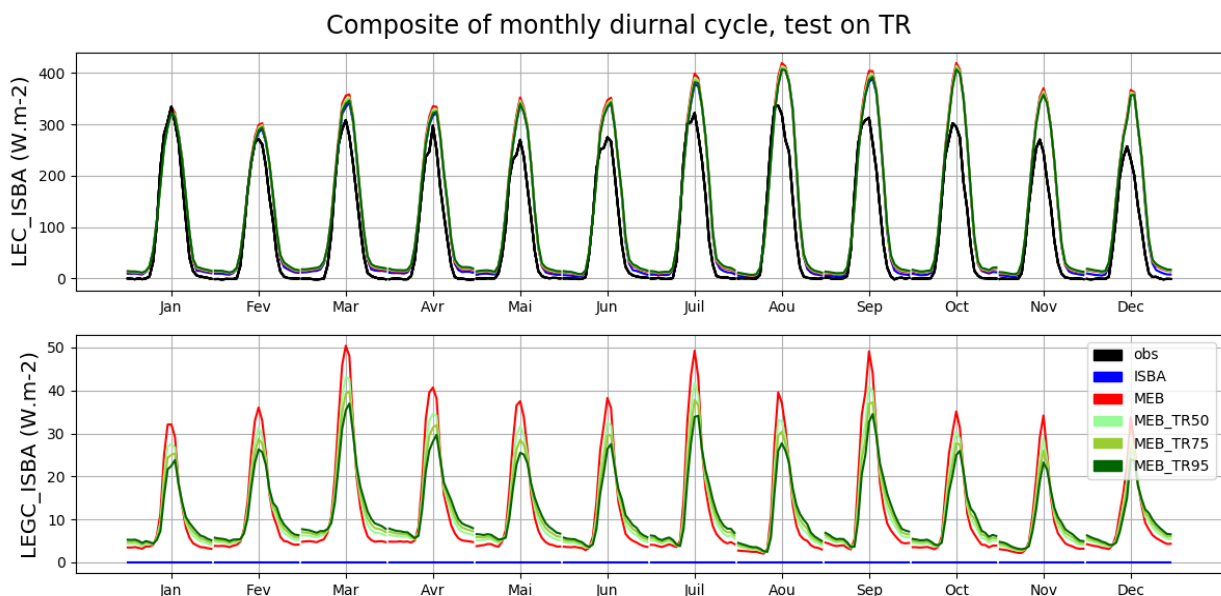


Figure 18: Cycle diurne moyen des composantes du flux de chaleur latente LE du site Santarem_km83 pour plusieurs valeurs de transmission (diminuée de 50, 75, 95)

ii. Coefficient d'atténuation du moment

Pour tester la sensibilité du flux de chaleur latente au profil de vent, plusieurs valeurs du coefficient d'atténuation du moment (nommé ZALPHA) vont être testées. Ce paramètre est en effet très intéressant puisqu'il joue sur le profil de vent entre le sol et le sommet de la canopée. Il intervient dans la paramétrisation de la résistance aérodynamique (Choudhury et Monteith, 1988), et influe donc directement sur l'atténuation du vent entre la surface et le sommet de la canopée. La valeur définie par défaut dans ISBA-MEB et choisie pour des forêts boréales est de 4. ISBA-MEB a été testé en forêt tropicale pour des valeurs de ZALPHA de 8, 10 et 12 (Tableau 3).

L'évaporation du sol commence à diminuer pour une valeur de coefficient d'atténuation du moment égale à 8 (Figure 19). Il n'a pas été testé au-delà d'une valeur de 12 car le flux d'évaporation du sol est nul au-delà. Le paramètre ZALPHA a donc un effet très fort sur l'évaporation du sol. Sa valeur 4 choisie par défaut

n'est sûrement pas adaptée aux forêts tropicales et ne réduit pas assez le vent en surface sous ces forêts très denses.

Pour améliorer ISBA-MEB et corriger en partie ce surplus d'évaporation du sol, la valeur de ZALPHA a été choisie arbitrairement à 10 au niveau des forêts tropicales car elle semble plus appropriée pour représenter le flux de chaleur latente mais c'est un choix qui peut être discuter. Pour la suite de l'étude, la valeur du coefficient d'atténuation du moment est désormais dépendante du type de végétation : elle sera de 10 en forêt tropicale mais elle conservera sa valeur par défaut de 4 partout ailleurs.

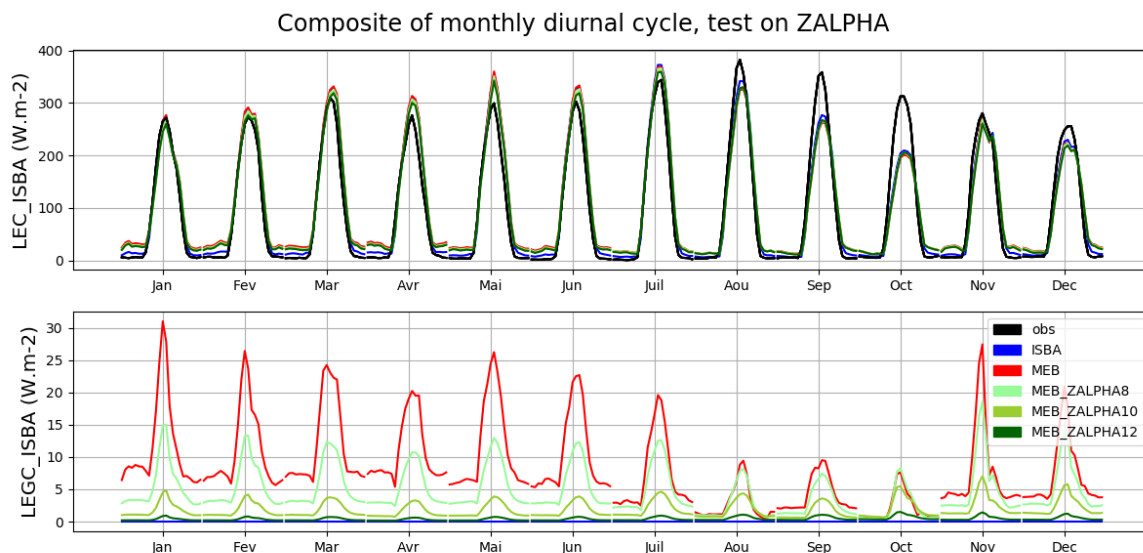


Figure 19: Cycle diurne moyen des composantes du flux de chaleur latente LE du site Manaus_km34 pour plusieurs valeurs du coefficient d'atténuation du moment ZALPHA (4,8,10,12)

Il peut être intéressant de noter que des tests de sensibilité ont été effectués sur un autre paramètre appelé le coefficient d'atténuation du vent (ZALPHAPRIM) mais qu'il n'a pas été présenté puisqu'il n'a montré aucun effet sur le flux d'évaporation du sol.

Le comportement d'ISBA-MEB n'ayant jamais été testé en forêt tropicale auparavant, certains paramètres du modèle ont du être testés et le coefficient d'atténuation du moment a été ajusté à une valeur plus adaptée à ce type d'environnement. Une fois cet ajustement réalisé, maintenant qu'il a été établi qu'ISBA-MEB n'engendrait pas de nouvelles limitations sur ces sites voire améliorerait la représentation du flux de conduction du sol grâce à la couche de litière, l'étude globale peut être entamée.

B. L'échelle globale

Une fois le comportement et les performances d'ISBA-MEB validées à la fois sur les forêts boréales et forêts tropicales (après correction de la valeur du coefficient d'atténuation du moment à ce type de couvert végétal), ils vont pouvoir être évalués à l'échelle globale.

Je vais maintenant évaluer ISBA-MEB en le comparant aux simulations ISBA et aux observations lorsqu'elles sont disponibles sur plusieurs variables : la couverture de neige, l'évapotranspiration et la fraction évaporative. Pour rappel, les données d'observations et les 3 produits de forçages ont été présentés en partie II de ce rapport.

1. Neige

L'étude globale va ainsi débuter avec l'analyse de la distribution globale de la couverture neigeuse simulée par ISBA-MEB et sa comparaison avec les estimations NSIDC et les simulations ISBA pour 3 forçages différents (pgf, e2o, et gswp3).

Quelque soit le forçage utilisé, ISBA tend globalement à simuler une couverture neigeuse plus faible que celle observée contrairement à ISBA-MEB qui a plutôt tendance à représenter une couverture neigeuse légèrement plus importante que les observations (*Figure 20*). Sur certaines zones comme les Montagnes Rocheuses en Amérique du Nord, ISBA sous estime la quantité de neige au printemps et ISBA-MEB, en représentant une quantité de neige plus importante, corrige cette sous estimation. La combinaison d'ISBA-MEB forcé avec e2o donne le signal le plus fort et surestime légèrement la couverture de neige sur les Rocheuses et l'Asie centrale. A première vue pour tous les forçages, ISBA-MEB simule une quantité de neige plus proche des estimations qu'ISBA. Pour confirmer cette interprétation, les moyennes zonales de ces distributions spatiales de couverture neigeuse ont été tracées (*Figure 21*).

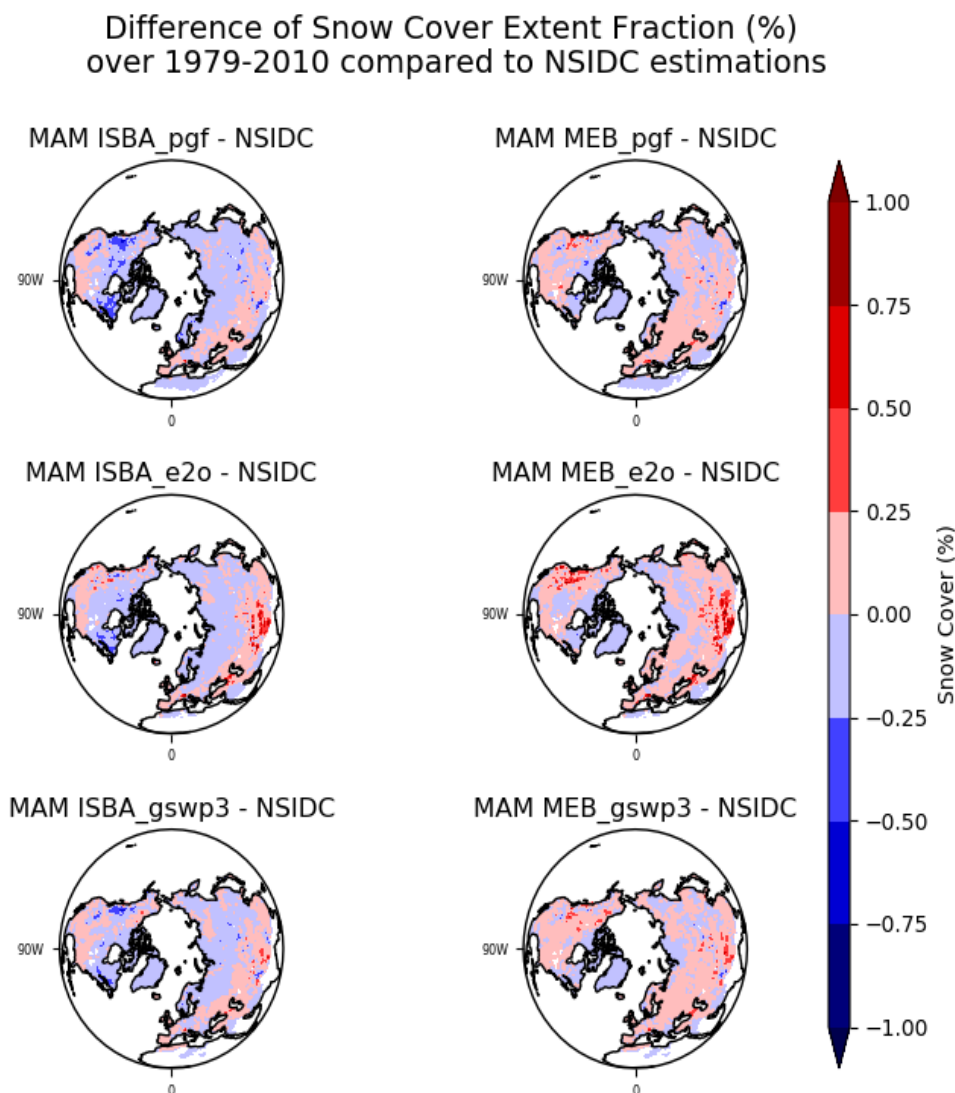


Figure 20: Différence de Couverture neigeuse moyenne sur la période 1979-2010 au printemps (MAM) simulée par ISBA et ISBA-MEB forcés par pgf, e2o ou gswp3 par rapport aux estimations NSIDC.

Sur ces moyennes zonales, on retrouve bien que quelque soit le forçage utilisé, ISBA-MEB est plus proche des estimations qu'ISBA (*Figure 21*). Pour une latitude donnée, ISBA modélise toujours une couverture neigeuse trop faible, signe d'une quantité de neige simulée pas assez importante en hiver et une fonte de la neige au printemps trop précoce. ISBA-MEB tend à corriger ce problème puisqu'il simule une quantité de neige plus importante que ce soit en hiver ou au printemps. Comme précédemment sur les cartes, le forçage e2o donne le signal le plus fort. Les combinaisons ISBA-MEB forcé avec e2o ou gswp3 apparaissent ici comme les meilleures.

De manière globale et quelque soit le forçage utilisé, ISBA-MEB apporte bien une amélioration par rapport à ISBA de la représentation du comportement du manteau neigeux à toutes les latitudes que ce soit en hiver ou lors de sa fonte au printemps.

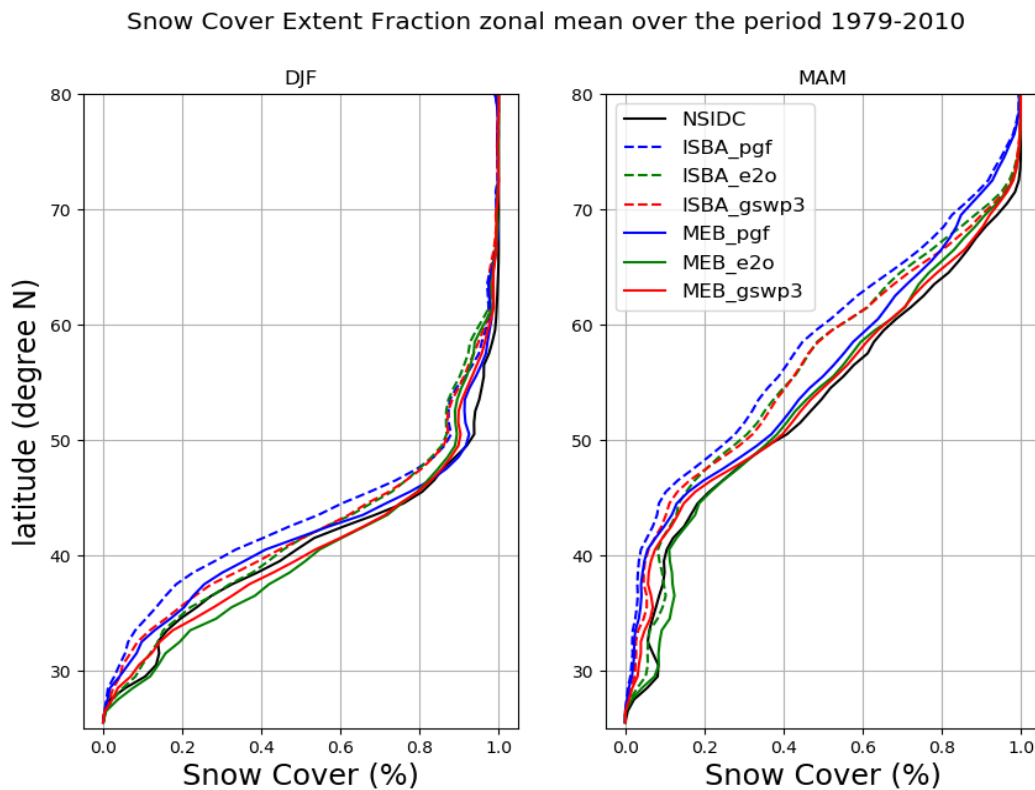


Figure 21: Moyennes zonales des distributions de couverture neigeuse estimées par NSIDC, simulées par ISBA ou ISBA-MEB et forcées par pgf, e2o, gswp3.

2. Évapotranspiration

L'évapotranspiration est une des composantes principales des bilans d'eau et d'énergie sur les continents puisqu'elle constitue avec le débit des fleuves, le flux de masse sortant, en opposition avec les précipitations constituant le flux de masse entrant. L'évapotranspiration est donc une variable très dépendante du type et de la densité de végétation, du rayonnement solaire, de l'humidité et température du sol. La transpiration des plantes représente la plus grosse part du flux d'eau lié à l'évapotranspiration. L'évapotranspiration fait aussi office de chaleur latente fournie à l'atmosphère lui permettant de réguler son humidité et sa température dans la couche limite. C'est donc une variable très importante dans le système climatique global.

Pour comparer facilement les estimations aux modèles, j'ai analysé la différence entre chacune des simulations avec la moyenne des produits d'estimation MTE, PML et GLEAM (Figure 22). J'ai à nouveau comparé ISBA et ISBA-MEB avec les trois forçages PGF, E2O et GSWP3. Les combinaisons de modèles forcées avec GSWP3 sont rapidement identifiées comme différentes des autres car présentant des valeurs d'évapotranspiration plus fortes que les autres simulations et que les estimations. En effet, que ce soit avec ISBA ou ISBA-MEB, l'évapotranspiration se révèle bien plus forte avec le forçage GSWP3, notamment au niveau des régions boréales, ce qui est peut être dû au fait que ce forçage se distinguait déjà des autres par sa température à 2 mètres plus froide. Peu de différences sont réellement observées sur ces cartes entre ISBA et ISBA-MEB forcés par PGF. Cependant, une légère amélioration est notée entre ISBA et ISBA-MEB forcés par E2O dans l'hémisphère Nord avec une réduction des surestimations engendrées par ISBA. Les performances d'ISBA-MEB visible sur ces cartes d'évapotranspiration sont donc très variables d'un forçage à l'autre.

Comme précédemment pour la neige, les moyennes zonales de ces distributions ont été tracées pour faciliter leur comparaison (Figure 23). Toutes les simulations montrent un accord acceptable avec la moyenne des estimations. On retrouve ainsi que les simulations forcées avec GSWP3 sont beaucoup plus hautes que les autres, notamment au niveau de l'équateur et des hautes latitudes (50-70°). Une sous-estimation de l'évapotranspiration est remarquée pour toutes les simulations à l'équateur. Les deux simulations présentant les meilleurs résultats concernant la simulation de l'évapotranspiration globale sont ISBA-MEB forcé avec PGF ou E2O.

Tout comme la neige, on retrouve que quelque soit le forçage choisi, ISBA-MEB propose de meilleures performances qu'ISBA, principalement visibles à l'équateur et aux hautes latitudes. ISBA-MEB peut cependant encore être amélioré, notamment au niveau de cette sous-estimation de l'évapotranspiration proche l'équateur.

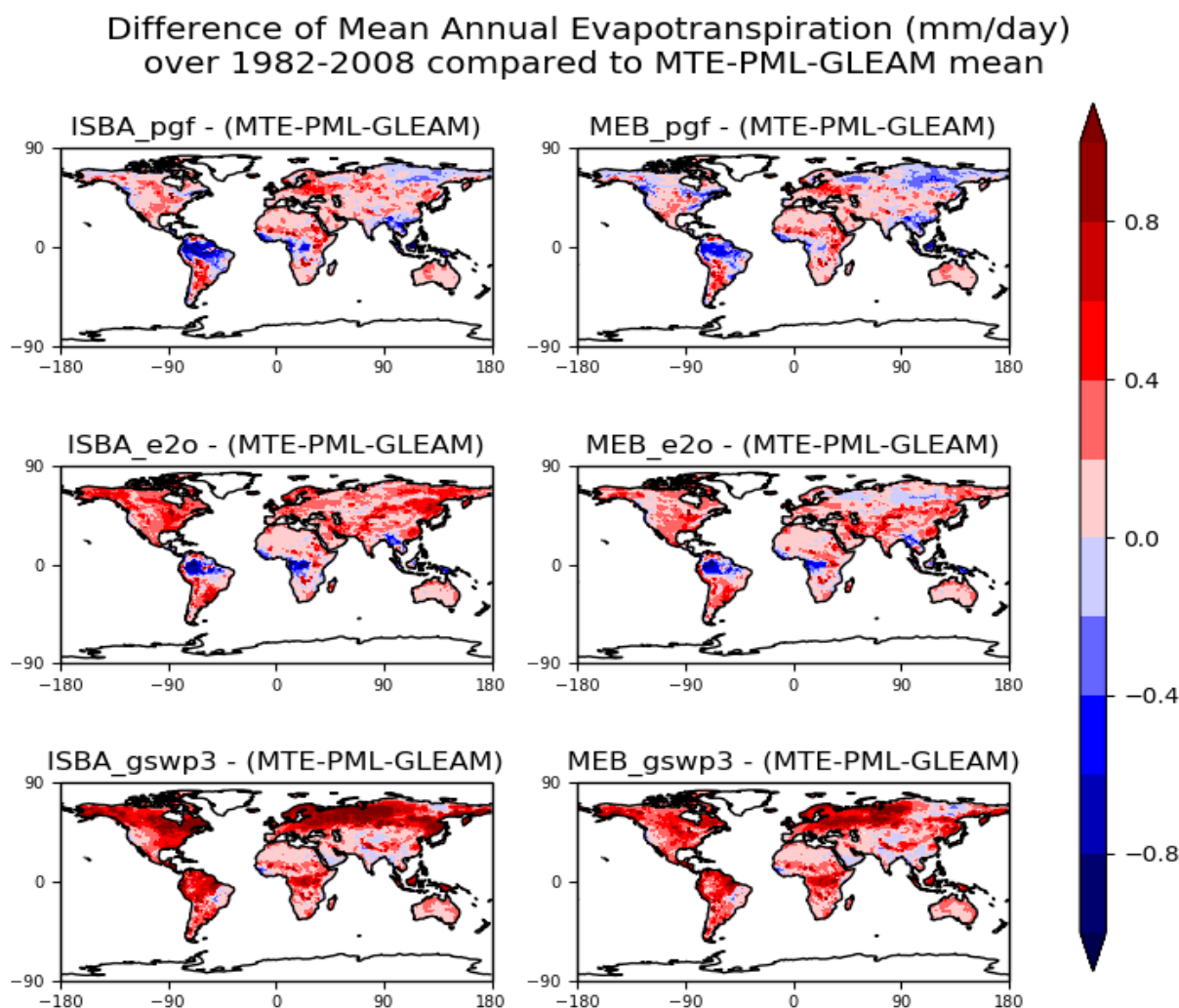


Figure 22: Différence d'Évapotranspiration moyenne annuelle sur la période 1982-2008 simulée par ISBA et ISBA-MEB forcé par pgf, e2o ou gswp3 par rapport à la moyenne des estimations MTE-PML-GLEAM

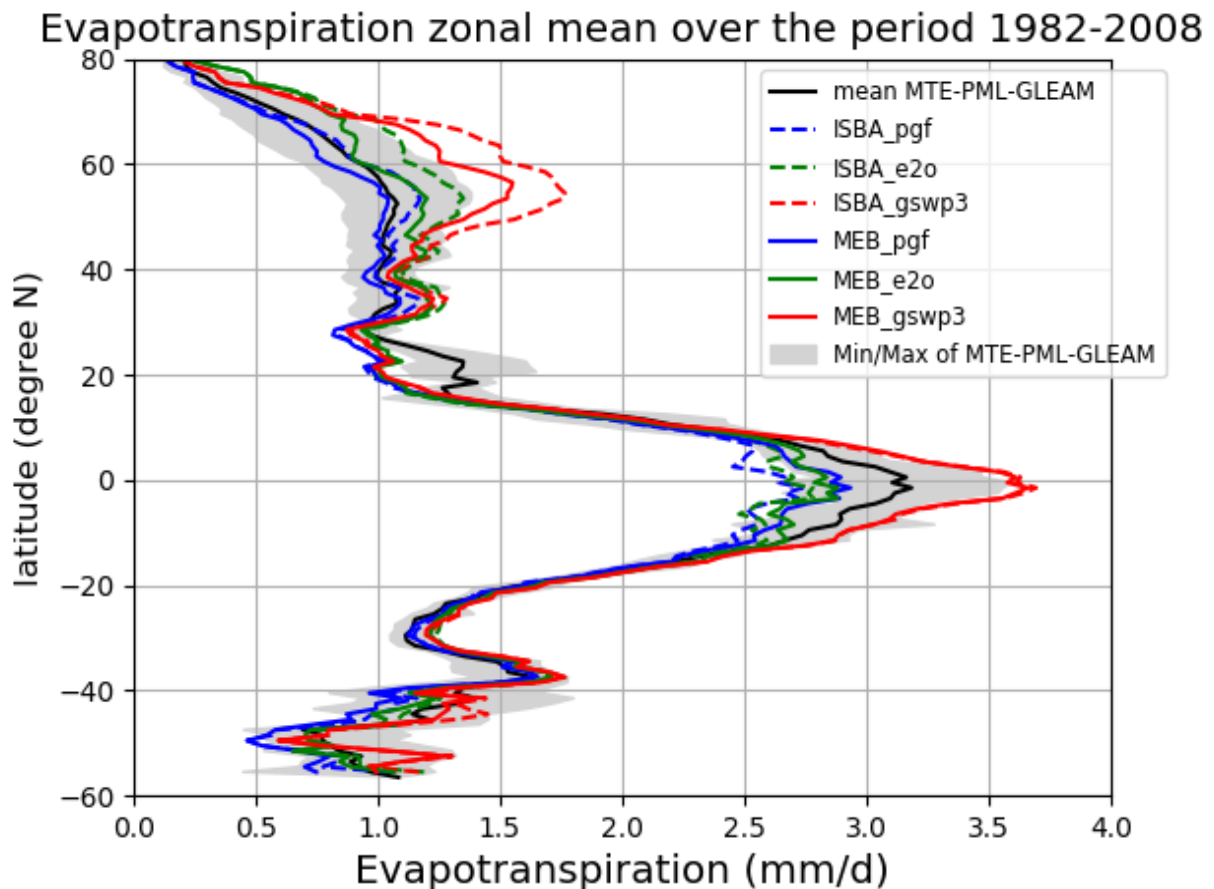


Figure 23: Moyennes zonales de la distribution d'évapotranspiration moyenne annuelle sur 1982-2008 estimées par 3 produits (MTE, PML et GLEAM) et simulées avec ISBA et ISBA-MEB, forcés par pgf, e2o et gswp3. La courbe noire correspond à la moyenne des 3 produits d'estimations MTE-PML-GLEAM. La zone grise est tracée en fonction du minimum et du maximum entre les 3 produits.

3. Fraction évaporative

Une fois qu'ISBA-MEB a été évalué sur des variables où des estimations étaient facilement disponibles, je vais comparer directement ISBA-MEB à ISBA pour l'étude de la fraction évaporative.

La fraction évaporative est une grandeur alternative au rapport de Bowen. Pour rappel, le rapport de Bowen correspond au ratio entre le flux de chaleur sensible Qh et le flux de chaleur latent Qe (2). Il est utile pour quantifier les échanges entre l'atmosphère et la surface et représente le bilan global d'énergie.

$$B = \frac{Qh}{Qe} \quad (2)$$

Cependant, il est peu pratique à utiliser sur les régions très sèches et déserts (où Qe tend vers 0) car il va ainsi tendre vers l'infini. Pour notre étude globale, on va donc plutôt choisir d'utiliser la fraction évaporative EF qui se calcule en fonction du rapport de Bowen mais contourne ce problème (3).

$$EF = \frac{Qe}{Qe + Qh} = \frac{1}{1 + B} \quad (3)$$

La fraction évaporative est un paramètre intéressant pour diagnostiquer le bilan d'énergie à la surface terrestre puisqu'elle est moins sensible aux variations journalières du rayonnement solaire incident que les composantes du bilan. En effet, elle est plus ou moins constante pendant la journée (selon les conditions météorologiques), contrairement aux flux turbulents de chaleur latente et sensible. Elle représente le rapport de l'énergie entrante utilisée pour l'évapotranspiration par rapport à la quantité totale d'énergie entrante.

La fraction évaporative correspond ainsi à un indice de capacité du sol à évaporer. Ses valeurs vont de 0 (surface non évaporante) à 1.26 (surface très évaporante). ISBA simule donc des fractions évaporatives (*Figure 24*) nulles au niveau des déserts et régions sèches (Sahara, Australie centrale) et des valeurs plus importantes au niveau des réglons humides (Amazonie, Europe et Asie du Nord).

La réponse d'ISBA-MEB par rapport à ISBA semble assez dépendante du forçage choisi. En effet, au niveau de l'Amazonie par exemple, selon le forçage utilisé, ISBA-MEB simule une capacité évaporative plus grande qu'ISBA avec pgf, égale avec e2o et plus faible avec gswp3 (*Figure 24*). Cependant, deux zones en Europe du nord et en Amérique Nord côté Ouest où est présente une partie de la Taïga montre systématiquement une fraction évaporative simulée plus faible avec ISBA-MEB qu'avec ISBA, en lien avec les résultats obtenus sur les sites de BERMS où il a été vu qu'ISBA avait tendance à surestimer le flux de chaleur latente par rapport à ISBA-MEB qui corrigeait légèrement l'excès d'évaporation du sol.

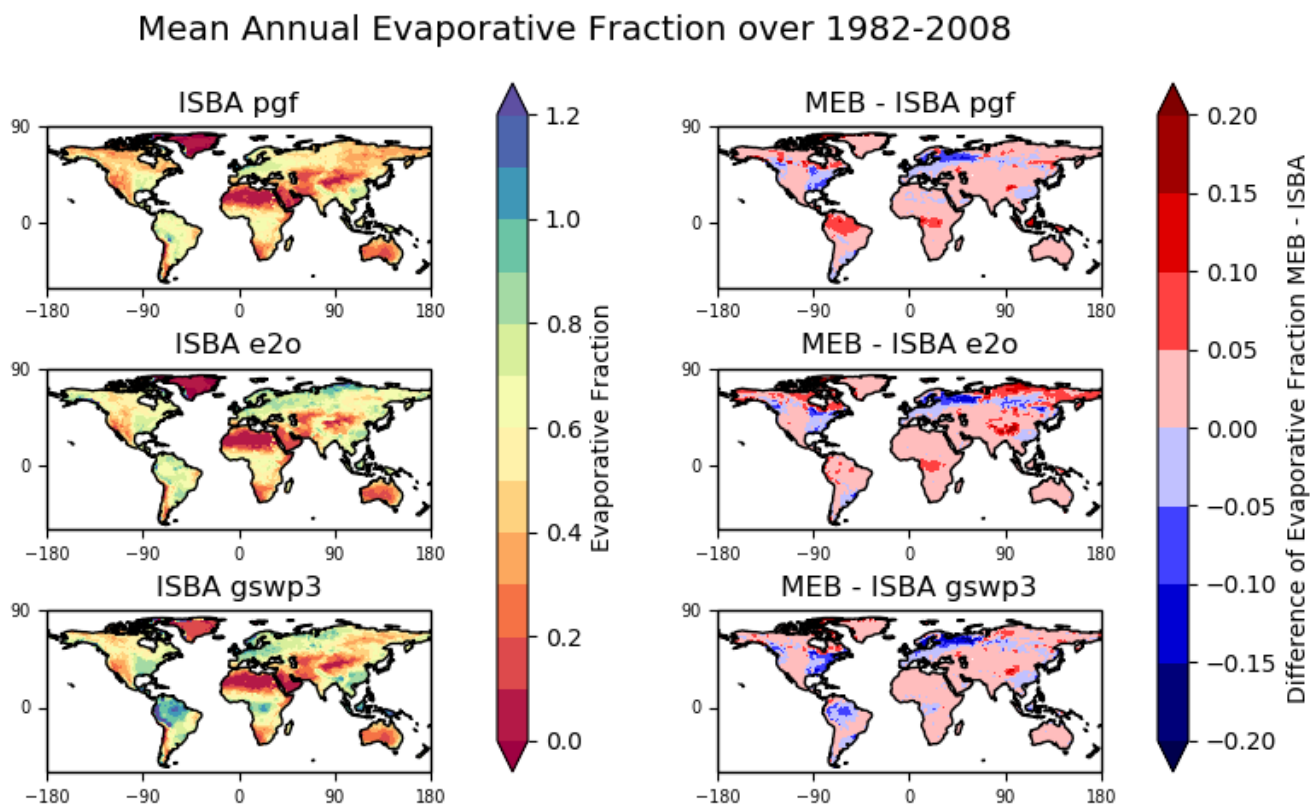


Figure 24: Fraction évaporative moyenne annuelle sur la période 1982-2008 simulée par ISBA et sa différence avec ISBA-MEB

Pour confirmer ces interprétations, on va rapidement s'intéresser au flux de chaleur latente (*Figure 25*). Des résultats cohérents avec ceux de la fraction évaporative sont obtenus. ISBA-MEB corrige bien la surestimation de chaleur latente faite par ISBA au niveau des régions boréales mais présente à nouveau une forte variabilité au forçage choisi sur les régions humides et tropicales.

Mean Annual flux LE in W.m-2 over 1982-2008

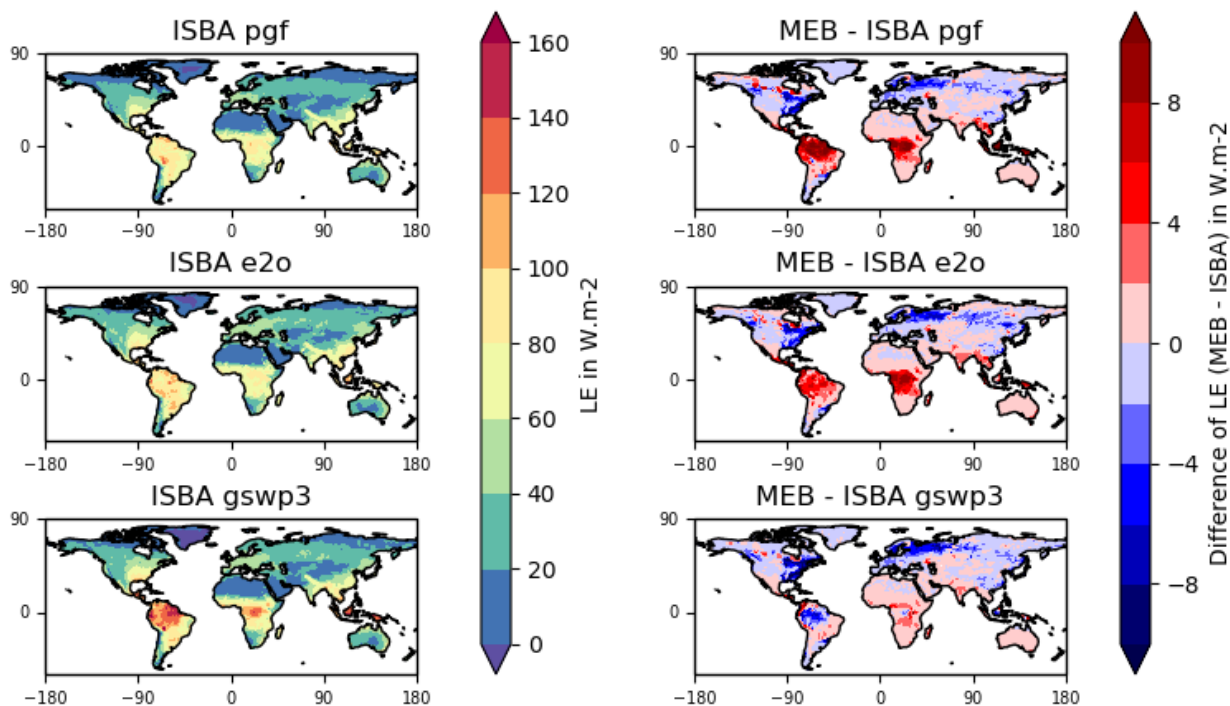


Figure 25: Flux de chaleur latente LE moyen annuel (en W.m-2) sur la période 1982-2008 simulée par ISBA et sa différence avec ISBA-MEB

De par la particularité des saisons en forêt boréales (avec des hivers longs, froids et secs et des étés courts, frais et humides), nous allons pousser l'étude de la fraction évaporative jusqu'à une échelle saisonnière et non plus seulement annuelle pour évaluer le comportement d'ISBA-MEB selon la saison. Par soucis de synthèse, seul le forçage E2O, défini comme le meilleur pour la neige et l'évapotranspiration, sera montré pour l'étude saisonnière.

Effectivement, il y a bien un intérêt à regarder à l'échelle saisonnière puisque la différence de fraction évaporative entre ISBA et ISBA-MEB est très variable selon la saison (*Figure 26*). On retrouve comme précédemment qu'avec le forçage e2o, ISBA-MEB a tendance à simuler une fraction évaporative plus forte qu'ISBA sur l'Amazonie et ce, quelque soit la saison. Au niveau des régions boréales cependant, on voit beaucoup plus de variabilité à l'échelle saisonnière qu'à l'échelle annuelle. A l'automne (SON), ISBA-MEB simule une fraction évaporative beaucoup plus forte qu'ISBA sur les régions boréales. A contrario en été (JJA), elle est plus faible avec ISBA-MEB qu'avec ISBA sur ces mêmes régions. Au printemps (MAM), on retrouve les deux zones en Europe du nord et en Amérique Nord-Ouest montrant une fraction évaporative simulée plus faible avec ISBA-MEB qu'avec ISBA, signe de la correction apportée par ISBA-MEB sur la surestimation d'évaporation du sol.

ISBA-MEB propose donc une variabilité de la fraction évaporative en fonction de la saison plus importante qu'ISBA au niveau des régions boréales. Peu de variabilité saisonnière est cependant observé dans le reste du monde.

L'étude du bilan d'énergie de surface via la fraction évaporative et le flux de chaleur latente a mis en évidence que le comportement d'ISBA-MEB est aussi dépendant du forçage qu'ISBA sur les régions tropicales et propose une plus grande variabilité saisonnière qu'ISBA sur les régions boréales. De plus, on peut considérer qu'ISBA-MEB apporte une amélioration en corrigeant en partie l'excès d'évapotranspiration simulée par ISBA sur ces régions.

Mean Annual Evaporative Fraction over 1982-2008

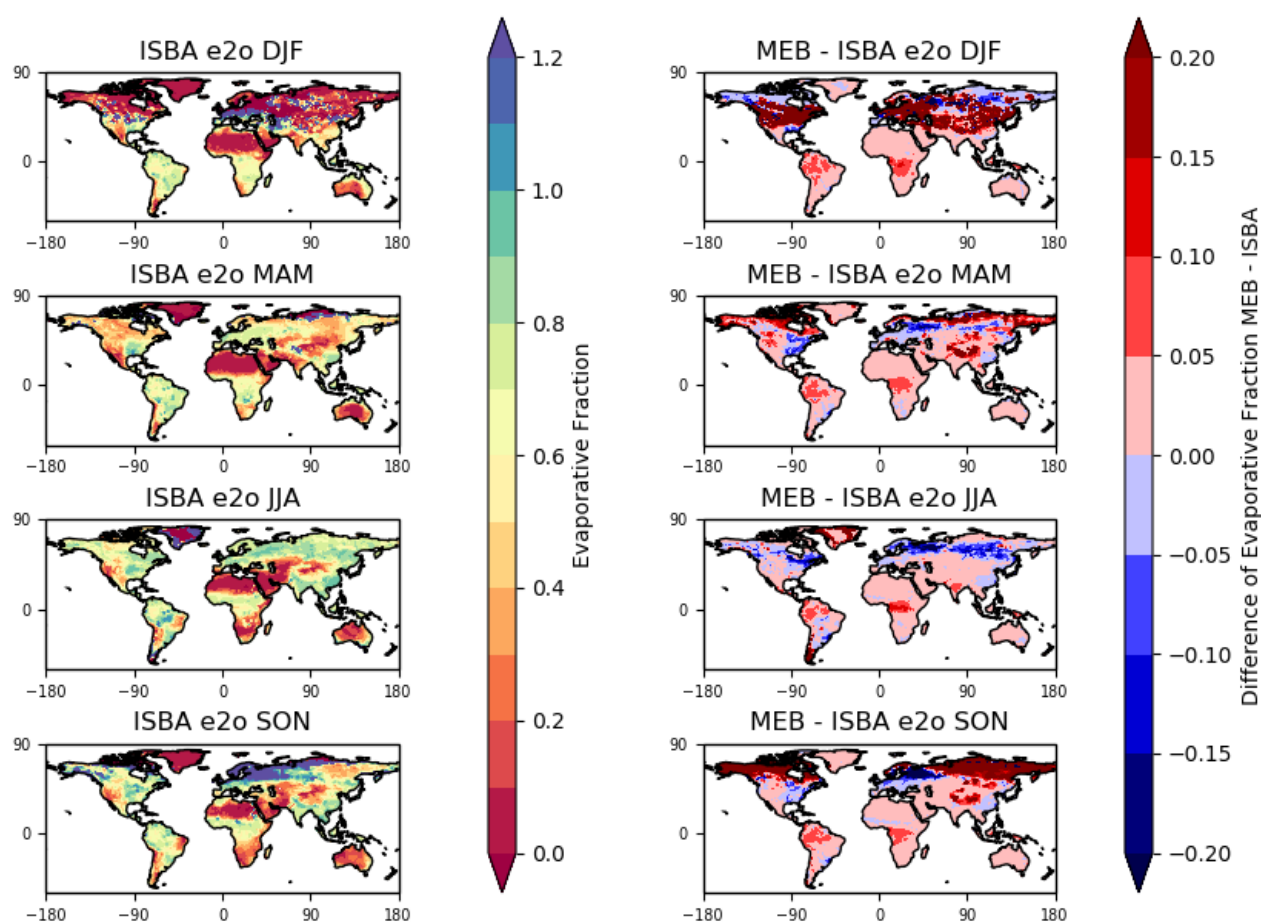


Figure 26: Moyenne saisonnière de la fraction évaporative (en $W.m^{-2}$) sur la période 1982-2008 simulée par ISBA forcé avec e2o et sa différence avec ISBA-MEB

Pour conclure cette évaluation à échelle globale, ISBA-MEB a bien démontré de meilleures performances qu'ISBA que ce soit au niveau de la représentation du manteau neigeux, de l'évapotranspiration ou de la fraction évaporative. Quelque soit le forçage, la quantité de neige en hiver et sa fonte au printemps, l'évapotranspiration à l'équateur et aux hautes latitudes et le flux de chaleur latente (dont la surestimation est en partie corrigée) ont bien été améliorés avec ISBA-MEB.

Conclusion

Du fait de leur importante influence sur le bilan d'énergie à l'interface surface-atmosphère mais aussi sur le bilan hydrologique continentale, il devient nécessaire d'améliorer la représentation des surfaces continentales si l'on veut continuer à améliorer les modèles de climat. Les processus des modèles de surface deviennent ainsi de plus en plus complexes. Le sol et le manteau neigeux ont récemment été détaillés en plusieurs couches aux caractéristiques différentes de manière à représenter des processus à plus fine échelle dans le premier mètre du sol et de pouvoir résoudre l'équation de la chaleur à une profondeur plus grande. Le couplage entre ISBA et CTRIP a permis de grandement améliorer les processus hydrologiques. Cependant, le schéma actuel ISBA génère encore des erreurs récurrentes dans la simulation de la température du sol et des flux turbulents.

L'option ISBA-MEB a été développée dans le but de participer à cet effort d'amélioration de la modélisation des processus de surface. Elle propose une représentation explicite de la végétation haute dans ISBA et ainsi la possibilité de pouvoir représenter les forêts. Pour l'évaluer, ISBA-MEB a d'abord été testé sur des sites forestiers locaux : les sites canadiens de BERMS, représentatifs des forêts boréales et des sites amazoniens, caractéristiques des forêts amazoniennes. Une fois ISBA-MEB validé sur ces sites locaux grâce à la comparaison avec les observations, il sera évalué à l'échelle globale en mode offline.

Le travail réalisé pendant mon stage a permis de mettre en évidence des résultats prometteurs sur les performances d'ISBA-MEB. Dans un premier temps, sur les sites de BERMS, ISBA-MEB a démontré une meilleure représentation du manteau neigeux sous les forêts, notamment au niveau de son timing de fonte au printemps (anticipée d'une vingtaine de jours avec ISBA et de un à deux jours seulement avec ISBA-MEB). Une fois le coefficient d'atténuation du moment ajusté à une valeur plus adaptée à la densité des forêts tropicales, l'étude du comportement d'ISBA-MEB au niveau de sites en forêt tropicale prouve que son utilisation ne rencontre pas de nouvelles limitations sur ces régions, et améliore même la simulation de certains flux, comme le flux de conduction du sol grâce à la couche de litière. Pour finir, à l'échelle globale, que ce soit concernant le manteau neigeux, l'évapotranspiration ou la fraction évaporation, ISBA-MEB a également présenté de meilleures performances qu'ISBA quelque soit le forçage atmosphérique utilisé parmi les trois sélectionnés.

Concernant la suite, en toute logique la prochaine étape sera d'évaluer ISBA-MEB lorsqu'il est couplé à un modèle atmosphérique comme ARPEGE-Climat afin de vérifier que son utilisation en mode couplé ne génère pas de nouvelles erreurs. Si c'est le cas, il faudra alors identifier la source de ces erreurs et potentiellement procéder à des ajustements de valeurs de paramètres, comme cela a été effectuée ici sur les forêts tropicales par exemple. Pour rappel, cette étape n'a pas pu être réalisée dans le cadre de mon stage par manque de temps, dû au grand nombre d'instabilités numériques découvertes au moment du couplage entre ISBA-MEB et ARPEGE-Climat. Ce couplage pose apparemment particulièrement problème dans les zones où peuvent être présents à la fois de la neige et de la végétation. Comme il s'agit d'un couplage qui n'a jamais été testé auparavant, un travail de fond sera nécessaire sur les aspects numériques de ce couplage.

Une des pistes pour encore améliorer ISBA-MEB, qui a été mise en lumière avec l'adaptation du coefficient d'atténuation du moment aux forêts tropicales, sera d'associer une valeur particulière pour un plus grand nombre de paramètres à chaque type de végétation présents dans le modèle. Par exemple, la paramétrisation de la couche de litière (assez peu étudiée dans le cadre de mon stage) comme son épaisseur, sa densité ou sa capacité d'isolation pourraient être fonction du type de végétation puisque dans la réalité, cette litière sera très différente selon si on se trouve en forêt tropicale ou en forêt boréale.

IV. Bibliographie

- Aouade, G., Jarlan, L., Ezzahar, J., Er-Raki, S., Napoly, A., Benkaddour, A., Khabba, S., Boulet, G., Garrigues, S., Chehbouni, A., Boone, A. : *Evapotranspiration partition using the multiple energy balance version of the ISBA-A-gs land surface model within the SURFEX platform v8.1 over two irrigated crops in a semi-arid Mediterranean region (Marrakech, Morocco)*, Hydrology and Earth System Sciences, 24,3789-3814, <https://doi.org/10.5194/hess-24-3789-2020>, 2020
- Baynton, H.W., Biggs, W.G., Hamilton, H.L., Sherr, P.E., Worth, J.B. : *Wind Structure in and above a Tropical Forest*, Journal of Applied Meteorology, 4, 670-675, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1965\)004<0670:WSIAAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1965)004<0670:WSIAAA>2.0.CO;2), 1965
- Boone, A., Samuelsson, P., Gollvik, S., Napoly, A., Jarlan, L., Brun, E., Decharme, B. : *The interactions between soil-biosphere-atmosphere land surface model with a multi-energy balance (ISBA-MEB) option in SURFEXv8 – Part 1 : Model description*, Geoscientific Model Development, 10, 843-872, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-843-2017>, 2017
- Calvet, J.-C., Noilhan, J., Roujean, J.-L. L., Bessemoulin, P., Cabelguenne, M., Olioso, A., Wigneron, J.-P.P. : *An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites*, Agricultural and Forest Meteorology, 92(2), 73-95, [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(98\)00091-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(98)00091-4), 1998
- Choudhury, B.J., Monteith, J.L. : *A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces*, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 114, 373-398, <https://doi.org/10.1002/qj.49711448006>, 1988
- Decharme, B., Brun, E., Boone, A., Delire, C., Le moigne, P., Morin, S. : *Impacts of snow and organic soils parametrization on northern Eurasian soil temperature profiles simulated by the ISBA land surface model*, The Cryosphere, 10, 853-877, <https://doi.org/10.5194/tc-10-853-2016>, 2016
- Decharme, B., Delire, C., Minvielle, M., Colin, J., Vergnes, J.-P., Alias A. et al: *Recent Changes in the ISBA-CTRIP Land Surface System for Use in the CNRM-CM6 Climate Model and in Global Off-Line Hydrological Applications*, Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 11, 1207-1252, <https://doi.org/10.1029/2018MS001545>, 2019
- Decharme, B., Delire, C., and Boone, A. : *La représentation des surfaces continentales dans la modélisation du climat à Météo-France*, La Météorologie, 108, 67-76, <https://doi.org/10.37053/lameteorologie-2020-0018>, 2020
- Decharme, B.: *Contribution à la modélisation des surfaces continentales pour l'échelle globale*. Hydrologie. Université Paul Sabatier – Toulouse III, <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02952807>, 2020
- Joetzjer, E., Delire, C., Douville, H., Ciais, P., Decharme, B., Carrer, D., Verbeeck, H., De Weirtdt, M., Bonal, D. : *Improving the ISBA_{cc} land surface model simulation of water and carbon fluxes and stocks over the Amazon forest*, Geoscientific Model Development, 8, 1709-1727, <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1709-2015>, 2015
- Napoly, A., Boone, A., Samuelsson, P., Gollvik, S., Martin, E., Seferian, R., Carrer, D., Decharme, B., Jarlan, L.: *The interactions between soil-biosphere-atmosphere land surface model with a multi energy balance (ISBA-MEB) option in SURFEXv8 – Part2 : Introduction of a litter formulation and model evaluation for local-scale forest sites*, Geoscientific Model Development, 10, 1621-1644, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1621-2017>, 2017
- Napoly, A., Boone, A., Welfringer, T. : *ISBA-MEB (SURFEX v8.1):model snow evaluation for local-scale forest sites*, Geoscientific Model Development, 13, 6523-6545, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-6523-2020>, 2020
- Noilhan, J. and Planton, S. : *A simple parametrization of land surface processes for meteorological models*, Mon. Weather. Rev., 117, 536-549, 1989
- Voltaire, A., Saint-Martin, D., Sénési, S., Decharme, B., Alias, A., Chevalier, M., et al. : *Evaluation of CMIP6 DECK Experiments with CNRM-CM6-1*, Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 11(7), 2019MS001683, <https://doi.org/10.1029/2019MS001683>, 2019

V. Index

Index des illustrations

Figure 1: Tour de mesure du site canadien OAS du programme BERMS.....	1
Figure 2: Schéma du modèle de climat CNRM-CM6-1. D'après Voldoire et al.2019.....	2
Figure 3: Schéma du cycle continental de l'eau actuellement utilisé dans ISBA. D'après Decharme et al. 2019.....	4
Figure 4: Schéma d'ISBA en période de neige sur un site forestier. D'après HDR Decharme 2020.....	5
Figure 5: Couverture neigeuse moyenne sur la période 1979-2010 au printemps (MAM) et en hiver (DJF) estimée par satellite NSIDC et simulée par ISBA forcé par pgf.....	5
Figure 6: Moyennes zonales associées aux distributions de couverture neigeuse moyenne sur la période 1979-2010 au printemps (MAM) et en hiver (DJF) estimées par satellite NSIDC ou simulées par ISBA.....	6
Figure 7: Schéma d'ISBA-MEB en période de neige sur un site forestier. D'après Boone et al. 2017.....	7
Figure 8: Localisation des 3 sites canadiens OAS, OBS et OJP. Carte extraite du site du Global Institute for Water Security de l'Université de Saskatchewan.....	9
Figure 9: Tours de mesure des sites OBS et OJP du programme BERMS. Extraite du site du Changing Cold Regions Network.....	9
Figure 10: Localisation des 5 sites amazoniens. Carte extraite du Joetzjer et al. 2015.....	10
Figure 11: Distribution des moyennes annuelles de la température de l'air à 2m (tas), de l'humidité spécifique (huss) et relative (hurs), de la vitesse du vent (sfcWind), le rayonnement incident shortwave (rsds) et long-wave (rlsds), et les précipitations (pr) du produit de forçage e2o et sa différence avec pgf et gswp3.....	11
Figure 12: Couverture neigeuse moyenne sur la période 1979-2010 en automne (SON), en hiver (DJF) et au printemps (MAM) estimée par satellite NSIDC.....	12
Figure 13: Évapotranspiration moyenne annuelle sur la période 1982-2008 estimée par 3 produits (MTE, PML et GLEAM).....	13
Figure 14: Cycle annuel moyen de hauteur de neige (cm) sur la période 1999-2010 observée et simulé par ISBA et ISBA_MEB sur les 3 sites de BERMS.....	14
Figure 15: Cycle diurne moyen des flux de surface du site OJP.....	16
Figure 16: Cycle diurne moyen des flux de surface du site Santarem_km83.....	17
Figure 17: Cycle diurne moyen des composantes du flux de chaleur latente LE du site Santarem_km83.....	18
Figure 18: Cycle diurne moyen des composantes du flux de chaleur latente LE du site Santarem_km83 pour plusieurs valeurs de transmission (diminuée de 50, 75, 95).....	19
Figure 19: Cycle diurne moyen des composantes du flux de chaleur latente LE du site Manaus_km34 pour plusieurs valeurs du coefficient d'atténuation du moment ZALPHA (4,8,10,12).....	20
Figure 20: Différence de Couverture neigeuse moyenne sur la période 1979-2010 au printemps (MAM) simulée par ISBA et ISBA-MEB forcés par pgf, e2o ou gswp3 par rapport aux estimations NSIDC.....	21
Figure 21: Moyennes zonales des distributions de couverture neigeuse estimées par NSIDC, simulées par ISBA ou ISBA-MEB et forcées par pgf, e2o, gswp3.....	22
Figure 22: Différence d'Évapotranspiration moyenne annuelle sur la période 1982-2008 simulée par ISBA et ISBA-MEB forcé par pgf, e2o ou gswp3 par rapport à la moyenne des estimations MTE-PML-GLEAM.....	23
Figure 23: Moyennes zonales de la distribution d'évapotranspiration moyenne annuelle sur 1982-2008 estimées par 3 produits (MTE, PML et GLEAM) et simulées avec ISBA et ISBA-MEB, forcés par pgf, e2o et gswp3. La courbe noire correspond à la moyenne des 3 produits d'estimations MTE-PML-GLEAM. La zone grise est tracée en fonction du minimum et du maximum entre les 3 produits.....	24
Figure 24: Fraction évaporative moyenne annuelle sur la période 1982-2008 simulée par ISBA et sa différence avec ISBA-MEB.....	25
Figure 25: Flux de chaleur latente LE moyen annuel (en W.m-2) sur la période 1982-2008 simulée par ISBA et sa différence avec ISBA-MEB.....	26
Figure 26: Moyenne saisonnière de la fraction évaporative (en W.m-2) sur la période 1982-2008 simulée par ISBA forcé avec e2o et sa différence avec ISBA-MEB.....	27

Index des tableaux

Tableau 1: Moyenne et écart-type du biais entre modèle et observations du dernier jour de neige pour les 3 sites de BERMS.....	15
Tableau 2: Coefficient de corrélation de Pearson entre observations et modèles ISBA et ISBA-MEB pour les 3 sites OAS, OBS et OJP.....	15
Tableau 3: Récapitulatif des tests de sensibilité réalisés sur les paramètres de transmission et de coefficient d'atténuation du moment.....	19