HAL
open science

Modélisation de la végétation boréale et de sa dynamique dans le modèle de surface continentale ORCHIDEE

Arsène Druel

To cite this version:

Arsène Druel. Modélisation de la végétation boréale et de sa dynamique dans le modèle de surface continentale ORCHIDEE. Climatologie. Université Grenoble Alpes, 2017. Français. NNT : 2017GREAU014 . tel-01654663

HAL Id: tel-01654663

https://theses.hal.science/tel-01654663v1

Submitted on 4 Dec 2017

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

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

Communauté UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE LA COMMUNAUTÉ UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : Sciences de la Terre et de l'Univers et de l'Environnement

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Arsène Druel

Thèse dirigée par **Gerhard Krinner et Philippe Peylin**

préparée au sein du **Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE, UMR 5183, CNRS-UGA)**
dans **l'École Doctorale Terre Univers Environnement**

Modélisation de la végétation boréale et de sa dynamique

dans le modèle de surface continentale ORCHIDEE

Thèse soutenue publiquement le **23 Janvier 2017**,
devant le jury composé de :

Mr. Philippe Choler
Directeur de Recherche au CNRS, LECA (Président du jury)
Mme Delire Christine
Chargée de recherche au CNRS, CNRM (Examinatrice)
Mr. Jed Kaplan
Professeur, IESD Lausanne (Rapporteur)
Mr. Joël Guiot
Directeur de Recherche au CNRS, CEREGE (Rapporteur)
Mr. Gerhard Krinner
Directeur de Recherche au CNRS, LGGE (Directeur de thèse)
Mr. Philippe Peylin
Directeur de Recherche au CNRS, LSCE (Directeur de thèse)

Résumé

L'évolution du climat sur les prochaines dizaines voire centaines d'années pose de nombreuses interrogations, du fait de l'impact de l'homme. En effet, les émissions de gaz à effet de serre depuis le début de l'ère industrielle entrainent une augmentation des températures. Celle-ci est susceptible d'affecter les écosystèmes terrestres, notamment dans les régions boréales où les augmentations de température observées et projetées sont plus importantes que dans les moyennes latitudes. Une évolution de ces écosystèmes peut entrainer des rétroactions sur le climat. Ainsi le phénomène actuel observé de verdissement des régions boréales (ou « Arctic greening ») peut par exemple augmenter ce réchauffement via une diminution de l'albédo du fait de l'augmentation du couvert végétal. Afin de répondre à ces interrogations, des modèles climatiques ont été développés, intégrant des modèles de surface continentale représentant les flux de matière et d'énergie. Le travail effectué dans cette thèse a été mené à partir de l'un d'eux, le modèle de surface continentale ORCHIDEE, qui comprend une description succincte de la végétation boréale. L'objectif de cette thèse était donc l'implémentation puis la modélisation de la végétation boréale.

Afin de décrire la végétation présente au niveau des hautes latitudes, i.e. les toundras et les steppes, de nouveaux types de végétation (PFTs) ont été intégrés au modèle à partir des PFTs déjà présents. Tout d'abord, les plantes non vasculaires (NVPs) ont été introduites pour représenter les lichens et les bryophytes présents dans les toundras désertiques et les tourbières, ensuite les buissons pour représenter une strate intermédiaire entre les arbres et les herbacées dans les toundras, et enfin des herbacées C3 boréales pour distinguer la végétation considérée dans les steppes boréales et les prairies tempérées. La description de cette végétation boréale s'est accompagnée de l'intégration de nouveaux processus caractéristiques, allant de l'implémentation d'interactions nouvelles telles que la protection des buissons par la neige en hiver, au simple choix de nouveaux paramètres du PFT avec par exemple la diminution de la capacité photosynthétique des herbacées C3 boréales par rapport aux C3 tempérées, en passant par la modification de processus déjà présents dans le modèle comme la conductance stomatique des NVPs. D'autres processus en lien avec la végétation ont également été mis à jour ou corrigés. Enfin, pour modéliser la dynamique de la végétation boréale, les nouveaux PFTs ont été intégrés à la description initialement présente dans le modèle.

Ces modifications ont permis de modéliser la végétation boréale et ses impacts sur les autres variables du système (flux de matière ou d'énergie), soit avec une végétation prescrite (simulations de la période récente), soit avec une végétation dynamique (simulations présentes et futures, à partir des scénarios RCPs 4.5 et 8.5). Les simulations effectuées avec la végétation prescrite montrent que l'on représente mieux le comportement de la végétation avec les nouveaux PFTs. Avec les PFTs originaux la productivité et la biomasse étaient surestimées dans les régions boréales et entrainaient une sous-estimation de l'albédo et une surestimation de la transpiration. Les simulations avec une végétation dynamique ont démontré la capacité du modèle à représenter avec la nouvelle végétation boréale les biomes actuels ainsi que l'« Arctic greening ». Par contre, l'embuissonement observé dans plusieurs études n'a pas été reproduit. De même, l'impact des nouveaux PFTs sur les autres sorties du modèle est important, avec par exemple une diminution de la productivité ou de l'albédo en hiver par rapport à la végétation originale. Ainsi, globalement l'introduction des PFTs boréaux s'est traduite par une meilleure description des écosystèmes arctiques et des échanges d'énergie et de matière avec l'atmosphère. Par contre, la protection du pergélisol par les NVPs n'a pas été aussi importante qu'attendu et a été compensée par une augmentation de l'humidité du sol (due aux buissons et herbacées boréales).

L'introduction de la nouvelle végétation boréale dans le modèle ORCHIDEE semble donc pertinente et met en évidence l'importance de la représentation de ces écosystèmes. Ce travail ouvre donc des perspectives pour améliorer les simulations climatiques, tant futures que passées. La prochaine étape est de modéliser la végétation depuis l'Holocène jusque dans le futur afin de simuler la quantité de carbone contenu aujourd'hui dans le pergélisol, et projeter le devenir de ces stocks dans le contexte de réchauffement climatique et de fonte du pergélisol.

Abstract

Climate evolution over the next ten to hundred years involves many questions, linked to the impact of man. Indeed, greenhouse gases emissions since the beginning of the industrial era lead to an increase in temperature. The latter can affect terrestrial ecosystems, particularly in boreal regions where observed and projected temperature increase is larger than in mid-latitudes. Evolution of these ecosystems can trigger climate feedbacks. For example, the currently observed « Arctic greening » phenomenon could enhance the warming via a decrease in albedo due to the increase in vegetation cover. In order to address these questions, climate models were developped, including continental surface models taking into account the fluxes of mass and energy. In this thesis, such a model was used, the continental surface scheme ORCHIDEE, which includes a succinct description of boreal vegetation. The aim of this work was thus the implementation and the modeling of boreal vegetation.

In order to describe high-latitude vegetation, i.e. toundras and steppes, new plant functional types (PFTs) were integrated into the model based on existing PFTs. First, non-vascular plants (NVPs) were integrated to represent lichens and bryophytes found in desert toundras and peatlands, then shrubs to represent an intermediate stratum between trees and grasses in toundras, and finally boreal C3 grasses to distinguish vegetation found in boreal steppes and temperate grasslands. The description of this boreal vegetation was accompanied by the integration of new charachteristic processes, from the implementation of new interactions such as the protection of shrubs by snow in winter, to the simple choice of new PFT parameters such as the lower photosynthetic capacity of boreal C3 grasses compared to temperate C3 grasses, through the modification of existing processes such as the stomatal conductance of NVPs. Other processes linked to vegetation were also updated or corrected. Finally, to model the dynamics of boreal vegetation, new PFTs were integrated into the initial description in the model.

Those changes enabled the modeling of boreal vegetation and its impact on other variables (mass or energy fluxes), either using a prescribed vegetation (simulations on the recent period), or using a dynamical vegetation (recent and future simulations using RCPs 4.5 and 8.5). Simulations using the prescribed vegetation indicated that vegetation behaviour is better represented with the new PFTs. With original PFTs, productivity and biomass were overestimated in boreal regions, and lead to an underestimation of albedo and an overestimation of transpiration. Simulations using a dynamical vegetation demonstrated the ability of the model, using the new boreal vegetation, to represent current-day biomes as well as « Arctic greening ». However, the shrubification observed in several studies was not reproduced. Similarly, the impact of new PFTs on other model outputs is important, with for example a decrease in productivity or albedo in winter compared to the original vegetation. Thus, the introduction of boreal PFTs generally resulted in a better description of Arctic ecosystems and of the exchanges of energy and mass with the atmosphere. On the other hand, the protection of permafrost by NVPs was not as substantial as expected and was compensated by an increase in soil humidity (due to shrubs and boreal grasses).

The introduction of the new boreal vegetation in the ORCHIDEE model thus seems relevant, and highlights the importance of representing these ecosystems. This work opens up new perspectives to improve future and past climate simulations. The next step consists in modeling vegetation since the Holocene into the future in order to simulate the current amounts of carbone in the permafrost, and to project the outcome of these stocks in the context of climate change and permafrost melt.

Remerciements

Une thèse c'est tout d'abord entre 3 et 4 ans d'aventure. Je remercie donc Philippe et Gerhard, mes deux co-directeurs de thèse, de m'avoir fait confiance et de m'avoir donné l'opportunité de mener à bien ce sujet à l'intersection de la biologie, la physique, la chimie et l'informatique.

Je tiens également à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail. Tout d'abord les rapporteurs Joël Guiot et Jed Kaplan pour avoir lu et évalué ce manuscrit, mais également les examinateurs Christine Delire et Philippe Choler pour leur analyse et les conseils qu'ils pourront m'apporter.

Un grand merci également au personnel des laboratoires LSCE et LGGE que j'ai eu l'occasion de rencontrer pendant ma thèse. Particulièrement Philippe Ciais et Nicolas Viovy qui m'ont accompagné et m'ont apporté leurs conseils scientifiques tout au long de ma thèse. Je citerai également Fabienne, Joséphine, Bertrand, Nicolas (Vuichard) au LSCE et Claire au LGGE, et m'excuse d'avance pour les potentiels oublis. Merci également pour les possibilités offertes de participer aux mesures de bilan de masse des glaciers, avec une pensée spéciale pour Delphine & co. et la sortie que nous avons faite au glacier de Saint-Sorlin.

Merci par ailleurs à ceux qui m'ont accompagné au LECA (Francois, Eric, Stephane, Bertrand, etc.) pour les enseignements que j'ai dispensés pendant ces 3 ans, ainsi qu'à ma tutrice Laurence Després. Cette partie cachée de la thèse a été l'une des plus enrichissantes.

Je voudrais également remercier Peter Kuhry, Torben Christensen et Gustaf Hugelius pour nos échanges lors des rencontres franco-suédoise ainsi que pour leur soutien financier.

Enfin et surtout merci à toutes les personnes qui m'ont accompagné personnellement pendant toute cette thèse, car ce sont eux qui donnent à ces années tout leur sens (n'ayons pas peur des mots) :

- Les collègues et amis du LGGE. Particulièrement à tous ceux qui ont connu les prouesses techniques de Aïe Mon Pied, par ordre chronologique : Tesfaye, Alex, Saehee, Rubén, Fiston, Chao, Ambroise, Laure, Julien, Jinhwa, Martin,…
- Les vieux (ou anciens), qui ont continué à me supporter depuis un moment, avec notamment Pikku, Yohann, Pierre, Thomas, Gascon, Axel, Hélène, Johanna, Amandine, Marie Laure, Léa, Claire, Sandrine, Iona, etc (la liste est trop longue).
- La famille, avec Odile et Michel, Tata Edith, la grande fratrie (dont un doublon), les cousins, la belle-famille… Avec mention spéciale pour mon filleul Axel.
- Bien sûr Lisa Chérie pour son soutien (et pour la correction du manuscrit).
- Et le meilleur pour la fin. Merci Debo pour ton soutien indéfectible, tes nombreuses relectures, ta présence…, sans lesquels cette thèse et ces années ne seraient pas ce qu'elles sont.

TABLE DES MATIERES

Résumé....1
Abstract....3
Remerciements....5

Table des matières 7

Chapitre 1 Introduction 9
1.1. Le système climatique et le cycle du carbone 10
1.1.1. L'effet de serre....10
1.1.2. Le cycle du carbone....11
1.1.3. Le « changement climatique » 13
1.1.4. Importance de la biosphère....15
1.2. Modélisation climatique 18
1.2.1. Modélisation climatique globale....18
1.2.2. Les modèles de surface continentale....20
1.3. Importance de la végétation boréale....24
1.4. Objectifs et plan de la thèse....26

Chapitre 2 Contexte d'étude 28
2.1. Le modèle de surface ORCHIDEE....28
2.1.1. Un modèle de surface....28
2.1.2. Présentation générale d'ORCHIDEE....30
2.1.3. Représentation de la végétation, du sol et de la neige 32
2.1.4. Présentation des principaux processus....38
2.2. Les données....51
2.2.1. Région étudiée....51
2.2.2. Données de forçage....52
2.2.3. Une nouvelle carte de Types Fonctionnels de Plantes (PFTs) 53
2.2.4. Données biogéochimiques sur les nouveaux PFTs....56
2.3. La méthode....59
2.3.1. Méthodologie générale....59
2.3.2. L'optimisation 62
2.3.3. Outils mathématiques utilisés....65

Chapitre 3 La végétation boréale redéfinie 73
3.1. Motivations et description succincte des PFTs boréaux....73
3.2. Impacts induits par la modification du modèle en préambule au développement des nouveaux PFTs....75
3.3. Nouvelle représentation de la végétation boréale (article in review)....77
3.4. Conséquences de l'ajout d'une nouvelle végétation boréale 121

Chapitre 4 Une nouvelle dynamique 124
4.1. Motivation et description succincte de la dynamique de végétation associée aux nouveaux PFTs 124
4.2. Implémentation et impacts de l'actualisation de la dynamique de végétation (Article in prep.) 125
4.3. Étude complémentaire des simulations DGVM 155
4.3.1. La représentativité de l'albédo 155
4.3.2. Le bilan hydrique 157
4.3.3. Comparaison des simulations 13 et 16 PFTs à l'aide de la biomisation. 158
4.3.4. Résultats de nouvelles simulations 160
4.4. Intérêts, perspectives et limites de l'implantation de la dynamique de la végétation 162

Chapitre 5 Conclusions et perspectives 165
5.1. Conclusions 165
5.2. Perspectives 167

Bibliographie 170

Liste des figures 179

Liste des tableaux 182

ANNEXES 183
Discrétisation verticale des couches thermiques 184
Organigramme des modules utilisés dans ORCHIDEE 185
Résumé des données de Sibérie par site et par année 194
« Cross walking table » utilisée pour l'obtention de la carte de végétation avec les nouveaux PFTs 197
Comparaison des LAI simulés hors DGVM (dans OCR2.0) avec les produits GLASS et GIMMS 199
Bilan hydrique au-dessus de 65°N, sur toutes les latitudes (avec la végétation dynamique) 200

Chapitre 1
INTRODUCTION

Dans un contexte de changement climatique planétaire, estimer la tendance des principales variables climatiques (température et précipitation) à l'échelle des dix à cent prochaines années est devenu un enjeu stratégique pour les générations futures. Ainsi la compréhension et la modélisation des écosystèmes terrestres sont fondamentales afin d'évaluer le rôle de la biosphère continentale dans le système climatique et afin d'appréhender les réponses de ces écosystèmes aux changements environnementaux à venir. Il est aussi crucial d'étudier la coévolution et toutes les rétroactions entre le climat et les écosystèmes.

Des modèles du système Terre (ou « Earth System Model ») ont donc été développés. Ils comprennent trois grandes composantes qui modélisent les échanges thermiques et les flux de matière : une première qui modélise la circulation au niveau de l'atmosphère, une seconde qui décrit la circulation océanique ainsi que la biosphère marine, les échanges d'énergie et d'eau, et enfin une troisième qui représente les écosystèmes terrestres et les flux au niveau de la surface. Suivant les modèles le degré de complexité des processus physiques ou biologiques intégrés est différent et la description du temps ou de l'espace est variable. Néanmoins les différents modèles globaux sont inter-comparés dans de nombreux projets tels que le « Coupled Model Intercomparison Project » (CMIP) afin d'évaluer et d'améliorer les simulations climatiques.

La motivation première de cette thèse provient d'une description encore simpliste dans ces modèles de la végétation en général et de la végétation boréale en particulier. Cet intérêt est renforcé par une caractéristique qui accompagne les changements climatiques passés ainsi que présents et très probablement futurs : l'amplification arctique, c'est-à-dire le fait que le réchauffement ou refroidissement observé soit amplifié dans l'Arctique par rapport au reste du globe. Ainsi, lors de certaines variations climatiques passées les rétroactions liées à la végétation des hautes latitudes ont amplifié le changement (comme lors du début de la dernière ère glaciaire). Afin de simuler de telles interactions, des efforts doivent être faits dans la modélisation des bilans d'eau, de carbone et d'énergie à la surface et plus précisément dans la représentation de la végétation boréale dans les modèles. L'objectif sous-jacent à mon travail est donc d'être capable de modéliser les changements régionaux de répartition de la végétation boréale et d'approfondir les interactions végétation - environnement (protection thermique du sol, modification de l'albédo, etc.).

Dans ce contexte, cette thèse a pour objectif principal d'incorporer une description détaillée des écosystèmes boréaux dans le modèle de surface continentale ORCHIDEE (Organising Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems), qui appartient au « Earth System Model » de l'Institut Pierre

Simon Laplace (IPSL). Plus précisément il s'agit d'améliorer la description existante basée sur une distinction entre arbres, herbacées et sol nu. En partant d'écosystèmes biologiques très complexes tels que les toundras ou les taïgas, il faut donc identifier les végétations clés, les représenter dans ce modèle tant d'un point de vue biogéochimique que thermique (impact sur le cycle du carbone, de l'eau, sur l'albédo, la conductivité thermique, etc.) et être capable d'étudier l'impact différencié de chaque type de végétation sur le climat. Enfin, il est nécessaire de rester relativement simple dans les processus représentés étant donné qu'il s'agit d'un modèle global complexe traitant l'ensemble du continuum sol – plante.

1.1. Le système climatique et le cycle du carbone

L'augmentation de la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère a des conséquences importantes sur le climat. Nous allons faire le point sur les éléments déjà établis expliquant en quoi cela implique un changement climatique et comment la biosphère joue un rôle prépondérant.

1.1.1. L'effet de serre

La température présente à la surface de la Terre découle d'un équilibre entre le flux d'énergie lié principalement à l'absorption du rayonnement solaire par la surface terrestre et à la géothermie, et le flux d'énergie émis par infrarouge en fonction de la température terrestre selon la loi de Stefan-Boltzmann. Si l'on considère la Terre sans atmosphère (tel un corps noir), sa température avoisinerait en moyenne les -18°C (e.g., Hansen et al., 1981).

C'est grâce à l'atmosphère et plus particulièrement aux gaz à effet de serre (GES) qu'elle contient que la température à la surface de la Terre est en moyenne de 15°C (donc 33°C au-dessus de la température d'équilibre en absence de l'effet de serre). L'atmosphère absorbe ou réfléchit près de la moitié du rayonnement solaire incident mais seulement un tiers du rayonnement infrarouge terrestre est directement émis par la Terre dans l'espace (Figure 1). Si les GES n'absorbent que très peu de rayonnement solaire, ils absorbent près de neuf dixièmes du flux provenant des ondes des grandes longueurs d'ondes (« longwave » en Anglais) émises par la surface et les réémettent en grande partie vers la surface terrestre. Ce processus appelé « effet de serre » explique la température terrestre actuelle. Les GES principalement responsables de l'effet de serre sont la vapeur d'eau (H_2O) pour 50-57%, le gaz carbonique (CO_2) pour 19-24%, devant le méthane (CH_4), l'ozone (O_3), l'oxyde nitreux (N_2O), ou encore les chlorofluorocarbures (CFC) (Schmidt et al., 2010).

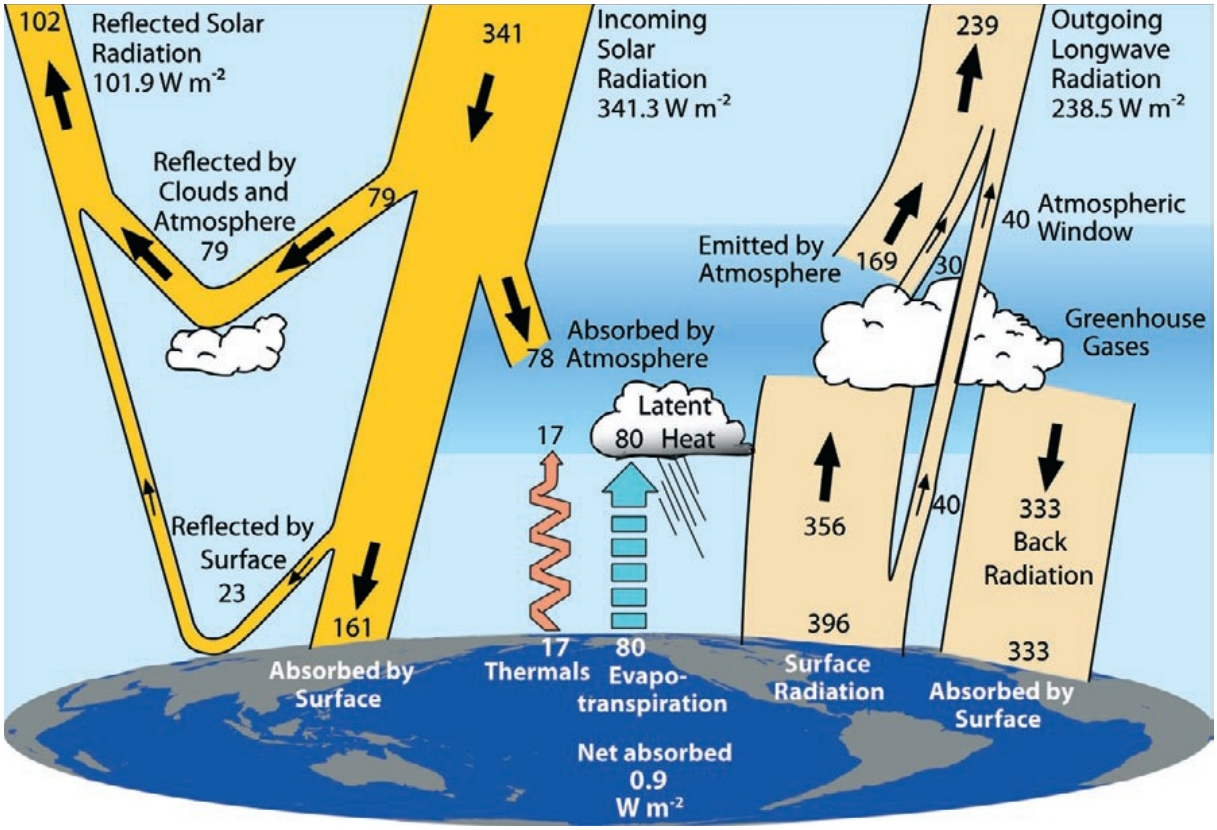


Figure 1. Le bilan radiatif terrestre : moyenne annuelle du bilan énergétique (W.m^{-2}) (Trenberth et al., 2009 – Fig. 1)

Mais le cycle et les équilibres de ces gaz dans l'atmosphère n'ont pas la même dynamique : si l'eau reste en moyenne neuf jours dans l'atmosphère (entre son évaporation depuis la surface et sa précipitation), le CO_2 est présent pendant des décennies. Ainsi, comme le temps de résidence de l'eau est faible, sa teneur dans l'atmosphère se réajuste à l'équilibre très rapidement suite à toute modification, alors qu'une perturbation de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère peut avoir des effets durables (Lacis et al., 2010). C'est pourquoi le $C0_2$ est considéré comme le GES majeur pouvant amener une modification du climat, alors que la teneur en eau qui dépend principalement de la température est considérée comme une rétroaction.

1.1.2. Le cycle du carbone

Si l'on étudie les dernières 800 000 années à l'aide des bulles d'air emprisonnées dans l'épaisse couche de glace présente en Antarctique, on s'aperçoit que la concentration du dioxyde de carbone est assez stable et suit un cycle principal d'environ 100 000 ans. Comme observé dans Petit et al. (1999) à Vostock puis dans (Masson-Delmotte et al., 2010) à Dôme C, le méthane suit une même tendance, et les températures co-évoluent avec la concentration en espèces carbonées (CO_2 et CH_4) proportionnellement (Figure 2), notamment à cause de l'effet de serre induit décrit dans la section 1.1.1.

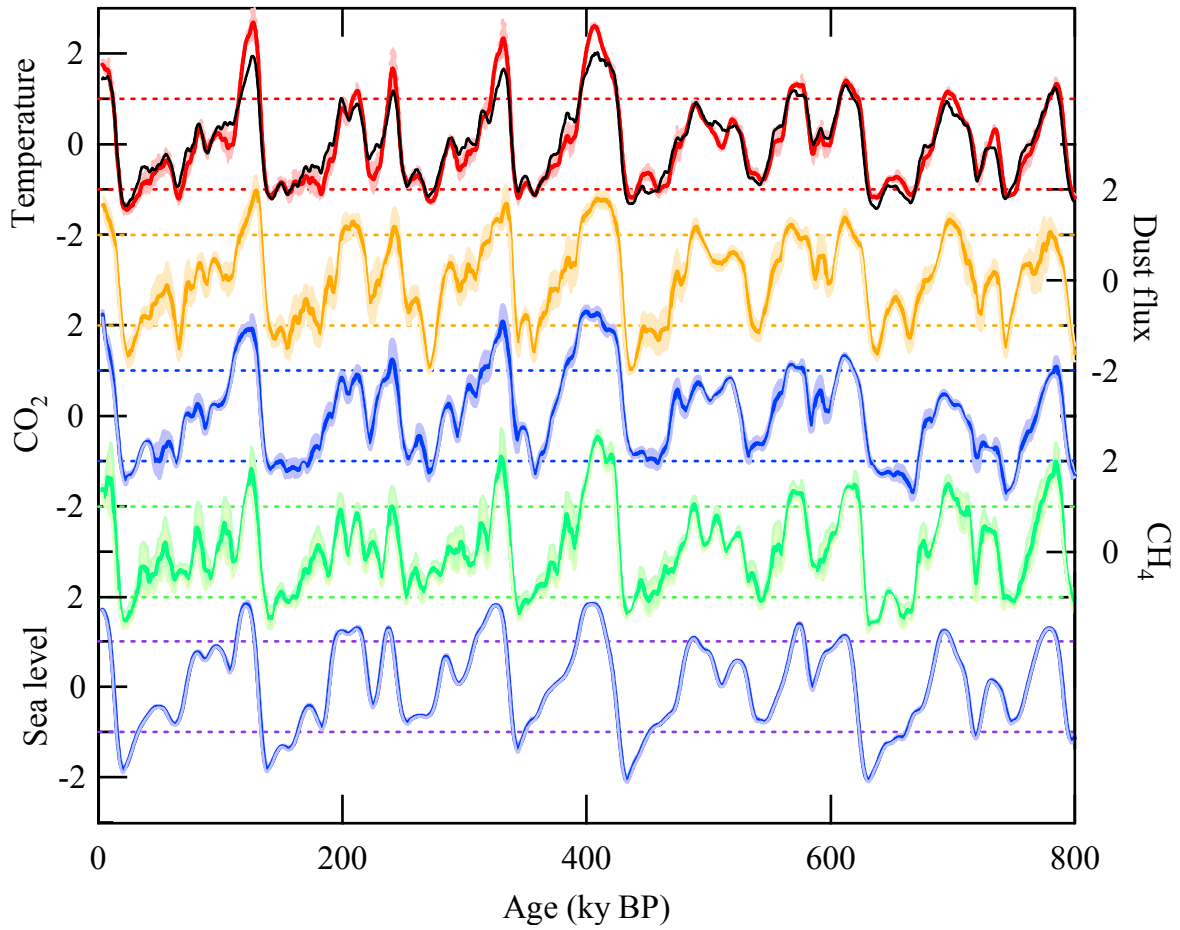


Figure 2. Séries chronologiques des indices climatiques (en unité de déviation standard) provenant de la carotte EPICA dôme C, centrés et normalisés (moyenne sur 7000 ans en trait plein et écart-type correspondant en ombragé), pour : la température de l'atmosphère (rouge), la poussière (échelle logarithmique, bon proxy des aérosol), le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et le niveau des océans (Masson-Delmotte et al., 2010).

Cette évolution cyclique de la température et de la concentration en dioxyde de carbone est directement reliée aux variations de la planète Terre sur son orbite, déclinées en trois processus distincts.

La variation d'excentricité : la Terre tourne autour du Soleil en décrivant une ellipse (et non un cercle parfait). Cette ellipse évolue par période d'environ 100 000 ans en s'excentrant (de quelques 18 millions de kilomètres), modifiant ainsi la distance entre la Terre et le Soleil. Cette modification peut avoir un impact direct sur les températures et le climat, comme de nos jours où la Terre se retrouve plus proche du Soleil en décembre.

La variation d'obliquité : si l'on relie le pôle Sud et le pôle Nord par un axe (axe des pôles), on s'aperçoit que celui-ci n'est pas perpendiculaire à l'ellipse de la Terre autour du Soleil mais qu'il forme un angle de 23°27' par rapport à cette perpendiculaire. Cet angle varie entre 22° et 25° avec une périodicité de 40 000 ans environ. De même, cette inclinaison va avoir un impact sur l'énergie reçue provenant des rayons du Soleil, notamment au niveau des pôles : plus l'angle va être important, plus les hivers aux moyennes et hautes latitudes seront rigoureux.

La précession des équinoxes : l'axe des pôles, en plus de changer d'angle, évolue et décrit un cône autour de sa position de « référence », suivant un cycle principal de 23 000 ans et un cycle mineur de 19 000 ans.

C'est la combinaison de ces trois facteurs qui permet de décrire la succession d'ères glaciaires et interglaciaires depuis des centaines de milliers d'années, ainsi que les variations de concentration en dioxyde de carbone observées. Mais derrière ces variations d'orbite, c'est essentiellement l'impact sur l'insolation en été au niveau des hautes latitudes qui entraine des variations climatiques, ce qui augmente donc l'importance du rôle de la végétation des hautes latitudes.

1.1.3. Le « changement climatique »

Comme on peut le remarquer sur la Figure 3, si le taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère est en croissance continue depuis le Dernier Maximum Glaciaire (environ 20 000 ans), suivant une évolution cyclique « normale », depuis l'époque préindustrielle cette concentration (estimée alors à 286 ppm, parties par million) a significativement augmenté. Elle a dépassé en 1950 le maximum établi au cours des 650 000 dernières années et en 2015 la barre symbolique des 400 ppm. Cette brusque augmentation est due à l'augmentation démographique mondiale très importante accompagnée d'une industrialisation, de l'utilisation massive des combustibles fossiles et d'une importante déforestation.

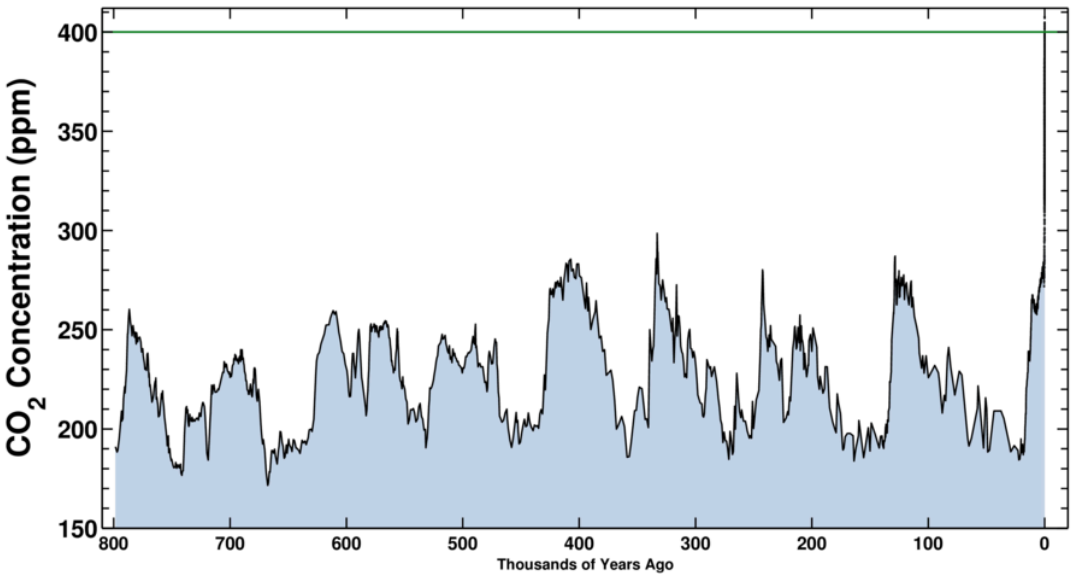


Figure 3. Concentration du dioxyde de carbone dans l'atmosphère depuis 800 000 ans. Avant 1958 les données proviennent de carottes de glace et ensuite des mesures de Mauna Loa. On a atteint 400 ppm en 2015 (Scripps Institution of Oceanography, 2016).

Si la concentration de CO_2 a augmenté significativement en 250 ans (+40%), c'est également le cas d'autres GES tels que le méthane (CH_4), dû à l'intensification des élevages ou de l'agriculture (+120%), l'oxyde nitreux (N_2O) utilisé pour les engrais, ou encore les chlorofluorocarbures (CFC) et dérivés notamment utilisés dans les circuits de refroidissement et aujourd'hui interdits (protocole de Montréal). Via une modification du bilan radiatif de la Terre, cela a pour conséquence d'augmenter de manière significative l'effet de serre et donc les

températures moyennes globales de l'atmosphère (Figure 4), qui ont atteint un maximum en 2015 (+0,75°C par rapport à la moyenne 1961-1990). Des conséquences en cascade apparaissent telles que la diminution de la couverture de neige ou la diminution des calottes polaires, entrainant une modification globale du climat et des rétroactions potentiellement fortes sur la température à la surface.

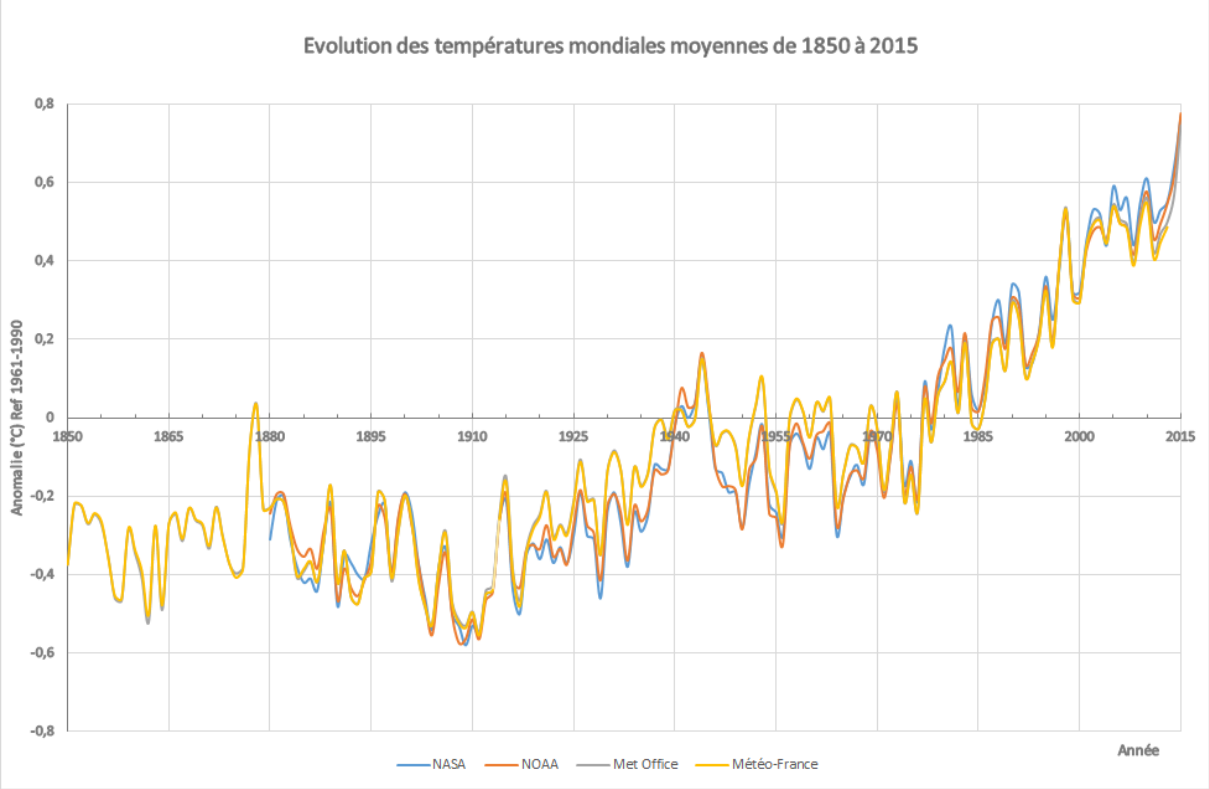


Figure 4. Evolution de la température moyenne annuelle mondiale (écart à la moyenne sur la période de référence (1961-1990). Données issues de la NASA (National Aeronautics and Space Administration, courbe bleu), du NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, courbe orange), du Met Office (courbe grise) et de Météo-France (courbe jaune).

Si l'on regarde plus précisément l'évolution des températures dans les régions boréales, on remarque que la température au niveau du sol augmente deux fois plus au nord du 60ième parallèle qu'en moyenne mondiale (Figure 5) (Overland et al., 2015). De plus les projections futures semblent indiquer une amplification de ce processus (Figure 6). C'est précisément dans ce contexte d'amplification arctique, impliquant des modifications profondes de la végétation boréale, que cette thèse a été menée.

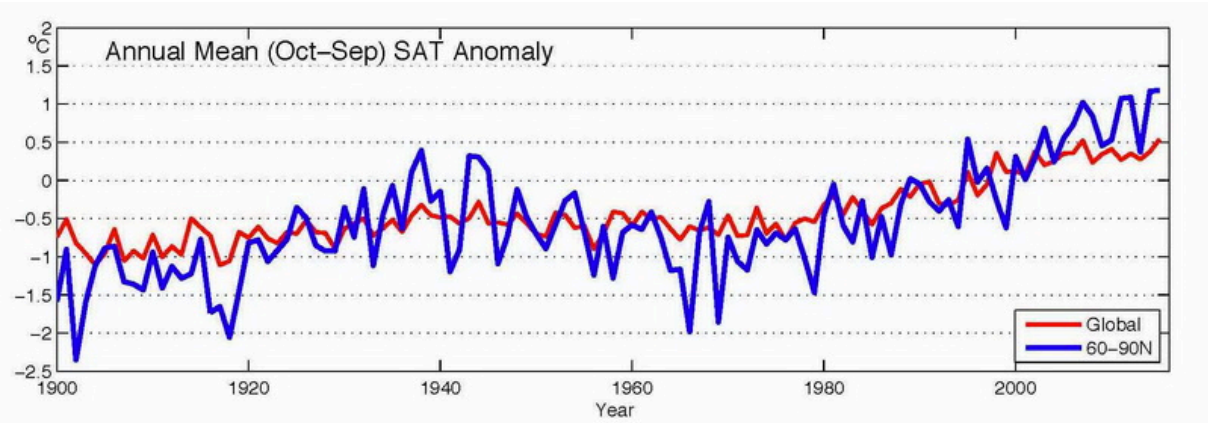


Figure 5. Moyenne annuelle des anomalies de température (en °C) de surface en Arctique (>60°N) et globale, sur la période 1900-2015 par rapport à la valeur moyenne de 1981-2010 (Overland et al., 2015).

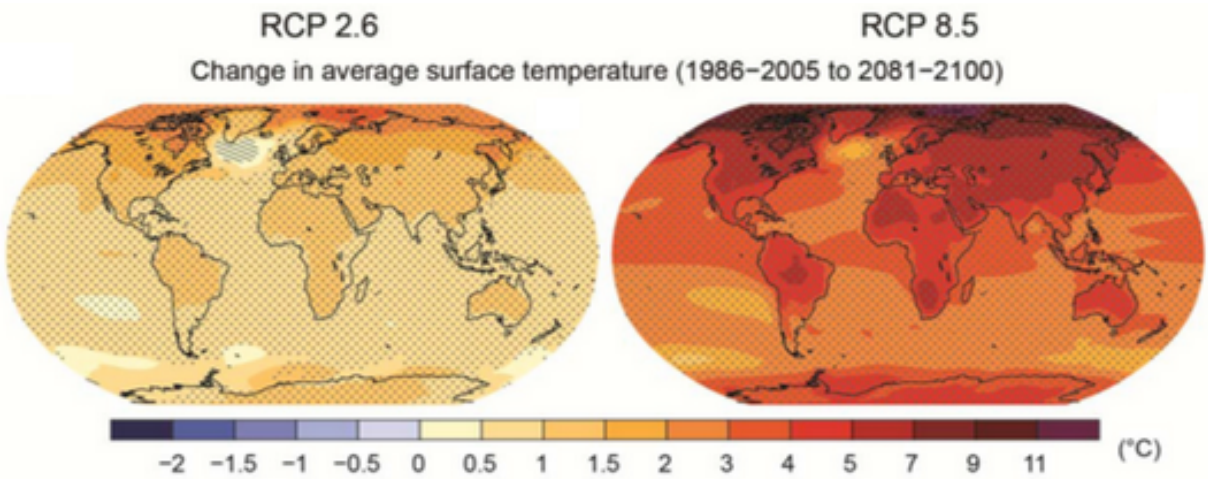


Figure 6. Température de surface de l'IPCC AR5WG1 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014).

1.1.4. Importance de la biosphère

Dans ce contexte de changement climatique, le rôle tampon de la biosphère est régulièrement mis en avant : c'est elle qui à travers des interactions avec l'atmosphère détermine la teneur en CO_2 atmosphérique actuelle. En effet, si le stock de carbone de l'atmosphère est de l'ordre de plus de 750 GtC (Gigatonnes de carbone, soit 750.10^{12} kgC, contre moins de 600 GtC à l'époque préindustrielle), le stock de la biosphère terrestre (végétation et sols) est de l'ordre de 2 300 GtC (au moins 6000 GtC en comptant les réserves fossiles) et celui des océans proche de 38 000 GtC. Les flux de carbone à l'état d'équilibre entre l'atmosphère et la biosphère terrestre et les océans sont estimés respectivement à 120 et 70 GtC/an (en noir dans la Figure 7). A cela il faut ajouter l'impact de l'activité humaine, qui entraine un flux positif évalué actuellement à 8 GtC/an entre la surface continentale et l'atmosphère, bien que ce CO_2 ne reste pas intégralement dans l'atmosphère. Un effet tampon de la biosphère continentale (2,6 GtC/an) et de l'océan (2,2 GtC/an) existe également, qui « absorbe » une partie de cet excédent (en rouge dans la Figure 7). Au final,

c'est aujourd'hui environ 3 GtC/an qui s'accumulent dans l'atmosphère soit environ la moitié du carbone fossile rejeté dans l'atmosphère. De 1750 à 1994 cela représente environ 165 GtC, soit une augmentation de plus de 40% du réservoir atmosphérique. Si l'équilibre chimique à la surface de l'océan a une cinétique relativement élevée et ainsi la dissolution du carbone dans les eaux de surface est assez rapide, c'est le mélange de cette eau avec les eaux profondes qui induit un stockage de carbone à long terme. Or, ce mélange intervient sur des échelles temporelles longues, de plusieurs années à plusieurs siècles. La biosphère continentale joue quant à elle un rôle important dans la régulation de la concentration du carbone atmosphérique aux échelles de temps diurne, saisonnière et annuelle.

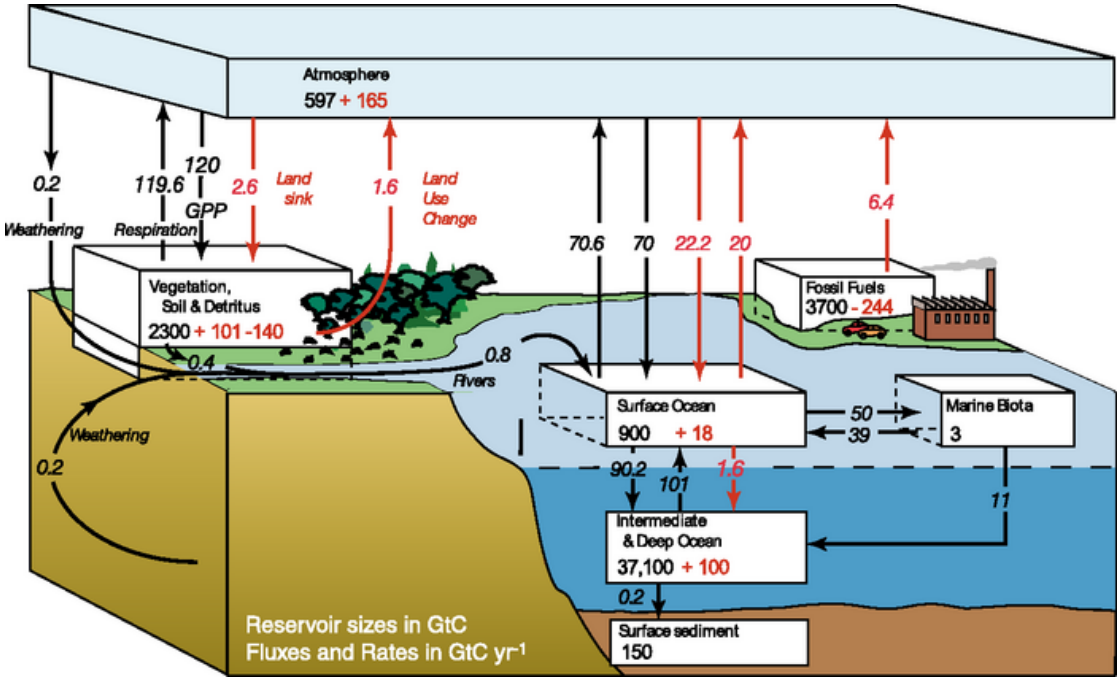


Figure 7. Le cycle global simplifié du carbone dans les années 90. En noir les flux pré-industriels « naturels » et en rouge les flux issus de l'activité « anthropique » (Intergovernmental Panel on Climate Change et al., 2007).

C'est en régulant en partie la teneur atmosphérique en gaz carbonique que la biosphère terrestre agit sur l'effet de serre et donc le climat. Elle intervient également au niveau des flux d'eau et d'énergie. D'un côté la surface terrestre absorbe le flux d'énergie solaire et de l'autre elle le restitue à l'atmosphère sous forme de rayonnement infrarouge, de flux de chaleur latente via un changement de phase de l'eau (i.e. l'évapotranspiration) et de chaleur sensible (augmentation de température). Ces flux sont très dépendants des caractéristiques de la surface, comme la rugosité (contrôlée en partie par la topographie), l'état hydrique des sols, la répartition de la végétation et son état physiologique. Ainsi, l'albédo, qui représente la fraction du rayonnement solaire réfléchie à la surface terrestre (0-1), est étroitement lié à l'évolution saisonnière et à l'état de la couverture végétale. Le flux de chaleur latente (ou évapotranspiration), bien que dépendant au premier ordre de l'humidité des sols est aussi fortement contrôlé par les plantes notamment à travers l'ouverture des stomates (orifices situés sur les feuilles et régulant les échanges de $C0_2$ et de vapeur d'eau avec l'atmosphère).

Dans cette étude nous nous intéresserons uniquement à ce qui se passe au niveau de la biosphère terrestre, et notamment dans les régions boréales. Car si le changement climatique touche toute la biosphère, l'augmentation des températures est particulièrement importante dans ces régions (section 1.1.3) et l'impact de tels changements est décuplé sur la végétation boréale, entrainant des modifications d'aire de répartition : le nombre de jours où la température est au-dessus de 0°C (température primordiale pour la croissance des plantes) devient rapidement plus important et ceux-ci arrivent plus tôt dans l'année, permettant l'établissement de nouvelles espèces. Ainsi, depuis plusieurs années, on peut observer un phénomène de verdissement (ou « greening ») (Zhu et al., 2016) : le développement de la végétation vers les hautes latitudes. La Figure 8 met ainsi en évidence l'augmentation de l'indice de surface foliaire (LAI) au dessus du 50ième parallèle, directement due à l'augmentation de la couverture végétale, comme les buissons (Figure 9). Ces changements sont principalement attribués au changement climatique et à l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2.

Cette évolution a des conséquences directes sur le cycle du carbone (photosynthèse, accumulation de carbone dans la végétation), indirectes (décomposition de la matière organique dans le sol), mais également sur le climat (modification de l'albédo, des flux hydriques et thermiques, etc.). Pour modéliser ces changements et leurs conséquences, il s'agit donc de modéliser le plus précisément possible l'ensemble des interactions végétation – atmosphère et la dynamique spatio-temporelle des différents écosystèmes.

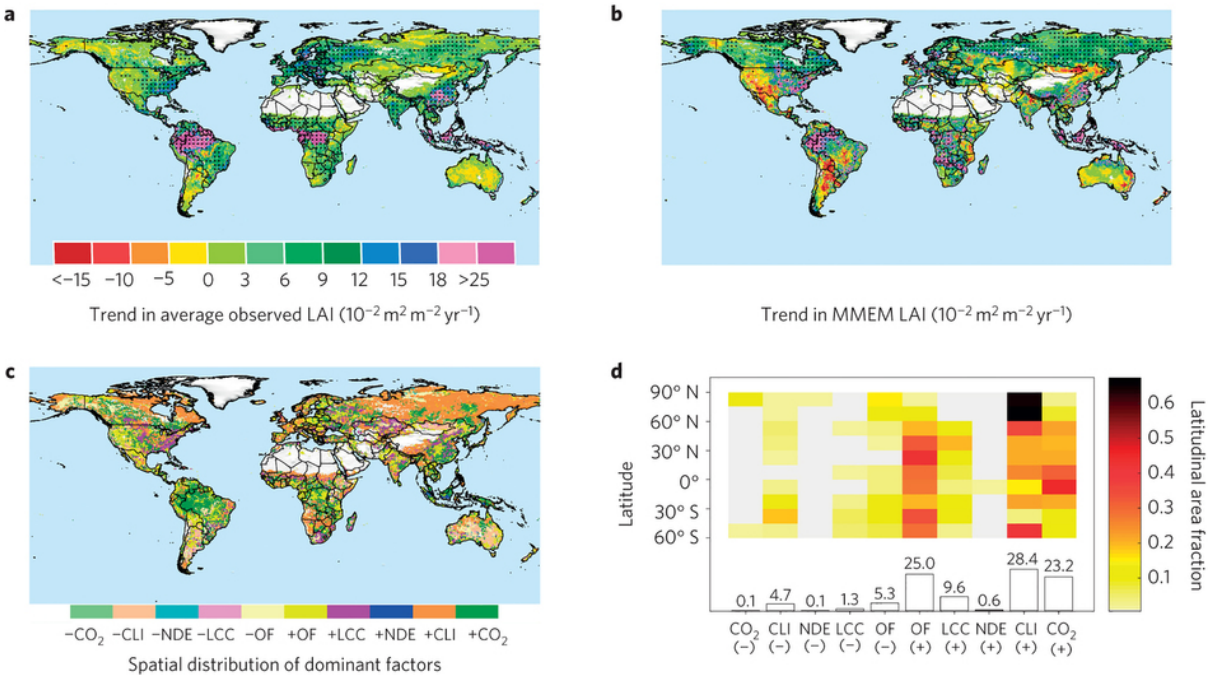


Figure 8. Répartition spatiale de la croissance du LAI (Leaf Area Index) pour la période 1982-2009 (Zhu et al., 2016). Données de LAI issues des données GIMMS, GLOBMAP and GLASS LAI (a) et issues de moyennes de modèles (b), avec en hachuré les tendances qui sont statistiquement significatives (p <0,05). c) représente les facteurs dominants contribuant à l'augmentation (+) ou la diminution (-) du LAI, avec le CO_2, le changement climatique (CLI), le dépôt d'azote (NDE), les changements de couvert végétal (LCC) et les autres facteurs (OF). d) représente la contribution de chacun des paramètres en pourcentage de végétation suivant un gradient nord-sud.

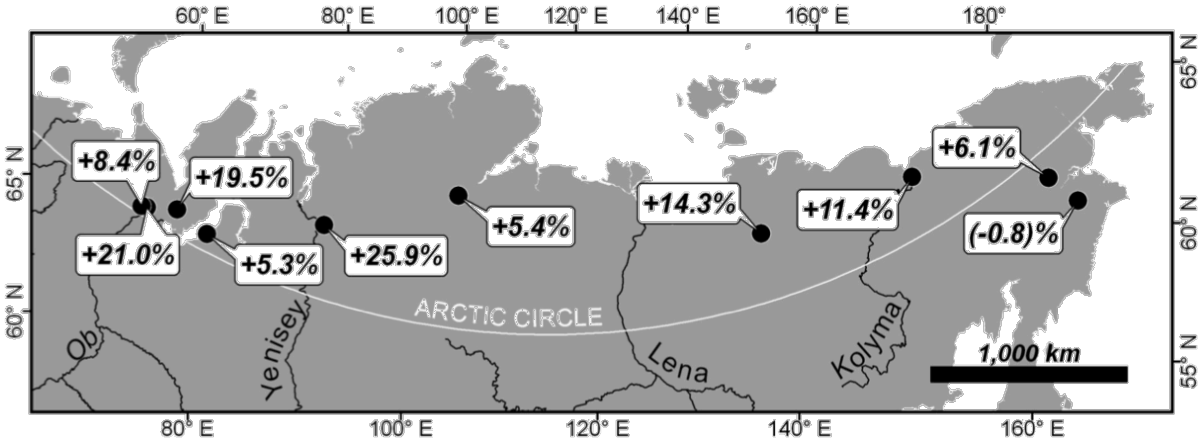


Figure 9. « Embuissonnement » : évolution de la fraction de végétation des buissons étudiés sur sites en Sibérie (Frost and Epstein, 2014).

1.2. Modélisation climatique

1.2.1. Modélisation climatique globale

La modélisation climatique s'est développée fortement suite à la concordance de deux événements. D'un côté, suite aux observations du recul des glaciers (Figure 10) et de l'augmentation de la température « anormale », les premiers questionnements scientifiques de l'impact de l'Homme sur le climat apparurent ainsi que la nécessité de comprendre d'où venait l'équilibre climatique. De l'autre, avec l'apparition des premières calculatrices et ordinateurs, une nouvelle puissance de calcul numérique a permis d'envisager des calculs complexes sur des échelles de temps importantes et à l'échelle de la Terre. Ainsi dans les années cinquante la modélisation climatique globale est née, avec la modélisation de l'atmosphère et de ses variables d'état. Le nombre de modèles et leur complexité n'a pas cessé d'augmenter depuis. Dans les années soixante, la composante océanique a été ajoutée afin de modéliser les transports de chaleur nord-sud par l'océan et les échanges air-mer (Manabe and Bryan, 1969).

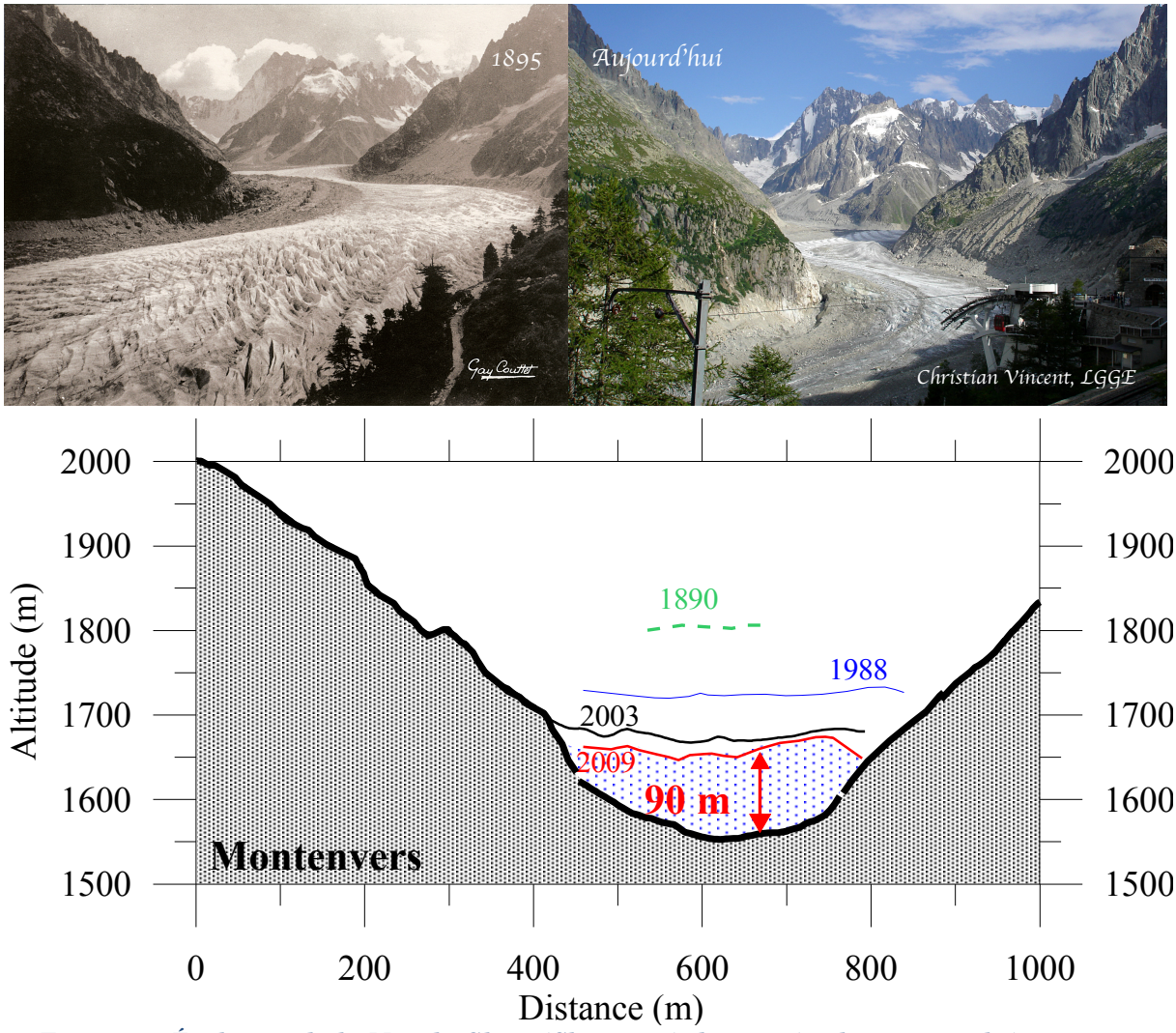


Figure 10. Évolution de la Mer de Glace (Chamonix) de 1895 (en haut a gauche) à nos jours (en haut à droite). La coupe transversale (en bas) représente l'évolution de l'épaisseur de la glace sur cette même période (Delphine Six, LGGE).

Mais ce n'est que dans les années quatre-vingt que les modèles actuels de végétation de type mécaniste sont apparus, où ce sont les processus décrivant le fonctionnement des écosystèmes qui sont directement implémentés. Ils permettent ainsi d'effectuer un bilan des stocks et des flux hydriques (humidité, évaporation) et énergétiques (température, chaleur latente et sensible) (Sellers et al., 1986) et sont considérés comme des schémas de transfert entre le sol, la végétation et l'atmosphère (SVAT). Dans les années quatre-vingt-dix, ces modèles se sont encore complexifiés afin de mieux simuler les rétroactions entre la biosphère et le climat (concentration en $C0_2$ et humidité) à travers le couplage des échanges d'eau et de dioxyde de carbone au niveau des stomates des plantes (Sellers et al., 1996). Depuis, des cycles biogéochimiques ont été intégrés en commençant par le carbone (tout d'abord avec la photosynthèse, la respiration, l'allocation du carbone puis complexifié avec la compétition, les feux, etc.), puis l'azote (notamment pour la croissance de la végétation) et maintenant le phosphore. Aujourd'hui, la compétition entre végétaux est même introduite dans de nombreux modèles appelés modèles globaux de dynamique de la végétation (DGVM).

Depuis la mise en place en 1988 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC ou IPCC pour Intergovernmental Panel on Climate Change) afin de faire des synthèses de l'état de la science sur le climat et mettre en place des mesures politiques visant à réduire l'impact potentiel pour l'Homme, l'évolution des modèles globaux a été considérable. La résolution de ces modèles n'a cessé d'augmenter, passant d'une grille de 500 km de côté dans les années quatre-vingt lors du premier rapport du GIEC appelé alors IPCC AR (Assessment Report), à une résolution allant de 25 à 200 km pour l'AR5 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014). Le nombre de modèles globaux a également évolué passant de 24 modèles pour CMIP3 à 39 pour CMIP5 (en comptabilisant les modèles principaux de type Modèle de Circulation Général Atmosphère-Océan (AOGCMs) et Modèle du Système Terre (ESM)). Les modèles actuels intègrent donc une représentation complexe des composantes terrestres, comprenant l'atmosphère, les océans, les calottes glaciaires et la biosphère continentale, ainsi qu'un certain nombre de flux entre tous ces compartiments.

Dans cette thèse, seul un de ces modèles a été utilisé : l'ESM de l'IPSL, IPSL-CM5, comprenant un modèle de circulation générale atmosphérique LMDZ (Laboratoire de Météorologie Dynamique Zoom) développé depuis les années soixante-dix, un modèle océanique NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean) comprenant la biochimie marine et la glace de mer, un modèle de chimie atmosphérique INCA, un modèle stratosphérique de chimie-climat couplé LMDz-REPROBUS (REactive Processes Ruling the Ozone BUdget in the Stratosphere) et enfin un modèle de la biosphère terrestre ORCHIDEE (Organising Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems). C'est de ce dernier dont il sera question tout au long de cette thèse.

1.2.2. Les modèles de surface continentale

A l'origine, les modèles de surface continentale ont été développés afin de fournir les conditions limites aux modèles atmosphériques et océaniques : les flux de matière et d'énergie ainsi que la rugosité et enfin le flux d'eau douce pour l'océan. Ce n'est que dans un second temps de complexification que les modèles de surface ont été capables de simuler les processus biophysiques de manière autonome, utilisant à leur tour les conditions limites fournies par les modèles atmosphériques appelées forçage atmosphérique ou climatique. Aujourd'hui les modèles de surface peuvent fonctionner en mode *couplé* aux modèles atmosphériques et évoluer conjointement, ou alors être *découplés* et fonctionner indépendamment avec en entrée des données prescrites via un *forçage climatique*. Parallèlement la précision des processus implémentés s'est améliorée et leur paramétrisation est devenue de plus en plus détaillée.

Les principaux processus décrits dans les modèles de surface sont illustrés dans la Figure 11, notamment ceux qui régissent les échanges de carbone, d'eau et d'énergie entre l'atmosphère et la biosphère.

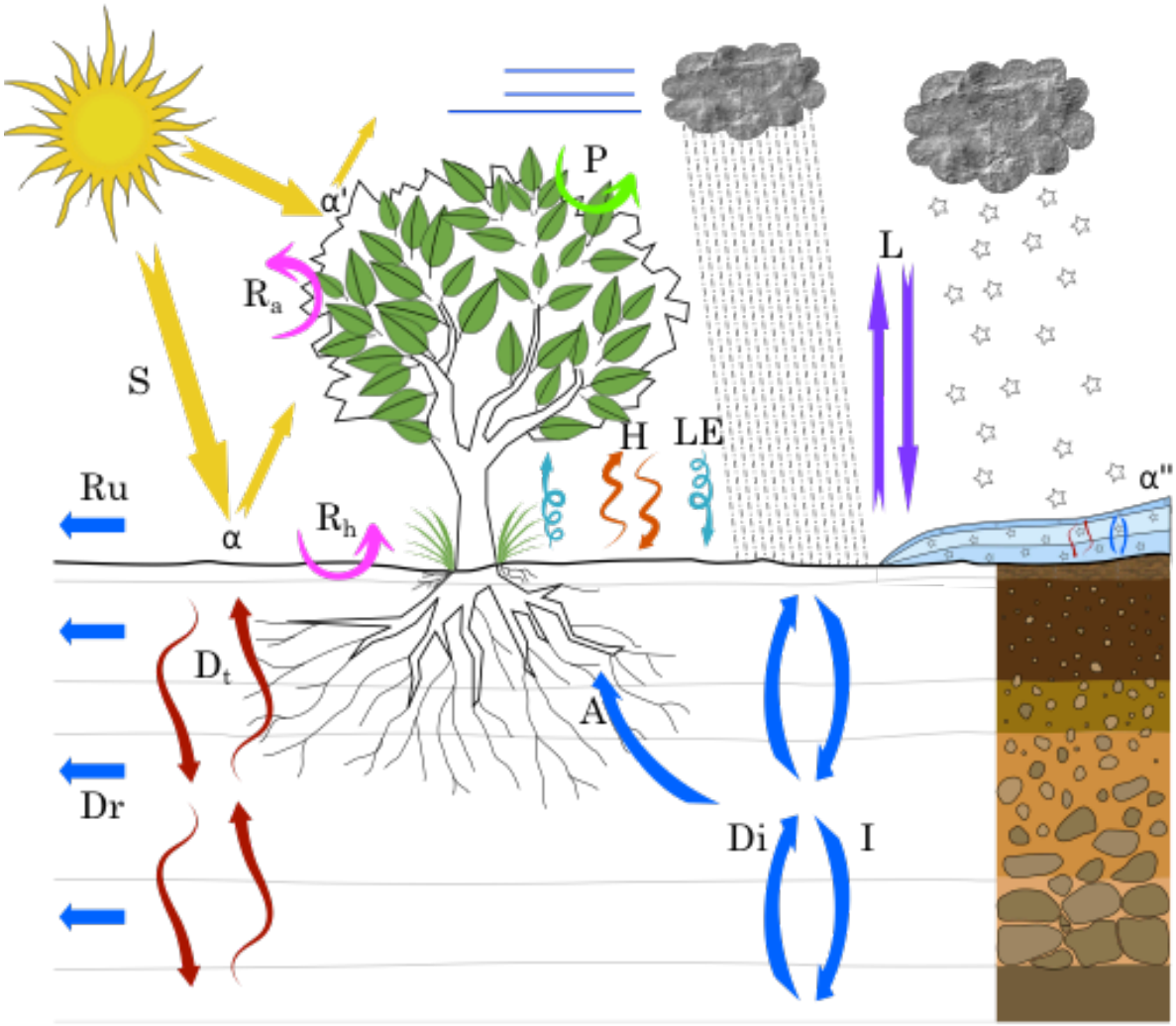


Figure 11. Principaux processus dans les modèles de biosphère continentale. Les conditions limites sont l'ensoleillement (S pour shortwave), le vent, les différents types de précipitation, la température de l'air et la concentration de CO_2. Flux de carbone : photosynthèse (P), respiration autotrophe (R_a) et hétérotrophe (R_h). Flux d'eau : précipitation (pluie ou neige), ruissellement (Ru), infiltration (I), diffusion (Di), absorption par la végétation (A) et drainage (Dr). Flux d'énergie : via les courtes longueurs d'ondes (S, avec S↓= (1- α).S↑ et α l'albédo), les grandes longueurs d'ondes (L pour longwave, dont l'infrarouge), la chaleur sensible (H), la chaleur latente (LE) et la diffusion thermique (D_t). Les flux dans la neige sont également représentés.

Les flux de carbone

Le dioxyde carbone de contenu dans l'atmosphère est exprimé en parties par million (ppm) et est directement disponible pour le modèle de biosphère continentale. De son côté le modèle établit le flux net de carbone (NEE pour Net Ecosystem Exchange) qui est la superposition de deux flux contraires : d'un côté l'assimilation via la photosynthèse et de l'autre l'émission de carbone via la respiration.

La photosynthèse est simplement le stockage de l'énergie solaire dans des chaines carbonées (les glucides) au niveau des chloroplastes, eux-mêmes situés dans les cellules des tissus chlorophylliens des végétaux. Cette réaction nécessite

du carbone principalement sous forme de CO_2, de l'eau et l'énergie des photons (S) comme décrit dans l'Équation 1.

Équation 1 **La photosynthèse :** $6\,CO_2 + 12\,H_2O \xrightarrow{S} C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 + 6\,H_2O$

Le carbone assimilé par la végétation est appelé Productivité Primaire Brute (GPP pour « Gross Primary Production ») et représente environ 120 GtC.an^{-1} au niveau global (Figure 1). Cette assimilation n'a donc lieu que de jour et dépend des conditions d'éclairement, d'humidité de l'air et du sol, de la concentration en CO_2, de la température et bien sûr de l'état physiologique de la végétation. Ainsi, la GPP sera généralement faible en hiver alors qu'une partie de la végétation a perdu ses feuilles ou lors de stress hydrique fort dans les tropiques. Elle dépend plus généralement de la surface foliaire (décrite par l'indice foliaire LAI, pour « Leaf Area Index »), du phénotype et de l'accessibilité en eau et en éléments nutritifs (azote, phosphore, etc.). Les glucides seront soit utilisés rapidement, soit stockés sous différentes formes dans des organes dédiés.

Ces glucides produits servent ensuite au bon fonctionnement de la plante. Une partie va être dégradée rapidement au cours d'un processus appelé respiration de maintenance afin de pourvoir l'énergie nécessaire à la vie et l'entretien de la plante, alors qu'une seconde partie sera utilisée lors de la respiration de croissance pour croître lorsque la saison est favorable. L'ensemble de ces deux respirations est appelé respiration autotrophe (R_a). Elle présente des fluctuations saisonnières et est présente tout au long de la vie des végétaux. La respiration est une réaction qui s'effectue au niveau des mitochondries présentes dans toutes les cellules et qui nécessite une chaine carbonée (comme le glucide) et produit de l'énergie, mais aussi du dioxyde de carbone et de l'eau :

Équation 2 **La respiration :** $C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 \rightarrow 6\,CO_2 + 6\,H_2O + Energie$

On définit alors la Productivité Primaire Net (NPP pour « Net Primary Productivity ») qui représente le flux net de carbone entre l'atmosphère et la végétation et donc la séquestration de carbone dans la biomasse végétale :

Équation 3 $NPP = GPP - R_a$

Enfin, les plantes sont soit consommées par des herbivores (qui peuvent eux-mêmes devenir la proie de carnivores, avant que la matière organique ne soit restituée à la litière), soit elles meurent, et finissent dégradées dans le sol par des micro-organismes. Ces nouveaux organismes ont également une respiration permettant leur fonctionnement via une réaction identique à l'Équation 2 mais qui a pour source les glucides produits par les végétaux. Cette respiration est appelée respiration hétérotrophe (R_h) et, dans le cas de la décomposition dans le sol, est très dépendante de la température, de l'humidité et de l'oxygène présents dans le sol. Une fraction du carbone ne sera pas décomposée et s'accumulera au fil des ans, pour former dans certaines conditions des énergies fossiles.

L'équilibre total, combinant photosynthèse, respiration autotrophe et hétérotrophe est appelé l'échange net de carbone (NEE pour Net Ecosystem Exchange) entre l'atmosphère et l'écosystème :

Équation 4 $$NEE = R_a + R_h - GPP$$

A l'équilibre le NEE est considéré comme nul, négatif si l'écosystème est un puits net de carbone et positif si c'est une source nette de carbone.

Les flux d'eau

Il y a deux grands types de flux d'eau au niveau de la biosphère continentale : un premier lié aux transferts physiques dans le sol et un second entre le sol et l'atmosphère.

Le cycle commence, comme présenté dans la Figure 11, par la précipitation sous forme liquide ou solide (neige voire grêle). En surface, elle peut être interceptée par la végétation ou tomber sur le sol. En faibles quantités, elle aura tendance à s'évaporer au niveau de l'interface feuille-atmosphère ou sol-atmosphère. En cas de précipitations plus importantes, l'eau pourra soit s'accumuler au niveau de dépressions (lacs, flaques ou étangs), soit ruisseler suivant la pente ou enfin s'infiltrer dans le sol. Le comportement de l'eau infiltrée dépendra des propriétés directes du sol (comme la porosité ou encore la saturation en eau) et de la végétation. Elle pourra s'infiltrer plus ou moins profondément jusqu'à la nappe phréatique, être drainée, se diffuser (verticalement ou horizontalement) ou enfin être absorbée au niveau du système racinaire des végétaux.

Pour les végétaux, l'eau est essentielle notamment pour la photosynthèse et pour le maintien de la pression hydrique à l'intérieur des cellules. En effet, pour la photosynthèse (Équation 1), les plantes ont besoin d'accéder au dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère. Pour cela, la majorité de la végétation terrestre est équipée de stomates, petits orifices présents dans l'épiderme des feuilles (sur la face inférieure la plupart du temps), qui permettent les échanges gazeux dont l'oxygène et le dioxyde de carbone. Mais pendant ces échanges, la plante, qui est constituée de 80 à 95% d'eau, perd beaucoup d'eau : il s'agit de la transpiration. Cette eau, ainsi que l'évaporation provenant des sols est directement transférée vers l'atmosphère.

Les flux d'énergie

Au niveau de l'interface entre l'atmosphère et la surface, trois grands types d'énergie sont échangés, comme présenté dans la Figure 11. Tout d'abord il y a l'énergie émanant des courtes longueurs d'ondes (S pour shortwave) qui proviennent du soleil. Elles sont en partie réfléchies suivant l'albédo de surface α (qui diffère suivant que ce soit du sol nu, de la végétation et suivant la présence de neige ou d'humidité). Ensuite il y a l'énergie qui vient des grandes longueurs d'ondes (L pour longwave), typiquement le rayonnement infrarouge important lorsque la couche nuageuse est épaisse. Enfin il y a les flux de chaleur latente (LE) et sensible (H). Il s'agit respectivement de l'énergie correspondant à un changement d'état (évapotranspiration liée au passage en phase vapeur de l'eau

en surface ou sublimation de la neige) et de l'énergie correspondant au transfert thermique (diffusion de la chaleur). Ces flux de chaleur sont très dépendants de la turbulence près de la surface, donc du vent et de la rugosité du couvert végétal.

Au niveau du sol, il y a un flux de conduction thermique ou diffusion thermique (D_t) dépendant directement de la capacité et de la conductivité thermique des sols. A l'interface sol-atmosphère l'énergie transférée vers l'atmosphère dépendra ainsi de D_t. De plus, si de la neige est présente sur le sol, les transferts thermiques dépendront alors également des flux présents à l'interface sol – neige, dans les différentes couches de neige et enfin entre la neige et l'atmosphère (sublimation).

On peut alors définir un rayonnement net incident (R_n) entre l'atmosphère et la biosphère qui correspond à la quantité nette d'énergie reçue au niveau de la surface, rayonnement qui servira au calcul de la température de surface :

Équation 5 $$R_n = S\downarrow\uparrow + L\downarrow\uparrow + (H + LE)\downarrow\uparrow + D_t\downarrow\uparrow$$

1.3. Importance de la végétation boréale

Si la végétation n'a été considérée que tardivement dans les modèles climatiques elle est devenue aujourd'hui une partie intégrante des modèles du système Terre (ESM). Mais afin de représenter la végétation à l'échelle mondiale, un effort particulier a été déployé pour décrire au mieux les régions « vertes », stables, où la production primaire brute (GPP) est très importante : les zones tempérées et tropicales. Cela a notamment permis de reproduire assez fidèlement l'équilibre actuel. C'est donc dans un second temps que la communauté scientifique s'est intéressée aux régions limitrophes telles que les zones arides (déserts) ou les régions polaires, pour des enjeux différents tels que la prévision de la disponibilité ou l'accessibilité de l'eau.

L'importance de la végétation boréale provient principalement de sa sensibilité aux variations climatiques : là où la température est un facteur particulièrement limitant pour la croissance des végétaux, la variation du nombre de jours où la température est au-dessus de zéro (GDD_0) ou au dessus de 5°C (GDD_5) s'accompagne potentiellement de modifications importantes de la structure de la végétation. Ainsi, notamment via l'étude des pollens fossiles, des cartes de végétation ont pu être reconstruites, indiquant des évolutions importantes de la végétation : au Dernier Maximum Glaciaire (LGM, ~ -18 000 ans) les hautes latitudes étaient couvertes de glace et les moyennes latitudes étaient couvertes de steppes-toundra avec un peu de forêt dispersée (Sud de la méditerranée), alors qu'au milieu de l'Holocène (~ -6 000 ans) la végétation était plutôt proche de ce que l'on peut observer aujourd'hui (Bigelow, 2003). Il y a donc un parallèle direct entre la végétation boréale et le climat terrestre.

Des études vont jusqu'à rendre la végétation boréale en partie responsable de l'initialisation du Dernier Maximum Glaciaire : si les variations de la Terre sur son orbite (présentées en 1.1.2) expliquent la cyclicité du phénomène, les modèles atmosphériques n'arrivent pas pour la plupart à déclencher eux-mêmes une ère glaciaire si la végétation n'est pas prise en compte (Gallimore and Kutzbach, 1996; de Noblet et al., 1996; Crucifix and Loutre, 2002; Meissner et al., 2003). Ce serait l'évolution de la végétation boréale (due au refroidissement global), via le remplacement de jusqu'à 80 % de la strate arborescente par une strate arbustive, elle-même remplacée par des herbacées (Meissner et al., 2003), qui, couplée à la couverture de neige alors plus présente en hiver (de Noblet et al., 1996), aurait un impact significatif sur les flux d'énergie notamment via l'augmentation de l'albédo en hiver (Gallimore and Kutzbach, 1996; Crucifix and Loutre, 2002; Yoshimori et al., 2002; Meissner et al., 2003). Cette augmentation aura pour impact de diminuer la fonte de la neige, qui aura donc une épaisseur plus importante jusqu'à être présente presque toute l'année. La végétation boréale favorise donc le début de l'ère glaciaire (ou « glacial inception ») (Calov et al., 2009).

Aujourd'hui l'enjeu semble tout aussi important pour savoir si le changement climatique, qui va influer également sur la distribution de la végétation boréale, risque d'enclencher un effet rétroactif « positif » (c'est-à-dire un effet d'amplification de l'augmentation des températures) ou « négatif » (un effet temporisant du réchauffement) sur le climat global. Et pour cela un certain nombre de processus est à prendre en compte. Il faut pouvoir estimer i) l'accumulation de carbone dans le sol pendant les derniers milliers d'années, qui est aujourd'hui emprisonné dans le pergélisol (ou permafrost en anglais, i.e. les sols gelés toute l'année) et surtout ii) la quantité qui peut être relâchée en cas de dégel (Chadburn et al., 2015b; Porada et al., 2016). Il est important de comprendre et être capable de reproduire le fonctionnement et l'évolution des biomes boréaux afin de représenter fidèlement i) l'albédo (et particulièrement en hiver le rapport entre l'albédo de la végétation et de la neige) (Foley et al., 1994; Brovkin et al., 2003; Meissner et al., 2003; Cook et al., 2008), ii) la thermique du sol (avec le développement de végétation à pouvoir isolant tel que les mousses (Chadburn et al., 2015a; Porada et al., 2016)) et iii) l'accumulation de carbone (capturé dans les tissus végétaux qui peuvent évoluer en fonction de la concentration en carbone dans l'atmosphère et la température (Cox et al., 2000; Meissner et al., 2003; Flexas et al., 2014)). Enfin il faut également représenter le comportement du système complet comme la respiration hétérotrophe dans le sol pouvant accélérer le rejet de carbone dans l'atmosphère en cas de réchauffement (Cox et al., 2000). Il serait alors possible d'envisager de comparer l'effet relatif de chacun de ces processus, comme l'impact de la diminution de l'albédo lors d'une transition toundra – taïga qui pourrait être partiellement compensé par le stockage de carbone dans la végétation (Betts, 2000).

L'équilibre de ces rétroactions reste encore méconnu et est directement lié à l'état de la végétation, qui évolue rapidement. Les observations actuelles (in situ et satellites) indiquent des changements importants aux hautes latitudes, avec un « Arctic greening », c'est-à-dire le développement d'une toundra arbustive là

où n'était présentes que des herbacées il y a quelques dizaines d'années (Jia et al., 2003; Blok et al., 2011; Bonfils et al., 2012; Elmendorf et al., 2012; Jiang et al., 2012; Zhang et al., 2013; Frost and Epstein, 2014). En lien avec à ces changements de couverture végétale, il est important de pouvoir définir si les régions boréales vont dans les prochaines années plutôt se comporter comme un puits ou une source de carbone (Betts, 2000; Cox et al., 2000; Zhang et al., 2013) et si elles vont participer directement ou non à l'augmentation de la température (Foley et al., 1994).

C'est dans le but de représenter au mieux ces processus qu'il a été décidé de développer plus précisément la végétation boréale dans le modèle terrestre ORCHIDEE.

1.4. Objectifs et plan de la thèse

L'amplification polaire, c'est-à-dire le fait que le réchauffement soit plus fort dans l'Arctique qu'ailleurs sur le globe, est une caractéristique aussi bien des changements climatiques passés que futurs. Par contre, les mécanismes et rétroactions sous-jacents impliquant les sols et la végétation sont mal connus. Une rétroaction importante implique des changements régionaux de la couverture de végétation et ainsi les flux de matière (i.e. chimique et hydrique) et d'énergie (par exemple via l'albédo). Des observations récentes sur les 25 dernières années (satellites et in-situ), ont permis de déceler des changements importants dans l'activité de la végétation dans les régions arctiques et boréales, incluant un prolongement de la saison de croissance (Barichivich et al., 2013). Ces changements ont été reliés à des changements de la structure des écosystèmes, en particulier à une migration de certains types de végétation comme les arbres, les buissons et les herbacées.

Dans ce contexte, l'objectif principal de cette thèse est d'incorporer une description détaillée des écosystèmes boréaux dans le modèle de surface continentale ORCHIDEE, incluant leur effet sur l'albédo, la thermique du sol , le bilan de carbone et à plus long terme les rétroactions climatiques. Il s'agit donc d'une thèse centrée sur la modélisation de la végétation arctique et des interactions végétation - atmosphère, à l'interface des domaines de compétences en informatique, physique et biologie.

Il y a dans cette thèse deux enjeux distincts. Le premier technique, car il s'agit de créer une nouvelle description de végétation répondant à des critères précis et donc d'ajouter un ou des nouveaux types de végétation dans un modèle qui en possède un nombre fixe (13). Il s'agit également d'implémenter les nouveaux processus associés dans une logique identique au code préexistant afin qu'il reste compatible avec le modèle atmosphérique et que les modifications puissent être intégrées de façon permanente à ORCHIDEE. Le second enjeu est d'ordre scientifique, car dans un cadre technique restreint il faut être capable d'identifier quel(s) type(s) de végétation ajouter dans le modèle, puis être capable de sélectionner les processus clés qui permettent de distinguer ces plantes autant

d'un point de vue biologique, que physique et climatique, et enfin d'accepter les limites induites par la modélisation d'un écosystème à une résolution spatiale pouvant atteindre au mieux quelques dizaines de kilomètres.

Le choix des nouveaux types de plantes implémentés permettant de mieux décrire la végétation boréale sera explicité dans cette thèse. Il s'est porté sur l'introduction i) des buissons permettant de représenter une strate intermédiaire entre les herbacées et les arbres boréaux, comme par exemple pour décrire la toundra arctique, ii) des plantes non vasculaires (regroupant bryophytes et lichens) afin d'être capable à la fois de reproduire le comportement de la végétation présente dans les tourbières et dans les étendues froides de l'Arctique, et enfin iii) des herbacées de type « C3 » boréales afin de distinguer dans le modèle les herbacées que l'on retrouve typiquement au sud de l'Europe (déjà présentes) et celles qui se développent au nord du cercle polaire.

La restitution de mon travail de thèse dans ce manuscrit s'organisera en cinq parties :

- Tout d'abord le Chapitre 2 présentera le contexte de l'étude, avec notamment une présentation complète du modèle ORCHIDEE tel qu'il était avant ce travail et un bilan des données utilisées.

- Le Chapitre 3 sera consacré à la partie la plus importante de cette thèse, c'est-à-dire l'implémentation de nouveaux types de végétation et de nouveaux processus afin de représenter la végétation boréale dans le modèle. Ce chapitre sera principalement fondé sur un article en review, Druel et al. (2017), soumis début 2017.

- Dans le Chapitre 4 je présenterai le travail effectué afin d'obtenir une dynamique de végétation (DVGM) avec la totalité des anciens et nouveaux types de végétation, dans les régions boréales. Il abordera l'étude de la végétation boréale future, avec comme intérêt d'observer quelles sont les implications climatiques de l'intégration de cette végétation dans le modèle. Ce chapitre sera également fondé sur un article (Druel et al., in preparation).

- Enfin le Chapitre 5 sera l'occasion de faire un point sur les développements effectués, leurs limites, et les perspectives que cela offre à court et moyen terme.

Chapitre 2
CONTEXTE D'ETUDE

Je présenterai dans cette partie d'un côté le modèle imposé pour cette étude, le modèle de surface continentale ORCHIDEE, et de l'autre l'ensemble des données utilisées ou mises en place pour cette étude. Enfin, cette partie finira par une présentation des méthodes employées pour valider mes développements.

2.1. Le modèle de surface ORCHIDEE

2.1.1. Un modèle de surface

En France deux modèles représentant l'ensemble du système Terre (ESM pour Earth System Models) sont développés. D'un côté il y a le modèle développé depuis les années 1980 par le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), unité mixte de recherche de Météo-France et du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). De l'autre, le modèle de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL) auquel appartient le schéma de surface ORCHIDEE. Ce modèle, IPSL-CM pour « Coupled Model », a été développé à partir des années 1970 avec le modèle de circulation générale atmosphérique du Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD), nommé LMDZ (« Z » pour « Zoom »). L'IPSL-CM comprend aujourd'hui un certain nombre de composantes: le modèle atmosphérique LMDZ, le modèle de chimie et des aérosols INCA (INteraction avec la Chimie et les Aérosols), le modèle océanique NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean) incluant la glace de mer et la biogéochimie marine, et enfin le modèle de surface continentale ORCHIDEE. La Figure 12 décrit les interactions entre les différents modèles et les principaux processus physiques et chimiques associés. On remarque qu'ORCHIDEE est directement associé au modèle LMDZ. Un coupleur, OASIS, permet l'échange d'information au sein de l'IPSL-CM.

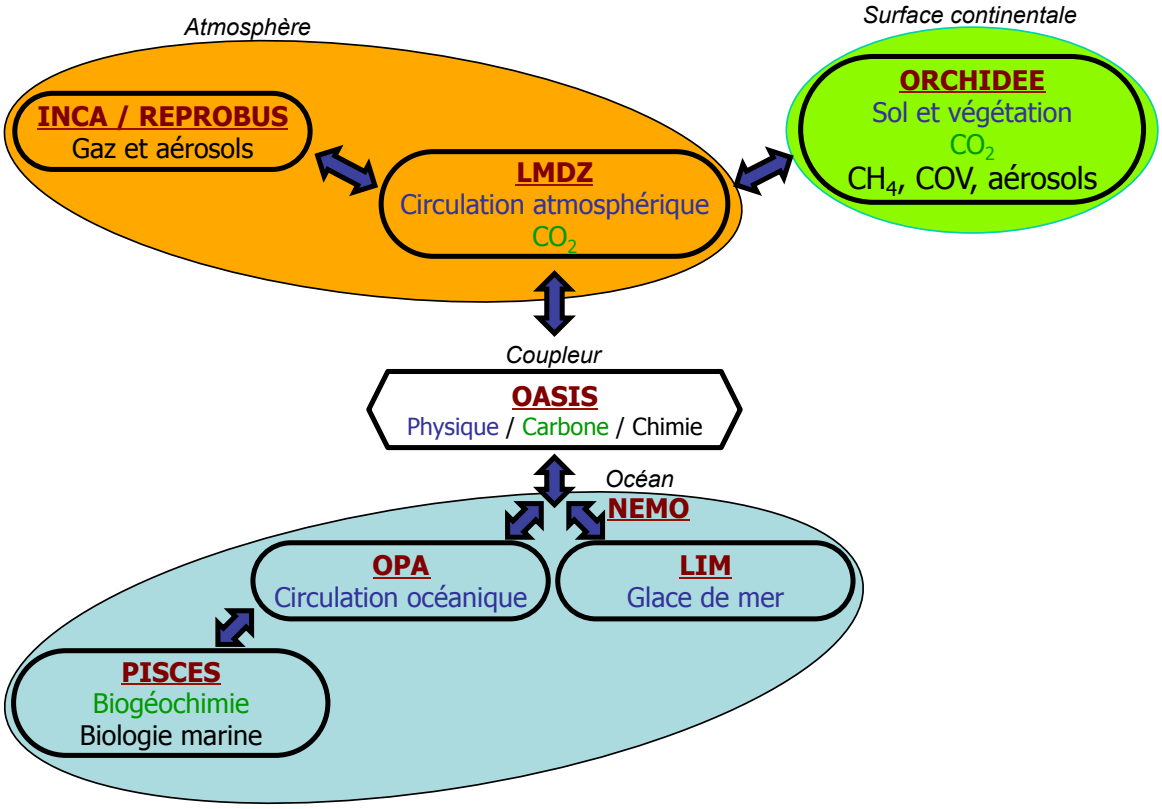


Figure 12. Description schématique du modèle du système Terre IPSL-CM et de ses composantes.

Il existe ainsi deux possibilités pour faire fonctionner le modèle ORCHIDEE :

- Soit on l'utilise de manière « on-line », couplé avec LMDZ, nécessitant d'effectuer en parallèle la simulation avec les deux modèles. Ainsi les échanges entre l'atmosphère et la surface sont pris en compte, permettant un échange direct d'énergie, d'humidité ou de carbone. Par exemple le flux d'évaporation calculé par ORCHIDEE impactera directement l'humidité dans les basses couches de l'atmosphère de LMDZ ce qui en retour impactera aussi le calcul de l'évaporation.
- Soit on utilise ORCHIDEE « off-line », découplé de l'atmosphère, en imposant les paramètres atmosphériques au niveau du sol à travers les « forçages climatiques ». Ces forçages comprennent la pression, les rayonnements (visible (S) et infra rouge (L)), le vent, les précipitations (liquides et solides) et enfin la température et l'humidité de l'air. Ils peuvent provenir soit d'une simulation passée ou future d'un modèle atmosphérique (comme LMDZ), soit directement d'observations de terrain, issues de satellites ou de réanalyses. Ces forçages peuvent être réalisés sur un site, une région ou sur l'ensemble de la surface terrestre et à différentes résolutions horizontales (ou tailles des mailles).

Dans cette thèse, c'est cette seconde méthode qui a été principalement utilisée, uniquement sur l'hémisphère nord à partir du 30ième ou 45ième parallèle. Les données utilisées proviennent des forçages atmosphériques CRU-NCEP (Wei et al., 2014; Viovy, 2015), qui sont une combinaison entre des observations

mensuelles de la « Climatic Research Unit » (CRU) associées aux anomalies moyennes toutes les 6h des réanalyses du « National Center for Environmental Prediction » (NCEP). Ainsi le pas de temps est de 6h, sur une période allant de 1901 à 2013. La résolution utilisée est comprise entre 0.5°x0.5° et 2°x2° suivant les simulations (permettant d'obtenir un compromis entre le temps de calcul et la précision des résultats).

2.1.2. Présentation générale d'ORCHIDEE

L'origine d'ORCHIDEE vient directement du développement de LMDZ, afin de calculer et fournir au Modèle de Circulation Générale (GCM pour « Global Circulation Model ») un bilan hydrique et énergétique des écosystèmes terrestres. Il s'agissait au départ plutôt d'un simple module associé strictement au GCM qu'un modèle distinct, décrit pour la première fois par Laval et al. (1981). Au début des années 1990, une nouvelle version de ce module alors nommé SECHIBA a été développée (Ducoudré et al., 1993) avec une première description de la végétation à travers des biomes (ou macrosystèmes tels que déserts, toundras ou forêts tropicales), un bilan énergétique au niveau de la surface (température de surface correspondant aux plantes et au sol) et un nouveau bilan hydrique. La représentation de la végétation a progressivement évolué de biomes à des types fonctionnels de plantes (PFTs pour « Plant Functional Types »), c'est-à-dire des ensembles fonctionnels tels que les herbacées naturelles ou les arbres décidus boréaux. La description des échanges d'eau et d'énergie de surface s'est ensuite progressivement complexifiée, prenant en compte par exemple la conductance stomatique, les différents types de photosynthèse (C3 et C4), ou le profil racinaire (de Rosnay and Polcher, 1998). Ce module a ensuite été couplé avec un autre module nommé STOMATE (Saclay Toulouse Orsay Model for the Analysis of Terrestrial Ecosystems) permettant de représenter la dynamique des réservoirs de carbone, afin de former un modèle de transfert entre sol, végétation et atmosphère (SVAT pour « Soil Vegetation Atmosphere Transfer) (Viovy, 1996). C'est enfin avec l'ajout d'un module de la dynamique de végétation (DGVM pour « Dynamic Global Vegetation Model »), issu du modèle LPJ (Lund-Potsdam-Jena, Sitch et al., 2003), décrivant la survie et la compétition entre PFTs, que le modèle ORCHIDEE (Organising Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems) est né (Krinner et al., 2005). Un résumé du fonctionnement global d'ORCHIDEE est décrit dans la Figure 13. Les modules « stomate » et « dynamique de la végétation » peuvent être activés ou désactivés en fonction des besoins. Si ici le premier sera activé tout le temps, le DGVM sera désactivé dans le Chapitre 3 et activé dans le Chapitre 4.

De plus, de nombreux développements sont effectués en parallèle, pour être à terme réintroduits après validation dans la version standard, appelée « trunk », et utilisés dans l'IPSL-CM. Ainsi aujourd'hui sont développés les cycles de l'azote, du phosphore, la discrétisation des peuplements forestiers en classes d'âge et de diamètre, la mortalité naturelle ou liée à l'Homme des forêts, la représentation des tourbières,… La version utilisée dans cette thèse est la version Hautes Latitudes (ORCH-HL) qui comprend un certain nombre de

processus spécialement ajoutés afin de mieux représenter les régions boréales. Cette version contient notamment le gel du sol, développé par Gouttevin et al. (2012), permettant de modéliser le pergélisol et un système de neige à trois couches issu du modèle du CNRM, ISBA, introduit par Wang et al. (2013). Afin de corriger la représentation distribution de la végétation des arbres boréaux (Woillez et al., 2011), une mise à jour de la dynamique des arbres boréaux a été effectué (Zhu et al., 2015). Ces processus sont actuellement intégrés dans la version « trunk » du modèle pour les futures simulations de l'exercice CMIP6.

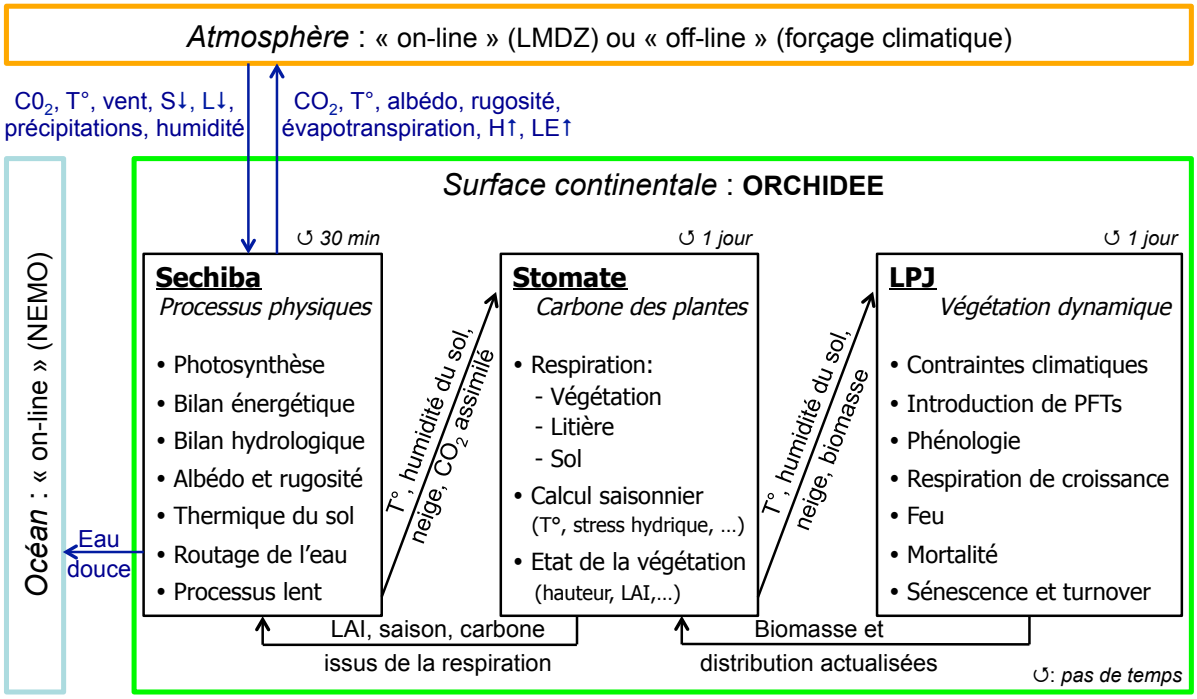


Figure 13. Fonctionnement du modèle ORCHIDEE. Les flèches bleues représentent les échanges entre ORDHIDEE et les autres modèles de l'IPSL-CM. La structure principale d'ORCHIDEE est découpée en trois parties distinctes, avec les différents pas de temps indiqués et les principaux processus associés. Chaque point correspond à une routine distincte. Les flèches noires représentent les échanges entre ces compartiments. T° la température, S↓ et L↓ respectivement les rayonnements incidents de courtes et grandes longueurs d'ondes, H↑ et LE↑ respectivement les flux de chaleur sensible et latente.

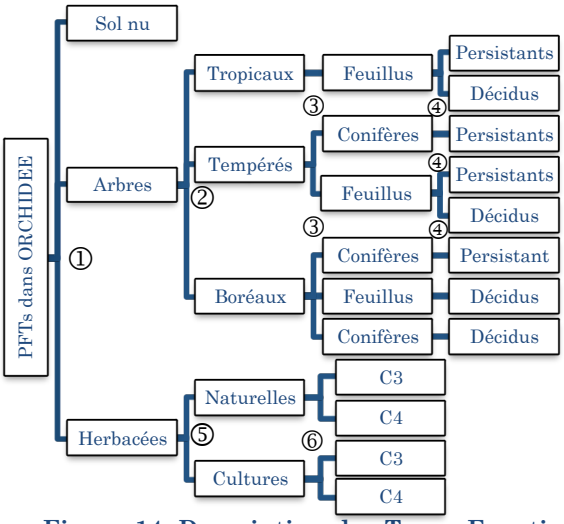
Une des principales difficultés de cette thèse provient du fait que la modification et l'ajout de nouveaux PFTs pour décrire la végétation boréale implique des modifications profondes du code dispersées dans l'ensemble des routines. Afin de comprendre et d'être capable d'expliquer les implémentations effectuées (Chapitre 3 et Chapitre 4), il est nécessaire d'avoir une connaissance précise des routines en jeu et des processus qu'elles représentent. Dans la suite de la description du modèle ORCHIDEE (version ORCH-HL), on se concentrera sur les processus pré-existants qui ont été ensuite adaptés pour la nouvelle végétation (Chapitre 3).

2.1.3. Représentation de la végétation, du sol et de la neige

Ces trois éléments ont pour point commun d'être utilisés dans quasiment tous les modèles de surface continentale (associés à des ESM) et d'être discrétisés en plusieurs « classes » ou couches.

2.1.3.1. La végétation et le carbone

Dans ORCHIDEE, comme dans la plupart des modèles de surface, la végétation est classée suivant des types fonctionnels de plantes (Epstein et al., 2000; Kaplan et al., 2003; Sitch et al., 2003; Bonan et al., 2011; Clark et al., 2011). Ils permettent de représenter des différences tant structurelles que fonctionnelles au sein de la biosphère mondiale, tout en limitant leur nombre. Si ce nombre varie suivant les modèles, dans la version de base d'ORCHIDEE il y a 13 PFTs (Figure 14) ; ils se distinguent notamment par leurs caractères biogéophysiques, biogéochimiques, phénologiques et climatiques. Dans le modèle ORCHIDEE, excepté pour la phénologie et le type de photosynthèse, la plupart des équations sont génériques d'un PFT à un autre : seules les valeurs des paramètres permettent de distinguer les différents types de végétation (Kuppel, 2012). Chaque point de la grille comprend une combinaison de fractions de végétation de chaque PFT, fractions qui sont soit imposées (hors DGVM), soit calculées via la compétition et la survie des végétaux (avec DGVM). Enfin, pour chaque PFT, l'ensemble des équations de photosynthèse, de flux de carbone, et d'eau sont résolues. Toutefois, un seul bilan d'énergie est résolu pour l'ensemble des PFTs de chaque maille du modèle. Notons enfin que dans la version d'ORCHIDEE utilisée dans cette thèse, la végétation est représentée par une seule couche (modèle à grandes feuilles dit « big-leaf »), sans discrétisation verticale du couvert. Cela implique que la végétation des sous-bois n'est pas représentée et que la somme des fractions de tous les PFTs d'une maille de grille est inférieure ou égale à un.



PFT	Description
1	Sol nu
2	Arbres tropicaux à feuillage persistant
3	Arbres tropicaux à feuillage décidu
4	Conifères tempérés persistants
5	Arbres tempérés à feuillage persistant
6	Arbres tempérés à feuillage décidu
7	Conifères boréaux persistants
8	Arbres boréaux à feuillage décidu
9	Conifères boréaux décidus
10	Herbacées C3
11	Herbacées C4
12	Herbacées cultivées C3
13	Herbacées cultivées C4

Figure 14. Description des Types Fonctionnels de Plantes (PFTs) présents dans ORCHIDEE. A gauche, un diagramme de la distinction des PFTs suivant leurs spécificités physionomiques (①), climatiques (②), leur rang (③), leur phénologie (④), leur nature (⑤) et encore leur biogéochimie (⑥). A droite, le tableau récapitulatif des PFTs avec leurs noms complets et leurs numéros associés.

Le dioxyde de carbone atmosphérique est intégré à la biosphère au niveau des feuilles lors de la photosynthèse, et est ensuite distribué aux différents réservoirs :

- La biomasse produite par photosynthèse (NPP) est répartie entre les huit compartiments (organes) que comprend la végétation dans ORCHIDEE : on notera principalement les feuilles, le bois, les racines, les fruits et les réserves (Tableau 1). Cette répartition est appelée l'allocation du carbone dans la plante (Figure 15) (Friedlingstein et al., 1999). Étant vivante, cette biomasse respire : elle utilise une part de ses réserves carbonées afin de produire de l'énergie nécessaire au fonctionnement des cellules. Le carbone sous forme de dioxyde, résidu de ce processus, est relâché dans l'atmosphère. C'est la respiration autotrophe (Figure 15).
- La biomasse végétale est continuellement amputée d'une fraction due à la sénescence mais aussi au cycle saisonnier (avec notamment la chute des feuilles en automne) (Botta et al., 2000). Cette biomasse est directement intégrée à la litière (Figure 15), différenciée en deux compartiments, structurel et métabolique suivant sa composition. Afin de distinguer la fraction intégrée à chacun des compartiments, on prend en compte le ratio lignine/carbone et carbone/azote contenu initialement dans la végétation dont la litière est issue (Tableau 1). Une partie de cette matière organique morte est alors décomposée par des micro-organismes suivant les températures et les conditions hydriques du sol. Ces organismes respirent (respiration hétérotrophe) et rejettent donc du CO_2 (Figure 15).
- Le carbone restant est alors regroupé (et non plus distingué par PFT) et distribué entre trois réserves de carbone distinctes, suivant le temps caractéristique de décomposition, selon le modèle CENTURY (Parton, 1996) : le réservoir actif (1,5 ans), le réservoir lent (25 ans) et enfin le réservoir passif (1000 ans). Cette décomposition est effectuée par des micro-organismes et produit donc du CO_2. Le CO_2 produit est directement restitué à l'atmosphère.

- **Tableau 1. Description des 8 compartiments (organes) des végétaux dans ORCHIDEE, et les ratios respectifs lignine / carbone (L:C) et carbone / azote (C:N) associés.**

Compartiment	Description	Ratio L:C	Ratio C:N
1	Feuilles	0,22	40
2	Aubier* aérien	0,35	40
3	Aubier* sous le sol	0,35	40
4	Duramen** aérien	0,35	40
5	Duramen** sous le sol	0,35	40
6	Racines	0,22	40
7	Organes reproductifs	0,22	40
8	Réserves	0,22	40

- * partie de l'arbre juste sous l'écorce correspondant aux zones d'accroissement, ** partie interne du bois ne comportant plus de cellules vivantes (cœur du bois). L'aubier et le duramen constituent le bois des arbres.

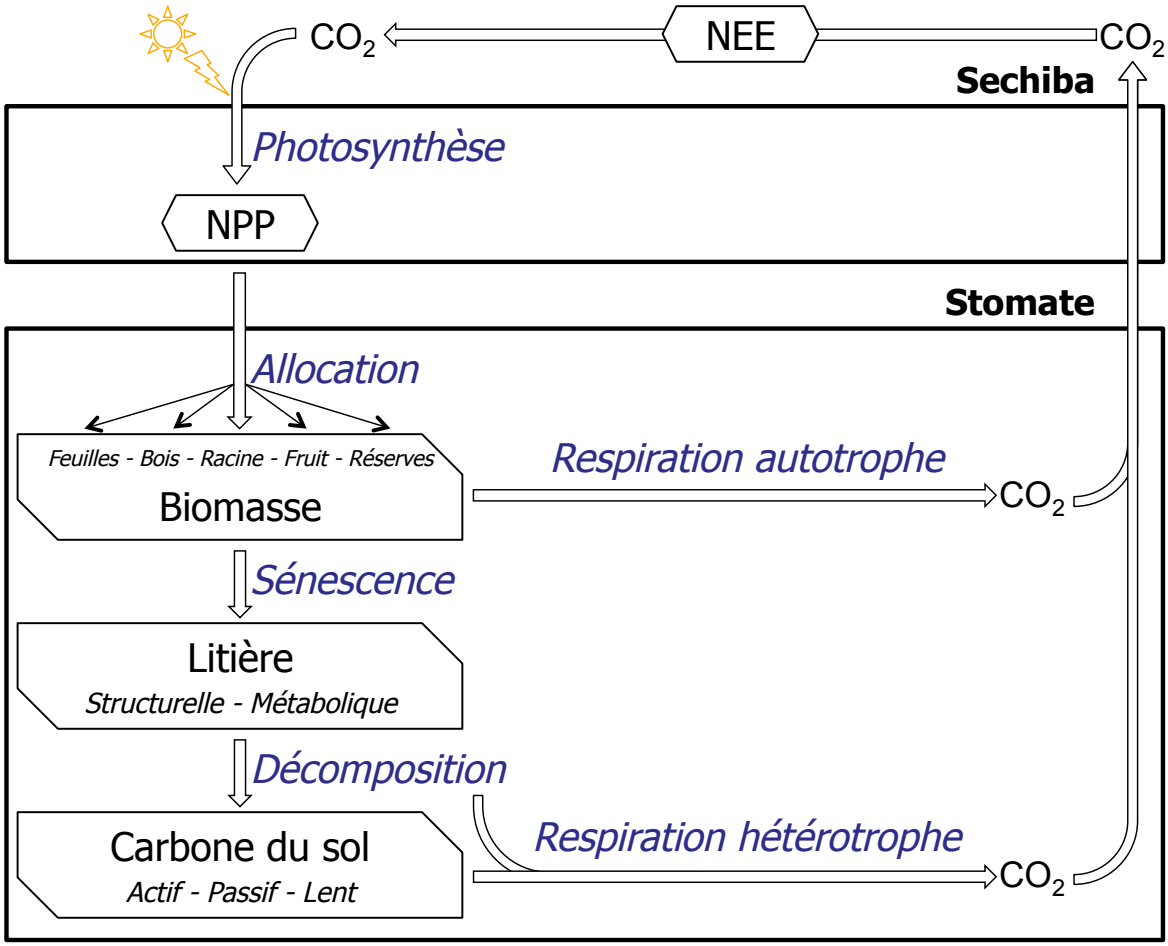


Figure 15. Structure générale du modèle ORCHIDEE décrivant les principaux processus (en bleu) et réservoirs (encadrés) de carbone dans les modules Sechiba et Stomate. Adapté de Santaren (2006).

2.1.3.2. Le sol, l'eau et l'énergie

Pour représenter le sol dans ORCHIDEE, on utilise une discrétisation verticale : c'est-à-dire que l'on découpe le sol en couches de plus en plus épaisses selon leur profondeur. Le nombre de couches et leur profondeur varient suivant la thermique du sol, le profil hydrique, etc.

L'eau dans le sol

L'hydrologie du modèle ORCHIDEE a été pendant longtemps représentée selon un modèle bi-couches (Choisnel et al., 1995), avec deux réservoirs : un premier superficiel et un second en profondeur, de hauteur variable suivant les flux d'eau. Depuis les années 2000, un second modèle d'hydrologie multicouches a été développé (de Rosnay, 1999). Celui-ci découpe le sol en 11 couches d'une profondeur caractéristique prescrite par une suite géométrique (Équation 6) et dont la distribution est présentée dans le

Tableau 2.

Équation 6 $$Z_i = Z_N \times \frac{(2^{(i-1)})-1}{(2^{(N-1)})-1}$$

Avec Z_i (m) la profondeur de la couche étudiée, i son indice dépendant de sa profondeur croissante (variant de 1 à 11), N l'indice de la dernière couche et Z_N la profondeur de la dernière couche (égale à 2 m).

Au sein de ces couches, le bilan d'eau intègre l'infiltration des précipitations, le drainage depuis/vers les autres couches, la diffusion au sein des différentes couches du sol et l'absorption racinaire. On peut donc calculer l'évolution de la teneur en eau volumique dans le sol, via la résolution de l'équation de Fokker-Planck (Équation 7). A partir de cette teneur en eau, on déduit pour chacune des couches son contenu en eau (Équation 8 et Figure 16).

Équation 7. $$\frac{\delta\theta}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z}\left(D(\theta)\frac{\delta\theta(z,t)}{\delta z} - K(\theta)\right) - S$$

Avec θ ($m^3.m^{-3}$) la teneur en eau volumique, D(θ) ($m^2.s^{-1}$) la diffusivité de l'eau dans le sol, K(θ) ($m.s^{-1}$) la conductivité hydraulique et S ($m^3.m^{-3}.s^{-1}$) l'extraction de l'eau via l'appareil racinaire de la végétation.

Équation 8. $$\begin{cases} dz_1 = \frac{z_2}{2} & et \quad W_1 = \frac{\Delta Z_2}{8}(3\theta_1 + \theta_2) \\ dz_i = \frac{Z_{i+1} - Z_{i-1}}{2} & et \quad W_i = \frac{\Delta Z_i}{2}\left(\frac{\theta_i + \frac{\theta_i + \theta_{i-1}}{2}}{2}\right) + \frac{\Delta Z_{i+1}}{2}\left(\frac{\theta_i + \frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2}}{2}\right) \\ dz_N = \frac{Z_N - Z_{N-1}}{2} & et \quad W_N = \frac{\Delta Z_N}{2}(3\theta_N + \theta_{N-1}) \end{cases}$$

Avec Z_i (m) la profondeur de la couche étudiée, ΔZ_i (m) son épaisseur, θ_i sa teneur en eau, W_i son contenu en eau, i son indice dépendant de sa profondeur (variant de 1 à 11) et N l'indice de la dernière couche.

Tableau 2. Discrétisation verticale des couches hydriques.

Indice i	Profondeur (m)
1	0,00
2	0,00196
3	0,00587
4	0,0137
5	0,0293
6	0,0606
7	0,123
8	0,248
9	0,499
10	0,999
11	2,00

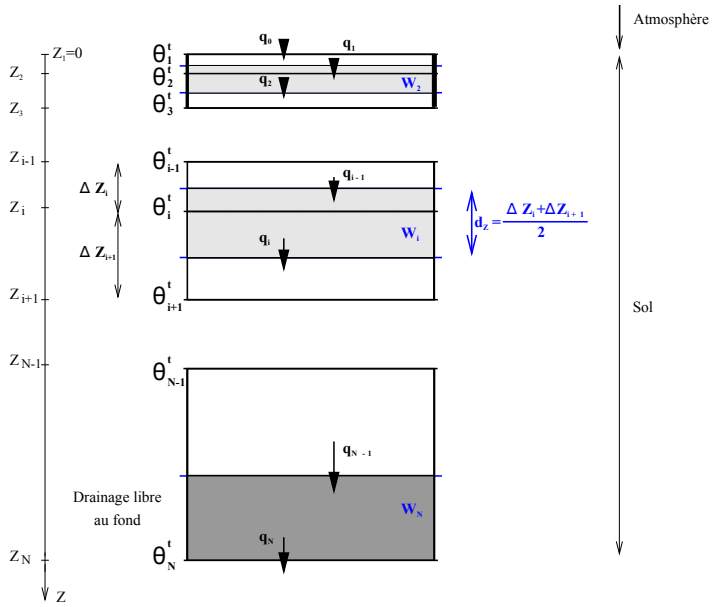


Figure 16. Discrétisation verticale du sol utilisée pour résoudre l'Équation 7 (de Fokker-Plank). D'après de Rosnay (1999).

Avec Z_i la profondeur de la couche (m), ΔZ_i (m) son épaisseur, θi sa teneur en eau, W_i son contenu en eau, q_i représentant les flux d'eau, i son indice dépendant de sa profondeur (de 1 à 11) et N l'indice de la dernière couche.

Sans rentrer dans le détail des équations utilisées pour résoudre l'équation de Fokker-Planck (Équation 7), voici quelques points qu'il reste important à noter. Au niveau des limites supérieure et inférieure, à la surface on prend en considération le flux entrant d'eau dans le sol (terme d'infiltration), moins l'évaporation du sol nu, alors qu'au fond on considère un drainage libre. La diffusivité et la conductivité hydraulique dépendent principalement de la granulométrie des sols, définie à partir des textures. Les textures sont réparties en 3 grandes classes : grossière (sables avec <35% d'argile et >65% de sable), moyenne (limon avec <35% d'argile et < 65% de sable) et fine (argile avec >35 % d'argile). Elles sont elles-mêmes définies à partir de la carte de texture de Zobler (1986). Enfin, pour définir l'extraction de l'eau par les racines, trois colonnes d'eau distinctes sont définies, correspondant à la catégorie de la végétation présente (arbres, herbacées ou sol nu) sur le sol. La taille de ces trois colonnes dépend directement de la surface représentée par les fractions de végétation respectives.

La thermique dans le sol

La discrétisation verticale utilisée pour la thermique du sol a varié dans ORCHIDEE, passant par exemple de 7 couches (0-5,5m) à 11 couches (0-88m) lors de l'introduction du gel dans le sol (Gouttevin et al., 2012). Dans cette étude nous avons utilisé cette dernière version, mais appliquée sur 32 couches (0-47,5m). Ce schéma comprenant le gel du sol est conçu pour représenter simultanément les échanges de chaleur sensible selon l'équation de Fourier et les échanges de chaleur latente impliqués dans le gel et la fonte de l'eau du sol. Les propriétés thermiques du sol dépendent de la teneur en eau, qui est interpolée toutes les 30 min sur la grille correspondant à la thermique à partir du module hydrologique. Cela implique des changements dans les propriétés thermiques et hydrologiques du sol induits par le changement de phase de l'eau du sol. Pour les conditions limites, on a un équilibre des flux entrant et sortant au niveau de la surface du sol (via le bilan d'énergie), alors qu'au niveau de la limite inférieure on a un flux thermique nul.

La discrétisation des niveaux des sols et de leur épaisseur provient de Hourdin (1992). L'épaisseur de la première couche est de 4,3 cm (contre à peine 2 cm pour la couche hydrique) et suit une loi géométrique (Équation 9 b). Cette description permet de reproduire le signal thermique sur des périodes journalières, annuelles ou décennales. On obtient la profondeur de chaque nœud ou limite de couche suivant l'Équation 9 a (valeurs en ANNEXE A).

Équation 9. **a)** $ZZ_i = \beta \times \gamma \times \frac{\alpha^k - 1}{\alpha - 1}$

b) $dzz_i = dzz_0 \times \alpha^{i-1}$ **(avec** $dzz_0 = ZZ_0$**)**

Avec i l'indice de la couche étudiée (variant de 1 à 32), ZZ_i (m) la profondeur de son nœud (alors k=i-0,5) ou la profondeur de sa limite inférieure (alors k=i), dzz_i l'épaisseur de cette couche et α, β, δ trois constantes. α = 1,18 (contre 2 dans Gouttevin et al., 2012), β = 49,75 (=0,3 * (un jour en secondes / π)$^{1/2}$), γ = 8,66.10^{-4} (= racine carré de la conductivité / capacité thermique).

Cas particulier :

Lors de la décomposition dans le sol on doit prendre en compte la répartition des bactéries ainsi que la température et l'humidité du sol : ce sont les paramètres essentiels pour évaluer l'efficacité de la respiration hétérotrophe des micro-organisme lors de la dégradation de la matière organique morte. Une discrétisation commune est donc présente dans ORCHIDEE, sur laquelle les valeurs de température et d'humidité ont été interpolées. C'est une discrétisation en 11 couches (de 0 à 2 m) définie par l'Équation 10.

Équation 10.

$$z_0 = 0$$
$$z_i = \frac{z_{max}}{2^{N-1}-1} \times \frac{(2^{i-1}-1)+(2^i-1)}{2}$$
$$z_N = z_{max}$$

Avec i l'indice de la couche (de 1 à N=11), z_i la profondeur de la couche (m) et z_{max} la profondeur maximale (2 mètres).

2.1.3.3. La neige

Le précèdent schéma de la neige utilisé dans ORCHIDEE considérait la neige comme une seule couche avec une densité et une température uniques, ne contenant pas d'eau liquide et avec une densité et conductivité thermique prescrites. Le schéma utilisé ici provient d'une adaptation de ISBA-ES (Interaction between Soil, Biosphere and Atmosphere-Explicit Snow) développé par Boone and Etchevers (2001). C'est un module de neige contenant trois couches et des fonctionnalités telles que la variation de la densité, de la conductivité thermique pour chacune des couches ou encore la décongélation et la congélation de l'eau à l'intérieur du manteau neigeux, permettant de simuler les processus de neige avec plus de précision. Cette intégration est décrite par Wang et al. (2013) et résumée dans la Figure 17.

L'inclusion de ce nouveau schéma de neige fut critique pour mes travaux sur la végétation boréale, me permettant de mieux traiter les interactions neige – végétation et en particulier la protection des buissons aux températures extrêmes par la neige.

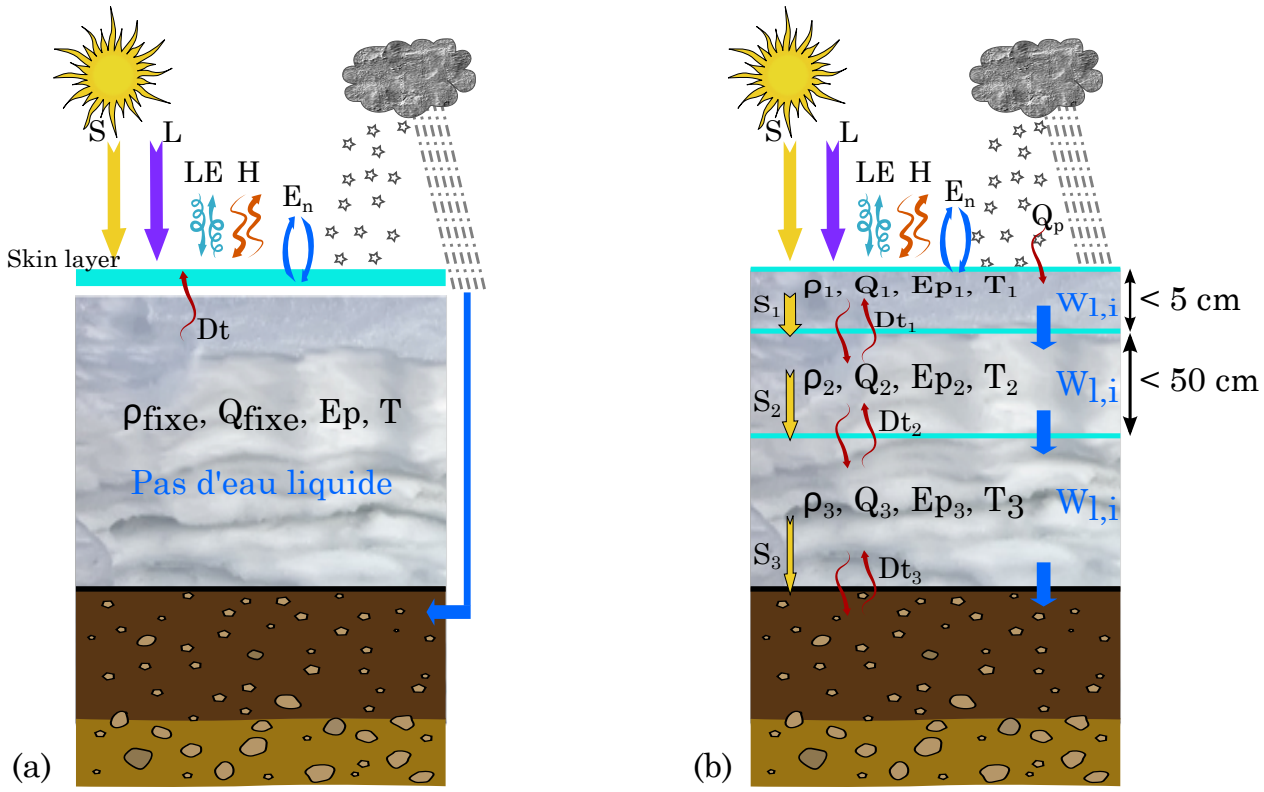


Figure 17. Comparaison des schémas de neige une couche (a) et multicouches (b) utilisés dans ORCHIDEE. La précipitation et la neige sont représentées schématiquement. La diffusion de l'eau est représentée par les flèches droites bleues. S est le rayonnement de courtes longueurs d'ondes, L les grandes longueurs d'ondes, LE et H respectivement la chaleur latente et sensible, E_n l'évaporation, Dt la diffusion thermique, ρ la densité de la neige, Q le contenu calorifique de la neige (et Qp la chaleur provenant de la pluie ou la neige), Ep l'épaisseur de la neige, T sa température et Wl,i son contenu neigeux ou liquide (équivalent en eau).

2.1.4. Présentation des principaux processus

Dans l'objectif de décrire les changements qui ont été intégrés dans ORCHIDEE (qui seront présentés dans le Chapitre 3), je vais présenter et faire un état des lieux des principaux processus avant leur modification. Cela inclut également des améliorations ou corrections de bogues appliquées à l'ensemble de la végétation.

2.1.4.1. Processus impliqués dans le cycle du carbone

La totalité des processus impliqués dans le cycle du carbone (présenté dans la Figure 15) ont été adaptés afin de représenter la végétation boréale.

La photosynthèse

La photosynthèse est le processus qui permet aux végétaux de synthétiser de la matière organique à partir de l'énergie fournie par la lumière et du dioxyde de carbone initialement présent dans l'atmosphère (Équation 1). Cette matière sera ensuite source d'énergie pour la plante. Nous allons nous intéresser à deux processus particuliers qui sont l'accès au CO_2 atmosphérique et la cinétique de la photosynthèse.

D'un point de vue biologique, pour les plantes vasculaires, la diffusion du dioxyde de carbone atmosphérique à l'intérieur d'une plante est régulée au niveau des stomates, présents sur les organes aériens des végétaux (principalement sur la partie inférieure des feuilles). Un stomate est constitué d'un petit orifice (ostiole) dont l'ouverture est contrôlée par des cellules (appelées cellules de garde). Leur fonction est de contrôler le flux des éléments gazeux entre la plante et l'atmosphère, et plus particulièrement les flux d'eau (la transpiration) afin d'éviter une déshydratation complète en cas de conditions chaudes et sèches. Les plantes contrôlent l'ouverture et la fermeture de l'ostiole principalement en fonction de la chaleur, de la luminosité, de l'humidité de l'air et de l'eau disponible dans le sol, par exemple en cas de stress hydrique afin de limiter les pertes en eau.

Dans le modèle ORCHIDEE ce processus est traduit par une conductance stomatique (Équation 11), qui varie principalement en fonction de l'humidité de l'air, des concentrations en carbone et de l'activité cellulaire (photosynthèse et respiration), adaptée de Yin and Struik (2009) :

Équation 11 $$g_s = g_0 + \frac{A+R_d}{C_i+C^*_i} \times f_{vpd}$$

Avec g_s la conductance stomatique (µmol.m^{-2}.s^{-1}), g_o la conductance stomatique résiduelle lorsque l'irradiance se rapproche de zéro (µmol.m^{-2}.s^{-1}), A le taux d'assimilation de CO_2 via la photosynthèse (µmol.m^{-2}.s^{-1}), R_d la respiration « dark » (ou respiration métabolique) (µmol.m^{-2}.s^{-1}), C_i la pression partielle du CO_2 intercellulaire (ppm) et C^*_i le point de compensation de CO_2 en absence de R_d (ppm) et f_{vpd} la fonction représentant l'effet de la différence de pression de vapeur entre l'air et la feuille (-).

Si la conductance stomatique résiduelle g_0 est une constante, la fonction représentant l'impact de l'humidité de l'air f_{vpd} a été définie selon Yin and Struik (2009) de manière empirique (Équation 12.a.). La différence de pression de vapeur entre les feuilles et l'air est définie en fonction des vapeurs saturantes (Équation 12.b.).

Équation 12

a. $$f_{vpd} = \frac{1}{\frac{1}{a_1 - b_1 \times VPD} - 1}$$

b. $$VPD = \frac{q_{sat} \times P}{T_1 + q_{sat} \times T_2} - \frac{q_{surf} \times P}{T_1 + q_{surf} \times T_2}$$

Avec a_1 (-) et b_1 (hPa^{-1}) des constantes empiriques définies par PFT, VPD la différence de pression de vapeur entre la feuille et l'air (hPa), P la pression de surface (hPa), q_{sat} l'humidité saturante à la surface (kg.kg^{-1}), q_{surf} l'humidité proche de la surface (kg.kg^{-1}), T_1 et T_2 deux constantes (-).

Pour résoudre l'Équation 11 il est nécessaire de connaître la concentration de CO_2 intercellulaire régie par une équation reliant l'assimilation de carbone à la diffusion du CO_2 via les stomates (Équation 13) et la relation entre l'assimilation et le potentiel photosynthétique (Équation 14). Ces trois équations à trois inconnues peuvent être résolues numériquement (Yin and Struik, 2009).

Équation 13 $$C_i = C_a - A \times \left({}^{1}/_{g_b} + {}^{1}/_{g_s} \right)$$

Avec C_i la pression partielle du CO_2 intercellulaire (ppm), C_a la concentration de CO_2 à l'intérieur de la canopée ($\mu mol.mol^{-1}$), A le taux d'assimilation de CO_2 ($\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$), g_b et g_s les conductances respectivement de la couche limite et stomatique ($\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$).

Équation 14 $$A = \min\left(A_c(C_i),\ A_j(C_i)\right)$$

Avec A le taux d'assimilation de CO_2 via la photosynthèse ($\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$), A_c et A_j les assimilations de CO_2 limitées respectivement par la cinétique de la rubisco (voir ci-dessous) ou par le transport d'électrons, toutes deux fonctions du $C0_2$ intercellulaire C_i.

Afin de mieux comprendre la distinction entre les deux taux d'assimilation A_j et A_c (Équation 14) il est nécessaire de s'intéresser aux deux grands processus de la photosynthèse qui ont lieu dans les chloroplastes des cellules végétales.

Le premier, A_j, permet de transformer l'énergie lumineuse en énergie utilisable par la cellule au niveau de la membrane des thylakoïdes, petits disques aplatis et superposés où siège la photosynthèse. Au niveau de cette membrane remplie de pigment, l'énergie lumineuse (à travers les photons) permet l'établissement d'un flux d'électrons. Ce flux d'électrons entraîne la création d'un gradient électrochimique entre le stroma (intérieur du chloroplaste) et le lumen (espace au sein des thylakoïdes), qui permet alors la création d'ATP (adénosine triphosphate) et de NADPH/H+ (Nicotinamide adénine dinucléotide phosphate), qui sont deux formes chimiques d'énergie. C'est lors de ce processus (Figure 18) que l'eau, source d'électrons, intervient et est transformée en dioxygène. L'état de la membrane ainsi que la présence de photons sont donc primordiaux pour déterminer l'efficacité de ce processus. On définit alors une référence, la vitesse maximale du flux d'électrons (Jmax) lorsque la lumière est maximale.

Le second, A_c, est lié à l'utilisation de cette forme d'énergie chimique créée, afin de fixer des molécules de dioxyde de carbone et ainsi produire une molécule organique plus stable. Ayant lieu dans le stroma, la fixation du carbone se fait via une suite cyclique de réactions appelée cycle de Calvin (Figure 19). L'enzyme clé, qui est déterminante pour la cinétique de cette réaction, est la RuBisCo (Ribulose 1,5 bisphosphate carboxylase/oxygénase). La disponibilité de cette enzyme et les conditions physiques seront donc très importantes pour déterminer l'efficacité de cette fixation. Celle-ci sera également très liée à la vitesse de carboxylation maximale (Vcmax), qui est la vitesse maximale de réaction dans des conditions optimales.

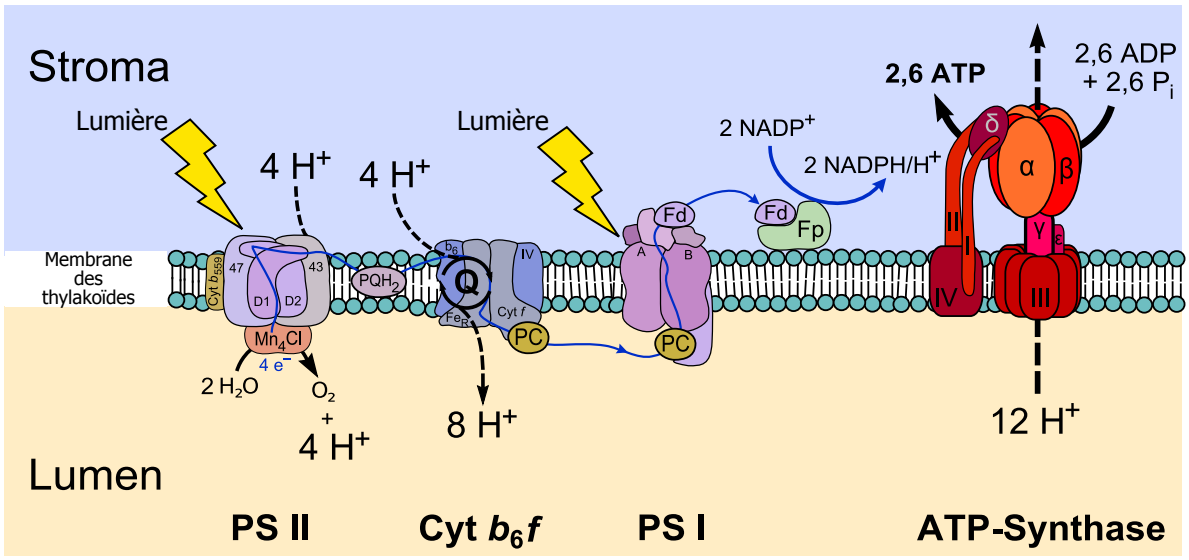


Figure 18. Photosynthèse : chaîne de transfert d'électrons dans les membranes des thylakoides (Wikipédia, 2011). PSII, Cyt b_6f, PSI, ATP-Synthase représentent des enzymes et protéines intervenant dans le processus.

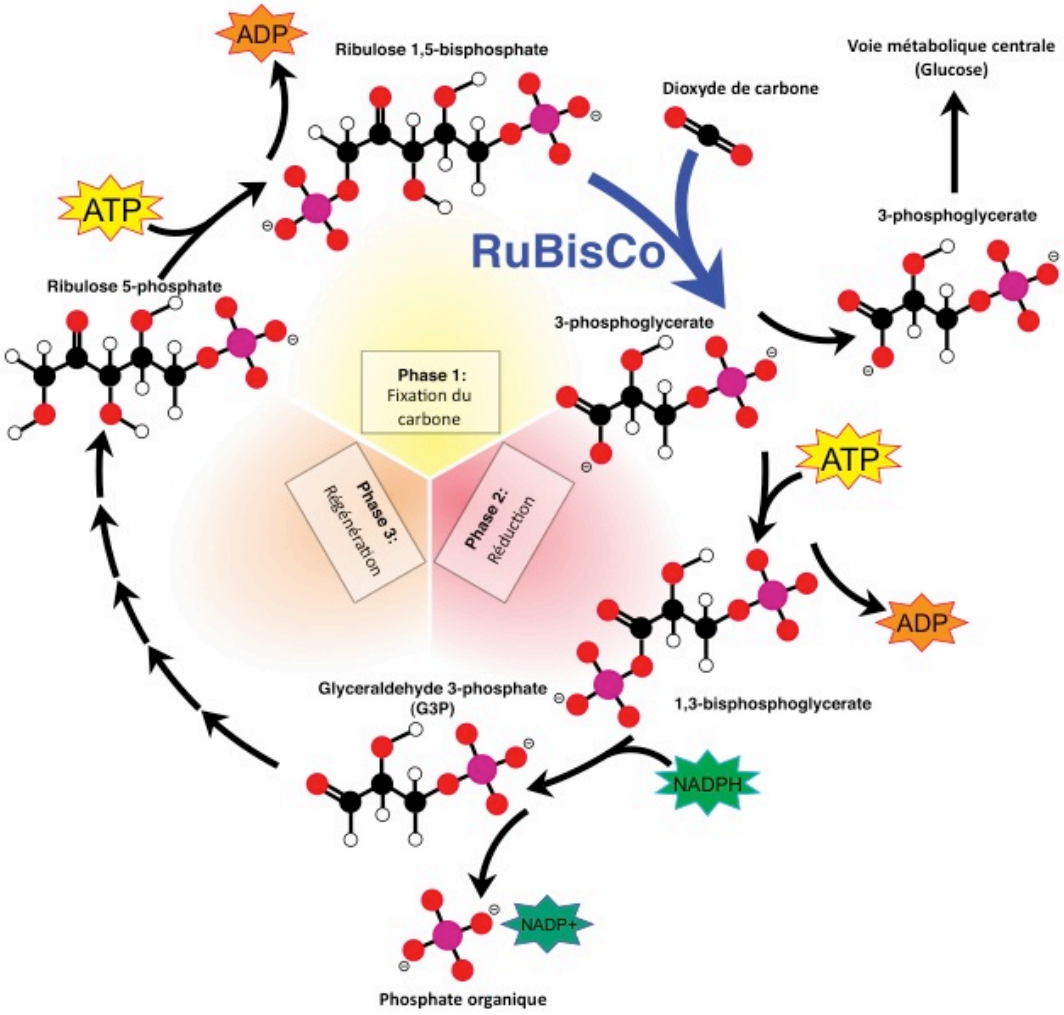


Figure 19. Cycle de Calvin, vue des trois étapes : fixation du dioxyde de carbone, réduction et régénération du ribulose (Wikipédia, 2010).

Dans ORCHIDEE, la photosynthèse est basée sur les équations de Farquhar et al. (1980) et a été adaptée d'après Yin and Struik (2009). Les valeurs de Jmax ou Vcmax sont fixées pour chacun des PFTs et sont liées par une relation linéaire dépendant de la température (l'Équation 15, adaptée de Kattge and Knorr, 2007) :

Équation 15. $$Jmax = \left(a_{JV} + b_{JV} \times t_{month}\right) \times Vcmax$$

Avec t_{month} la température mensuelle (K), a_{jv} (-) et b_{jv} (K^{-1}) deux constantes dépendant du PFT.

Enfin ces deux processus sont directement liés à l'activité cellulaire, elle-même dépendante de la température. En général pour les végétaux on estime que la vitesse de réaction est doublée pour une augmentation de température de 10 degrés (on parle alors de Q10 = 2), jusqu'à la température optimale (généralement entre 10 et 35 °C). Derrière cette observation on retrouve une loi générale de la cinétique chimique : la loi d'Arrhenius (Équation 16). Dans ORCHIDEE une version plus complexe est utilisée, adaptée de Kattge and Knorr (2007), qui prend en compte en plus la température du dernier mois, la température maximale et l'énergie de désactivation (Équation 17). La Figure 20 montre la courbe du coefficient de vitesse de carboxylation pour une plante C3.

Équation 16 $$F(T) = A \times e^{\frac{E_a}{R.T}}$$

Avec F(T) le coefficient de vitesse, A une constante, E_a l'énergie d'activation ($J.mol^{-1}$), R la constante des gaz parfaits ($J.K^{-1}.mol^{-1}$) et T la température (K).

Équation 17 $$F(T) = k_{25} \times e^{\frac{E_a(T-T_{25})}{T_{25}.R.T}} \times \frac{1+e^{\frac{T_{25}.\Delta S-E_d}{T_{25}.R}}}{1+e^{\frac{T.\Delta S-E_d}{T.R}}}$$

$$\Delta S = a_k + b_k \times t_m$$

Avec F(T) le coefficient de vitesse de carboxylation ou celui de la vitesse de transport d'électrons ($mol.m^{-2}.s^{-1}$), k_{25} représente le taux maximum (respectivement Vcmax et Jmax) à 25°C ($mol.m^{-2}.s^{-1}$), T la température (K), E_a et E_d respectivement l'énergie d'activation et de désactivation ($J.mol^{-1}$), ΔS le facteur entropique, R la constante des gaz parfaits, t_m la température mensuelle (K), a_k et b_k deux constantes (respectivement $J.mol^{-1}.K^{-1}$ et $J.mol^{-1}.K^{-1}.°C^{-1}$).

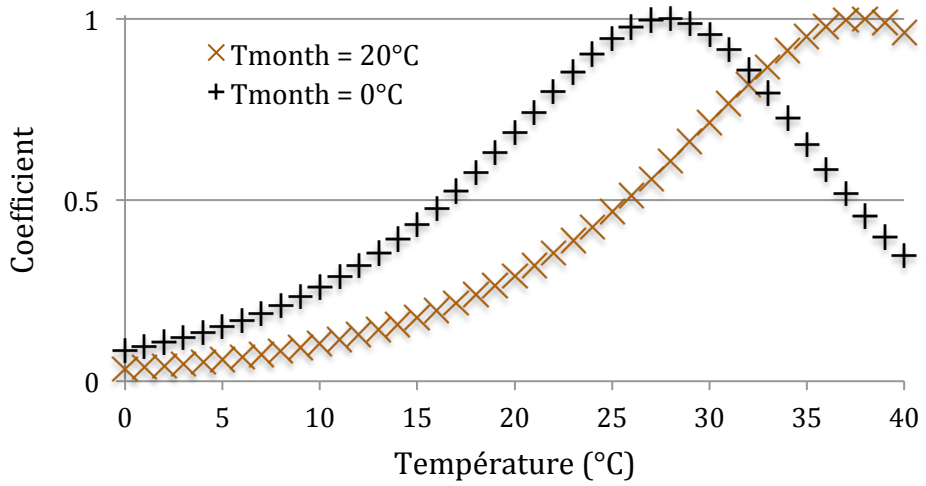


Figure 20. Évolution du coefficient de vitesse de carboxylation en fonction de deux températures mensuelles distinctes, dans ORCHIDEE.

L'allocation du carbone

Pour les végétaux, tant qu'il y a suffisamment de production primaire nette (NPP), correspondant à la photosynthèse brute (GPP) moins la respiration autotrophe, le carbone accumulé par la photosynthèse est distribué aux divers organes, des feuilles aux racines (Tableau 1). Si le nombre d'organes diffère suivant que le végétal est un arbre ou une herbacée, l'allocation dans ORCHIDEE est assez proche pour tous les végétaux.

Tout d'abord une fraction fixe est allouée à la reproduction (10 %). Ensuite en fonction des différents stress que subissent les plantes, l'allocation va favoriser certains organes. Trois stress sont pris en compte : le stress issu du manque de lumière, le stress hydrique et le stress lié à un manque d'azote. Ce dernier n'est en réalité pas calculé dans le modèle, mais un proxy est obtenu à partir de la température et de l'eau disponible dans le sol au cours du dernier mois. Ainsi l'allocation attribuée aux racines est augmentée en cas de stress lié à l'azote mais diminuée en cas de stress lié à la lumière (valeur par défaut 30%, valeur minimale 15%, valeur maximale 90%), afin de simuler une croissance de l'appareil racinaire en cas de problème d'accès aux nutriments. L'allocation attribuée au bois tendre (aubier) est au contraire favorisée en cas de stress issu d'un manque de lumière et désavantagée en cas de stress lié à l'azote (valeur par défaut dans les régions tempérées ou boréales 30%, minimum 0%, maximum 90%), afin de favoriser le développement de la tige ou du tronc en cas de manque de lumière au sein de la canopée. Enfin, le reste est alloué aux feuilles (défaut 40%, minimum 0%, maximum 90%).

Pour les herbacées, l'intégralité du « bois tendre » représentant la tige est considérée au-dessus du sol. Pour les arbres, la répartition entre la partie sous le sol et au-dessus est fonction de l'âge de l'arbre, un arbre âgé investissant préférentiellement sa biomasse au-dessus du sol par rapport à un arbre jeune (minimum 20%, maximum 80%). De plus, chaque jour une fraction (0,14%) de l'aubier devient du duramen (bois de cœur).

En revanche, si la plante est en sénescence induite par le climat (trop sec ou humide, température non adaptée, etc.), alors elle alloue l'intégralité de sa biomasse à ses réserves. Autrement, tant que les réserves n'ont pas atteint une certaine biomasse (correspondant à deux fois la biomasse nécessaire pour produire des feuilles jusqu'au LAI maximum), une fraction de l'allocation totale est attribuée aux réserves (pouvant aller jusqu'à 50 %).

Enfin notons que si le LAI est égal au LAI maximum, alors la fraction devant être attribuée aux feuilles est répartie entre les racines et la tige.

Le turnover

La biomasse accumulée dans la végétation sert au maintien de la plante, à travers ses différents organes. Ensuite, elle peut être soit utilisée lors de la respiration (Équation 2) et produire de l'énergie utilisée pour le fonctionnement cellulaire du végétal (en rejetant du $C0_2$), soit être perdue pour le végétal lors du turnover.

Celui-ci comprend majoritairement 3 processus :

- La « mortalité – sénescence », c'est-à-dire la perte chaque jour d'un petit pourcentage de la biomasse (= 1 / espérance de vie en jours) afin de représenter la mortalité due à la vieillesse.
- La perte de l'intégralité ou d'une fraction d'un organe due à un événement climatique, comme la chute des feuilles due au changement saisonnier en automne ou à cause d'un feu.
- La destruction de l'intégralité d'un végétal lorsque pour des raisons climatiques (i.e. une température critique) une plante meurt.

L'ensemble de ces pertes alimente la litière. Pour une description plus précise se reporter à (Krinner et al., 2005).

La décomposition

La litière est distribuée dans le sol ou au-dessus du sol en fonction de l'origine de la matière organique morte : respectivement sur le sol pour les feuilles et la tige (ou tronc) supérieur(e), et dans le sol pour les racines, réserves et la partie inférieure de la tige. Suivant la quantité de lignine par rapport au carbone contenue dans chacun des organes de chacun des végétaux (Tableau 1) on définit le ratio de lignine contenu dans la litière. Ensuite la litière est décomposée. La décomposition dépend principalement du ratio lignine – carbone, de la température, de l'humidité et des bactéries hétérotrophes. Pour cela, ORCHIDEE utilise une adaptation du modèle CENTURY (Parton et al., 1988) décrite ci-dessous.

Dans un premier temps la matière organique morte et les micro-organismes décomposeurs dans le sol sont considérés comme étant distribués entre 0 et 2 m (Équation 10) suivant un profil exponentiel avec une activité maximale à 0,2 m (Équation 18), indépendamment de la végétation présente. Ensuite, à l'aide de cette même discrétisation mais en pondérant par la fraction de bactéries (f_{b_i}) on calcule la température et l'humidité moyenne sur l'ensemble de ces couches (Équation 19). Au-dessus du sol, la température et l'humidité de surface sont utilisées.

Équation 18 $$f_{b\_i} = c_b \times \left(e^{-z_{i-1}/z_{b\_max}} - e^{-z_i/z_{b\_max}}\right)$$

Avec f_{b_i} la fraction de bactéries (0-1) au niveau de la couche i (de 1 à 11), z_i sa profondeur d, c_b une constante de pondération (-) et z_{b_max} la profondeur d'activité maximale.

Équation 19. $$K = \sum_{i=1}^{N} f_{b_i} \times K_i$$

Avec K l'humidité ou la température moyenne, f_{b_i} la fraction de bactéries et K l'humidité ou la température de la couche i, i étant l'indice de la couche (de 1 à 11).

A partir de la température et de l'humidité, deux fonctions de contrôle de la décomposition sont obtenues, permettant d'obtenir un facteur entre un minimum prédéfini et 1 (représentant une température ou humidité optimale). La fonction dépendant de l'humidité est une fonction empirique polynomiale du second degré (Figure 21 & Équation 20) et celle dépendant de la température est une fonction exponentielle (Équation 21).

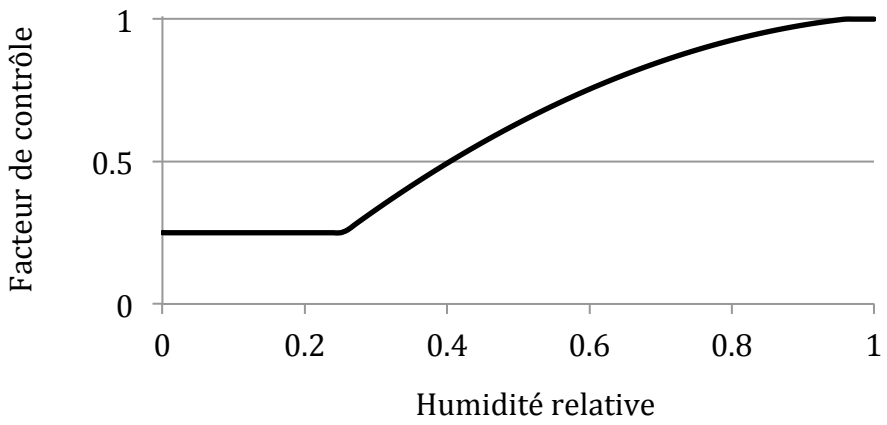


Figure 21. Fonction de contrôle de la décomposition dépendant de l'humidité relative définie dans l'Équation 20.

Équation 20. $$fn(H) = \max\left(H_{min}, \min\left(1, a + b \times H_{rel} + c \times {H_{rel}}^2\right)\right)$$

Avec H_{rel} l'humidité relative (0 pour un stress maximal et 1 pour l'absence de stress), a, b et c trois constantes (respectivement -0,29, 2,4 et -1,1) et H_{min} l'humidité relative minimale (0,25).

Équation 21. $$fn(T) = \min\left(1, e^{s_{Q10} \times T - (T_{ref}/Q10)}\right)$$

Avec T la température (°C), s_{Q10} la valeur du Q10 dans le sol (0,69 °C), T_{ref} la température de référence (30 °C) et Q10 l'écart de température associé (10 °C).

La décomposition est le produit de l'ensemble de ces facteurs et du taux de décomposition (Équation 22), comprenant une séparation suivant que la litière est d'origine métabolique ou structurelle. Une partie du carbone va ensuite soit être relâchée sous forme de CO_2 après respiration hétérotrophe des bactéries permettant la décomposition, soit être distribuée dans un des différents réservoirs de carbone du sol (actif, lent ou passif, cf 2.1.3.1), où elle pourra être stockée en attendant d'être à son tour décomposée. Cette décomposition suit les mêmes principes que ceux présentés ici pour la litière, avec une migration progressive d'une fraction du carbone depuis le réservoir actif vers le réservoir lent puis passif.

Équation 22. $$D = L \times \frac{1}{t_l} \times fn(H) \times fn(T) \times e^{-l_c \times f_L}$$

Avec D la quantité de litière décomposée ($gC.m^{-2}$), L la litière ($gC.m^{-2}$), t_l le temps de turnover de la litière (équivalent en jours : 3 ans pour la litière structurelle, 5 ans pour la litière métabolique), fn(H) et fn (T) les fonctions de contrôle liées à l'humidité et la température, l_c un coefficient (égal à 3 pour la litière structurelle et 0 pour la litière métabolique) et f_L la fraction de lignine.

2.1.4.2. Représentation verticale des plantes

Pour la photosynthèse, on considère la végétation comme une unique grosse feuille par maille. Par contre, pour déterminer la hauteur, la surface foliaire ou l'accès à l'eau on considère une géométrie spatiale des plantes : au-dessus du sol à l'aide d'une allométrie et dans le sol d'un profil racinaire.

Au-dessus du sol : l'« allométrie » des végétaux

La représentation des végétaux est différente suivant qu'il s'agisse d'une herbacée ou d'un arbre. Pour les herbacées dans ORCHIDEE on considère une hauteur fixe. Ainsi l'augmentation de biomasse augmente uniquement le LAI et la surface de végétation. Pour les arbres, une allométrie – c'est-à-dire ici une représentation géométrique des arbres dans l'espace – est définie à travers une suite d'équations identique pour tous les PFTs. La version de l'allométrie des arbres présentée ci-dessous est une version corrigée lors de cette thèse, étant donné que la version précédente fournissait une valeur constante de la hauteur quelque soit les conditions, lorsque la végétation était prescrite (hors DGVM).

Dans ORCHIDEE l'allométrie des arbres est basée sur le modèle dit « pipe tune » (Smith et al., 2001). La géométrie des arbres est représentée de manière très simplifiée (Figure 22) : ils sont considérés comme des cylindres comprenant un tronc (de diamètre d), une hauteur totale (H) ainsi qu'une « couronne » représentant la surface foliaire. L'ensemble de la surface foliaire de tous les individus (ind) représente une surface totale (C_{area}). Les principales relations permettant de décrire l'allométrie des arbres sont présentées dans l'Équation 23, comportant les relations (a) entre le diamètre et la hauteur, (b) entre le volume et le diamètre (directement issue de l'équation du volume d'un cylindre), (c) entre la surface foliaire totale, le diamètre et le nombre d'individus, et (d) entre la biomasse du bois, sa densité, le nombre d'individus et le volume. L'ensemble de ces équations se simplifie et permet d'établir une relation directe entre la hauteur, la biomasse du bois et la surface totale (Équation 23. e). Cette équation admet une hauteur limite maximale fixée préalablement pour chacun des PFTs.

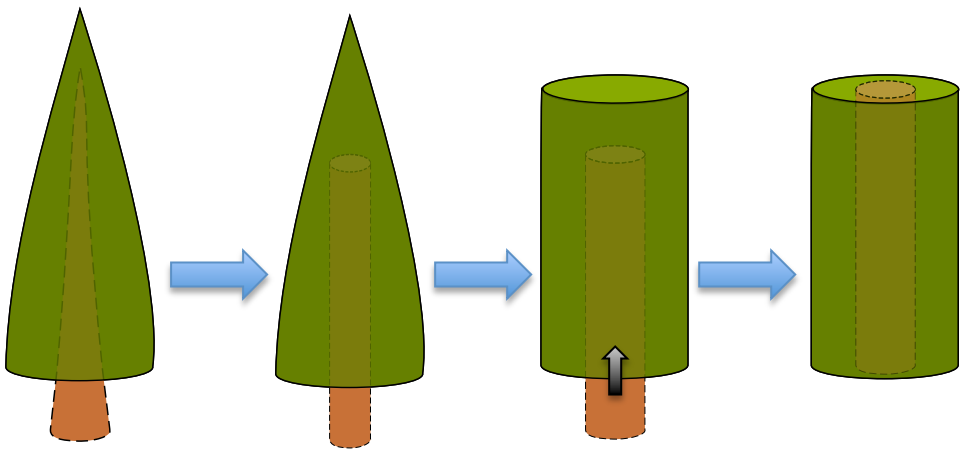


Figure 22. Simplification d'un arbre, permettant de considérer numériquement un arbre comme un cylindre.

Équation 23.

$$\text{a) } H = \beta \times Dia^{\gamma}$$
$$\text{b) } Vol = {}^{\pi}/_{4} \times \beta \times Dia^{2+\gamma}$$
$$\text{c) } C_a = ind \times \alpha \times Dia^{\delta}$$
$$\text{d) } w_m = ind \times Vol \times \rho_w$$
$$\text{e) } H = \beta \times \left[\frac{w_m}{C_a \times \rho_w \times {}^{\pi}/_{4} \times {}^{\beta}/_{\alpha}}\right]^{\gamma/_{2+\gamma-\delta}}$$

Avec H la hauteur d'un individu (m), Dia le diamètre d'un individu (m), Vol le volume d'un individu (m^3), ind le nombre d'individus, C_a l'aire totale des couronnes (m^2), w_m la biomasse totale du bois ($gC.m^2$), ρ_w la densité du bois et α, β, γ, δ des constantes (respectivement 100, 40, 0,5, 1,6).

Lorsque la végétation est statique (hors DGVM) la surface totale de la végétation, équivalente à l'aire totale des couronnes, est fixée. Ainsi l'Équation 23. e permet d'obtenir directement à partir de la biomasse la hauteur (et donc tous les autres paramètres dont le diamètre et le nombre d'individus). Toutefois, par souci de réalisme et afin de ne pas avoir de valeurs absurdes (notamment au niveau du nombre d'individus), lorsque la végétation est statique (c'est-à-dire que l'on sait où les PFTs sont présents spatialement), on impose une hauteur minimale (correspondant à un dixième de la hauteur maximale).

Lorsque la végétation est dynamique (via le DGVM), la biomasse et le nombre d'individus sont des variables pronostiques préalablement calculées, évoluant d'un pas de temps à l'autre. A partir de l'Équation 23, le volume individuel peut donc être directement obtenu en inversant l'équation d, ce qui permet d'obtenir le diamètre (en inversant l'équation b) et obtenir alors tous les autres paramètres.

En-dessous du sol : le profil racinaire

Pour accéder à l'eau présente dans le sol, les plantes ont un appareil racinaire, plus ou moins profond selon les espèces. Étant donné que dans ORCHIDEE l'eau contenue dans le sol l'est au sein d'une multitude de couches de plus en plus profondes, il est important que la végétation puise son eau au sein de chacune des couches. Pour cela un profil racinaire (Figure 23) est défini en fonction de la profondeur et selon une décroissance exponentielle (Équation 24). Cette équation a donc été discrétisée en fonction des couches hydriques du sol (Équation 25).

Équation 24

$$R(z) = e^{-\theta z}$$

Avec R le profil racinaire continu, θ une constante liée au PFT et z la profondeur (m).

Équation 25.

$$R_0 = 0$$
$$R_i = e^{-\theta . Z_i} \frac{e^{-\theta . \Delta Z_i/_2} - e^{-\theta . \Delta Z_{i+1}/_2}}{e^{\theta . \Delta Z_2/_2} - e^{\theta . \Delta Z_N/_2}} \quad , \; i = 2, N-1$$
$$R_N = e^{-\theta . Z_N} \frac{e^{-\theta . \Delta Z_N/_2} - 1}{e^{\theta . \Delta Z_2/_2} - e^{\theta . \Delta Z_N/_2}}$$

Avec R_i le profil racinaire discrétisé, Z_i (m) la profondeur de la couche étudiée, ΔZ_i (m) son épaisseur (telles que définies dans la **Figure 16**) et θ une constante liée au PFT.

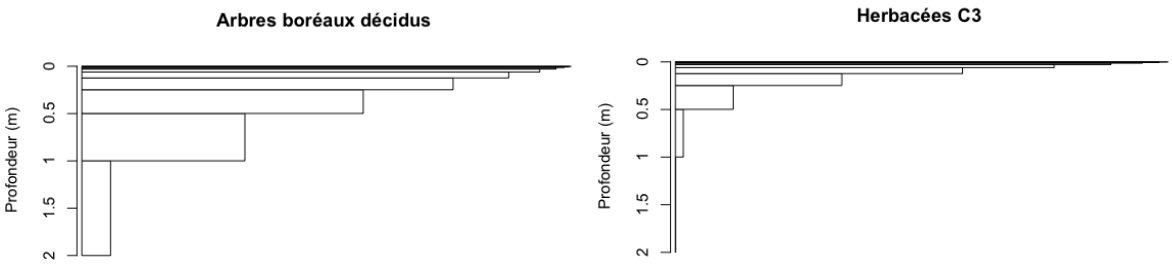


Figure 23. Comparaison du profil racinaire des arbres décidus boréaux (à gauche) et de celui des herbacées C3 (à droite). La somme de la distribution racinaire faisant 1 (axe horizontale).

2.1.4.3. La physique en lien avec la végétation

Je vais présenter succinctement dans cette partie trois aspects physiques du modèle, pour lesquels l'ajout de nouveaux types de végétation boréale a entrainé de profondes modifications.

Les flux thermiques dans le sol

Les flux dans le sol sont discrétisés et calculés pour chacune des 32 couches présentées en 2.1.3.2, en fonction de la végétation (PFT) qu'il y a au-dessus du sol et ce à chaque pas de temps (30 minutes). Sans entrer dans le détail des équations, afin d'établir les capacités et conductivités thermiques, on utilise dans ORCHIDEE une moyenne pondérée des conductivités (Équation 26. a) et des capacités calorifiques (Équation 26. b) entre plusieurs matériaux (ici deux) constituants du sol (texture du sol), respectant les propriétés de l'équation du transfert de chaleur et utilisant la fraction de chaque constituant dans le sol (issue principalement d'une carte globale de description des sols).

Équation 26 **a)** $C = \frac{1}{\frac{f_1}{C_1}+\frac{f_2}{C_2}}$ **et b)** $K = f_1.K_1 + f_2.K_2$

Avec C la conductivité totale ($W.K^{-1}.m^{-1}$), K la capacité totale ($J.K^{-1}.m^{-3}$), f_i les fractions de chacun des matériaux ($m.m^{-1}$), C_i et K_i leurs conductivités et capacités.

Ainsi on peut prendre en compte la présence de matière organique (selon la profondeur jusqu'à laquelle il y en a), et moduler les propriétés thermiques suivant la présence d'eau (selon la proportion d'eau dans le sol), suivant le niveau de porosité (à l'intérieur de laquelle il y a l'eau, mais uniquement pour la conductivité) et suivant l'état de l'eau (liquide ou solide selon si la température est au-dessus de 1°C ou en-dessous de -1°C, respectivement). Cela permet de prendre en compte l'impact du pergélisol. Entre -1°C et 1°C le calcul de la capacité calorifique est plus compliqué, puisqu'il se doit de prendre en compte la fusion possible à l'intérieur des pores et donc la chaleur latente de fusion. Cette partie du modèle est décrite plus en détail dans Gouttevin et al. (2012) (équation 2.4). La liste des conductivités et capacités utilisées est présentée ci-dessous (Tableau 3).

Tableau 3. Conductivité et capacité des différents constituants dans le sol.

Matériaux	Conductivité ($W.K^{-1}.m^{-1}$)	Capacité ($J.K^{-1}.m^{-3}$)
Sol sec	0,40	$1,80.10^6$
Sol saturé (liquide)	0,6	$3,03.10^6$
Sol saturé (glacé)	2,2	$2,11.10^6$
Sol minéral (porosité =0,41)	2,32	NA
Sol organique (porosité =0,92)	0,25	$2,5.10^6$

La rugosité et l'albédo

Dans les modèles climatiques la rugosité représente la résistance au vent que provoque la végétation. Elle est donc grandement dépendante de la hauteur de la végétation, de sa surface ainsi que de l'agencement spatial des plantes (par rapport à la direction du vent). L'albédo, présenté dans la Figure 11, représente la fraction d'énergie lumineuse réfléchie par rapport à celle incidente. Il est dans certains modèles, comme dans le modèle ISBA de Météo France (Chalita and Le Treut, 1994; Douville et al., 1995; Boone, 2002), directement lié à la rugosité de surface. Dans la version originale d'ORCHIDEE le calcul de la rugosité comportait des erreurs importantes et a donc été corrigé lors de cette thèse. De même, le calcul de l'albédo de la neige sur la végétation datait du début des années 90 (Chalita and Le Treut, 1994), était obsolète et a été amélioré pour une meilleure description des zones arctiques. Si les nouveaux développements seront présentés dans le Chapitre 3 et utilisés pour toutes les simulations, voici les deux principales raisons pour lesquelles ils nécessitaient une refonte.

En ce qui concerne la rugosité, le principe est le suivant : la hauteur de la végétation (qui était constante hors DGVM avant les modifications présentées en 2.1.4.2) est calculée d'un côté et la surface de végétation de l'autre. Cette surface était égale à la surface de végétation maximale (v_{max}, en considérant les branches présentes toute l'année) pour les arbres et la surface de végétation réelle (v) pour les herbacées. Mais cela ne permettait pas de prendre en compte la surface totale de la cellule d'une grille : si la somme des v_{max} sur un point est égale à 1, lorsque v est pris en compte ($v<v_{max}$) pour les herbacées, la différence (v_{max}-v) est omise. Le résultat devait donc être pondéré par la surface étudiée. Or cela peut entrainer un biais important, notamment en hiver. Par exemple dans le cas d'une végétation tempérée constituée de 50% d'arbres d'une hauteur de 15 mètres et de 50% d'herbacées, en hiver la surface réelle de la végétation herbacée est nulle et remplacée par du sol nu. La rugosité calculée était donc égale à celle procurée par les arbres (sur 50 % de la surface) associée à celle des herbacées mais sur une surface nulle. Après pondération, à la place d'une rugosité synthétisant 50 % d'arbres et 50 % de sol sans végétation (sol nu), on obtenait donc une rugosité égale à 100 % d'arbres, surévaluant considérablement sa valeur. De plus, l'épaisseur de neige sur ou au niveau de la végétation n'était pas prise en compte.

En ce qui concerne l'albédo de la neige en présence de végétation, afin de calculer la fraction de neige sur la végétation une équation relativement ancienne était utilisée (Équation 27). Elle est issue des travaux de Chalita and

Le Treut (1994) dans lesquels cette fraction est indépendante du type de végétation. De plus, la quantité de neige était utilisée à la place de son épaisseur car l'épaisseur de la neige n'était pas directement calculée avec l'ancien schéma de neige : une densité de neige fixée à 1 cm.kg^{-1} permettait de déterminer la hauteur de la neige (cm) équivalente à la masse de la neige (kg.m^{-2}). Aujourd'hui une valeur précise de la densité et donc de la hauteur de neige est disponible avec le nouveau schéma de neige (section suivante et Wang et al., 2013) ; ainsi j'ai modifié l'équation calculant la fraction de neige sur la maille (voir section 3.3) afin de bénéficier pleinement de ce nouveau schéma.

Équation 27 $$fs = \frac{m_s}{m_s + c_s}$$

Avec fs la fraction de neige sur la maille, m_s la masse de la neige (kg.m^{-1}) et c_s une constante (= 10 cm, représentant la hauteur de la neige nécessaire afin d'observer une fraction de neige de 50 %).

Le comportement de la neige

Le schéma de neige utilisé dans cette version d'ORCHIDEE considère 3 couches tel que présenté dans la section 2.1.3.3. Au sein de chaque maille modélisée, la neige tombe et se tasse uniformément sur le sol quel que soit la topographie ou la végétation. S'il n'est aujourd'hui pas possible de modifier le dépôt de la neige (et donc de sa masse) au sein d'une maille en fonction des PFTs présents (car il faudrait dans ce cas repenser tout le bilan énergétique associé), c'est la compaction et donc l'évolution de la densité et de la hauteur de la neige qui nous intéressera.

Pour cela une suite de trois équations empiriques associées à un jeu de paramètres est utilisée, développée initialement par Boone and Etchevers, 2001). Ainsi, pour chacune des trois couches de neige, le tassement potentiel de la neige dû à la chute de neige (Équation 28) est calculé, puis la viscosité de la neige qui va à l'encontre de ce tassement (Équation 29) et enfin la densité résultante (Équation 30). Afin de conserver la masse de neige, la hauteur évolue de manière inversement proportionnelle à la densité. Ces propriétés de la neige nous permettront par la suite (section 3.3) d'intégrer des processus d'interaction neige – végétation cruciaux pour le développement des buissons boréaux, notamment à travers l'introduction d'une hauteur de la neige variable selon les PFTs présents.

Équation 28 $$t = a_{sc} \times e^{(-b_{sc} \times (T_0 - \min(T_0, T_s)) - c_{sc} \times \max(0, \rho_s - \rho_\tau))}$$

Avec t le coefficient de tassement, T_0 la température à 0°C (°K), T_s la température de la neige et ρ_s sa densité (précédente). a_{sc}, b_{sc}, c_{sc} *et* ρ_s des constantes définies dans le **Tableau 4**.

Équation 29 $$v = \eta_0 \times e^{(a_\eta \times (T_0 - \min(T_0, T_s)) + b_\eta \times \rho_s)}$$

Avec v le coefficient de viscosité, T_0 la température de 0°C (°K), T_s la température de la neige et ρ_s sa densité (précédente). η_0, a_η et b_η des constantes définies dans le **Tableau 4**.

Équation 30 $$\rho_{s\_new} = \rho_s \times \left(1 + d_{st}\left(\frac{g_a \times m_s}{v} + t\right)\right)$$

Avec ρ_s la nouvelle densité de la neige (après compaction), ρ_s sa densité précédente, m_s sa masse, d_{st} la durée d'un pas de temps (30 minutes en secondes), g_a l'accélération de la pesanteur (~9,8 m.s^{-2}), et v et t tels que définis précédemment.

Tableau 4. Paramètres de compaction de la neige (d'après Wang et al., 2013)

Paramètres	Description (paramètre de)	Valeurs	Gamme des valeurs
a_{sc}	Stabilisation de la neige (s^{-1})	$2,8 .10^{-6}$	$1,4$ à $4,2 .10^{-6}$
b_{sc}	Stabilisation de la neige (K^{-1})	0,04	0,02 à 0,06
c_{sc}	Stabilisation de la neige ($m^3.kg^{-1}$)	460	230 à 690
a_η	Viscosité Newtonienne de la neige (K^{-1})	0,081	0,0405 à 0,12
b_η	Viscosité Newtonienne de la neige ($m^3.kg^{-1}$)	0,018	0,009 à 0,027
η_0	Viscosité Newtonienne de la neige (Pa.s)	$3,7 .10^7$	$1,85$ à $5,55 .10^7$
ρ_τ	Capacité maximale du contenu de la neige en eau ($kg.m^3$)	150	100 à 300

Si la description du modèle ORCHIDEE utilisé dans cette thèse ainsi que des modifications ou corrections majeures apportées s'arrête ici, celle-ci ne représente qu'un aperçu du schéma de surface ORCHIDEE ou du travail effectué en amont afin de comprendre l'organisation et le fonctionnement du modèle. L'organigramme de la version utilisée présenté en ANNEXE B montre l'étendue des modules présents dans ce modèle. Tous les modules ont été au moins légèrement modifiés et jusqu'à partiellement refondus. Enfin, il n'est pas possible et peu intéressant de décrire le temps (probablement supérieur à un quart de la durée de cette thèse) passé au « débogage » du modèle, passage obligatoire pour tout développeur. Il a été ainsi parfois nécessaire de partir à la chasse des causes de valeurs « non attribuées », de LAI négatives ou des biomasses incohérentes.

2.2. Les données

Différents jeux de données ont été nécessaires durant cette thèse. Afin de lancer des simulations, il a fallu obtenir des forçages climatiques, une carte de végétation comprenant les nouveaux PFTs et des données quantitatives sur ces végétations afin d'étalonner les développements effectués.

2.2.1. Région étudiée

L'objectif de cette thèse était de développer une végétation boréale intégrée dans un modèle climatique global. La région étudiée a donc été choisie sur une large échelle tout autour du globe dans les hautes latitudes. Nous avons choisi la latitude limite de 40°N, incluant donc l'Amérique du Nord à partir du milieu des États-Unis, le Groenland, presque toute l'Europe et la moitié Nord de l'Asie (Figure 24). La limite est volontairement assez étendue au sud afin de pouvoir observer la transition de la végétation entre les régions tempérées et Arctiques.

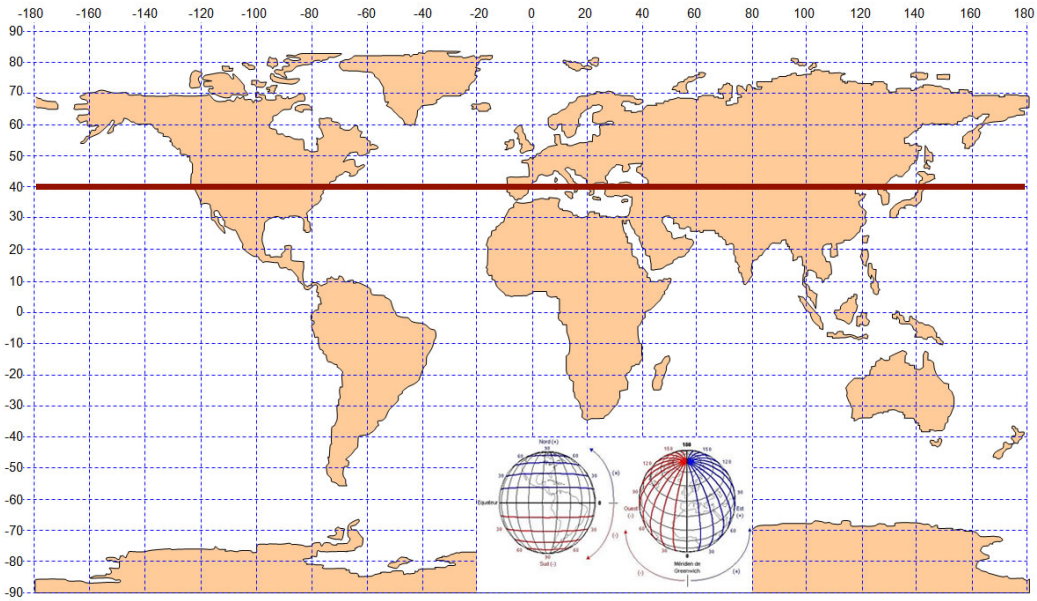


Figure 24. Carte du monde avec la limite d'étude (carte source Wikipédia)

2.2.2. Données de forçage

Le développement de la végétation boréale a nécessité l'utilisation de fichiers de forçage climatique afin de pouvoir lancer des simulations permettant de tester les différents développements, puis de regarder l'influence de l'ajout de PFTs au modèle et enfin de regarder l'impact potentiel dans le futur (à l'horizon 2100). ORCHIDEE à besoin de 8 paramètres atmosphériques avec des pas de temps de 6h (donc 4 données par jour afin de reproduire le cycle journalier), à savoir :

- La pression de surface,
- La température de l'air à 2 mètres,
- Les rayonnements incidents Short Wave (flux solaire de courtes longueurs d'ondes) et Long Wave (flux infra-rouge de longues longueurs d'ondes),
- La vitesse du vent,
- Les précipitations liquides et solides,
- Et l'humidité de l'air.

Dans cette thèse trois jeux de données de forçage ont été utilisés.

Tout d'abord le jeu de données WFDEI (Weedon et al., 2014) qui comporte des données de forçage à fine résolution (0,5°) et qui couvre la période 1979 à 2012 avec un pas de temps de trois heures. Ce forçage atmosphérique provient des données WATCH (WATer and global CHange, Weedon et al., 2011) combinées à des simulations issues de la réanalyse ERA-Interim (Dee et al., 2011) mais dont les précipitations ont été corrigées à l'aide des données du GPCC (Global Précipitation Climatology Center). Ce jeu de données a été principalement utilisé lors du développement du modèle mais n'a pas été utilisé dans les résultats présentés plus bas du fait de sa faible étendue temporelle, ne permettant pas une stabilisation de la végétation boréale (notamment des arbres).

Ensuite, il y a les données climatiques dites CRU-NCEP (version 5.3.2), qui constituent le principal forçage utilisé dans cette thèse. Il se décline en plusieurs résolutions différentes (2°, 1° et 0,5°), avec un pas de temps de 6h, sur une période de 1901 à 2013 et a été développé par le LSCE (Viovy, 2015). C'est une combinaison entre les observations mensuelles du CRU (Climatic Research Unit, Harris et al., 2014) et les simulations produites par NCEP (National Center for Environnemental Prediction, Saha et al., 2014) utilisées pour créer une variabilité à haute fréquence (6h). Le forçage CRU-NCEP a été particulièrement utilisé pendant cette thèse puisqu'il était disponible dans différentes résolutions, mais surtout parce que la période couverte est beaucoup plus importante, permettant de mieux simuler l'établissement de la végétation.

Enfin nous avons utilisé un jeu de données issu de projections climatiques futures effectuées dans le cadre du projet CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, Taylor et al., 2012) avec le modèle IPSL-CM5A-LR (Dufresne et al., 2013). Afin d'obtenir le forçage atmosphérique, les anomalies mensuelles provenant de ce modèle ont été appliquées à la climatologie de CRU-NCEP, comme présenté dans Koven et al. (2015). Deux scénarios de projection RCP (pour Representative Concentration Pathway) ont été retenus pour cette thèse : les scénarios 4.5 et 8.5 (Moss et al., 2010). Ils tiennent compte de l'évolution possible de la concentration en gaz à effet de serre pour les 100 prochaines années et correspondent au forçage radiatif supplémentaire lié à cette augmentation qui serait obtenu en 2100, à savoir ici respectivement + 4,5 $W.m^{-2}$ et + 8,5 $W.m^{-2}$ (Moss et al., 2010). Nous n'utiliserons ici que les deux forçages à une résolution de 2°.

2.2.3. Une nouvelle carte de Types Fonctionnels de Plantes (PFTs)

La première étape est d'effectuer des simulations avec une végétation fixée dans l'espace afin d'analyser l'impact sur les bilans d'eau, de carbone et d'énergie des nouveaux PFTs introduits (Chapitre 3). Ce n'est que dans un second temps que l'on s'attachera à représenter la dynamique de la végétation incluant les nouveaux PFTs (Chapitre 4). Il est donc nécessaire dans un premier temps d'obtenir une carte de végétation permettant de définir la surface respective de chacun des PFTs. Mais étant donné qu'il n'existe pas d'autre modèle considérant simultanément les plantes non vasculaires et les buissons sous forme de PFTs à l'échelle mondiale, aucune carte de référence préexistante (utilisée dans d'autres modèles) n'a pu être directement utilisée. C'est pourquoi une nouvelle carte de végétation a été compilée, synthétisant les informations contenues dans différentes cartes, telles que décrites ci-dessous.

La carte de végétation utilisée dans ORCHIDEE a été récemment mise à jour par rapport à la carte initialement utilisée provenant d'Olson et al. (2001), contenant 97 classes réparties ensuite entre les différents PFTs originaux (au nombre de 13) à l'aide d'un tableau de correspondance (appelé « cross-walking table »). La carte de végétation actuellement utilisée dans ORCHIDEE a été obtenue à partir d'une carte produite par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) à

travers son programme d'Initiative sur le Changement Climatique (CCI) (cf. http://www.esa-landcover-cci.org/). Il s'agit d'une carte de végétation dominante à très haute résolution (300 m) basée sur des observations satellites (à moyenne résolution) et classée selon 22 classes (ou LCCs pour Land Cover Classes) définies selon le Système de Classification de la Couverture terrestre par les Nations Unies (UNLCCS pour United Nations Land Cover Classification System). Une « cross-walking table » a donc été développée afin de convertir les LCCs en distribution des PFTs standards utilisés dans ORCHIDEE (Poulter et al., 2015), à savoir arbres feuillus ou épineux, décidus ou persistants. Afin de réaliser une distinction climatique des arbres (tropicaux, tempérés ou boréaux, cf. Figure 14 ②) la classification de Köppen (Peel et al., 2007) est utilisée (Poulter et al., 2015).

Afin d'intégrer la distribution spatiale des nouveaux PFTs, il a été nécessaire de créer une nouvelle « cross-walking table » et de convertir la carte produite par le projet ESA-CCI, à l'aide d'un outil disponible à l'adresse suivante : http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/. La version la plus récente de la carte CCI a été utilisée, à savoir la version 1.6.1 disponible début 2016. A partir de la « cross-walking table » standard (mise à jour actuellement par l'équipe d'ORCHIDEE), les trois nouveaux PFTs (les plantes non vasculaires, les buissons et herbacées boréales) ont été intégrés suivant trois principes distincts :

- Les herbacées C3 boréales ont été obtenues en suivant le principe appliqué aux arbres : les herbacées présentes dans la classe « climats polaires et alpins » de Köppen (classe 5 dans Peel et al., 2007) ont été désignées C3 boréales. Les autres classes (de 1 à 4) sont restées simples herbacées (C3 ou C4) pour les régions tempérées et tropicales.
- Les buissons ont été obtenus directement à partir de la « cross-walking table » standard : en effet elle comprenait initialement une distinction entre buissons et arbres qui étaient ensuite regroupés. Il a donc suffit de maintenir cette distinction (avec des changements mineurs).
- La distribution des plantes non vasculaires (NVPs pour Non-Vascular plants) a été beaucoup plus difficile à obtenir car si la carte ESA-CCI contient une LCC « Mousses et Lichens », la distribution est visiblement sous-estimée en Eurasie (où elles sont presque absentes) par rapport à l'Amérique du Nord (Figure 25) et par rapport à quelques reconstructions de la distribution de végétation dans l'Arctique disponibles. En croisant les informations de deux autres cartes des régions boréales, on remarque que les NVPs sont présentes (entre 30 et 60% de recouvrement) tout autour du globe au niveau des hautes latitudes (CAVM Mapping Team et al., 2003, CAVM pour Circumpolar Arctic Vegetation Map). Cette distribution correspond de plus à la présence de toundra telle que définie dans Loveland et al. (2000) et si l'on compare à la carte de l'ESA-CCI cette toundra correspond à l'ensemble des LCCs « mousses et lichens » et « végétation clairsemée ». Ainsi la classe LCC « végétation clairsemée » comprend une part du nouveau PFT « Plantes Non Vasculaires » que nous avons fixée autour de 45 % (juste milieu entre les 30 et 60 % précédemment évoqué).

La « cross-walking table » ainsi obtenue (présentée en ANNEXE D) permet donc d'obtenir une répartition spatiale de la végétation comprenant les anciens et les nouveaux PFTs. Au-dessus de 60°N, cela représente 16,6 % de NVPs, 12,5 % de buissons, 15,7 % d'herbacées boréales et 18 % de sol nu. La distribution obtenue pour les nouveaux PFTs ainsi que la carte de dominance sont présentées dans la Figure 26. Les plantes non vasculaires sont principalement présentes aux latitudes les plus élevées (elles représentent 19,4 % de la surface au-dessus de 65°N, pour seulement 12,5 % au-dessus de 50°N). Elles y sont donc dominantes. Les buissons sont présents un peu partout au-dessus de 50°N (où ils représentent 13,0% de la surface) mais sont peu présents au-dessus de 65°N (< 10 %). En revanche ils sont rarement dominants, du fait que la « cross-walking table » qui a été définie attribue pour la plupart des LCCs contenant des buissons une fraction plus faible aux buissons qu'aux arbres (ANNEXE D). Les herbacées C3 sont également présentes un peu partout au-dessus de 50°N (19,0 % de la surface), mais moins à partir des très hautes latitudes (12,4 % au-dessus de 65°N). Elles sont rarement dominantes car, comme pour les buissons, dans les hautes latitudes les herbacées sont principalement issues des LCCs (ANNEXE D) décrivant les forêts ou la toundra où elles ne sont pas majoritaires.

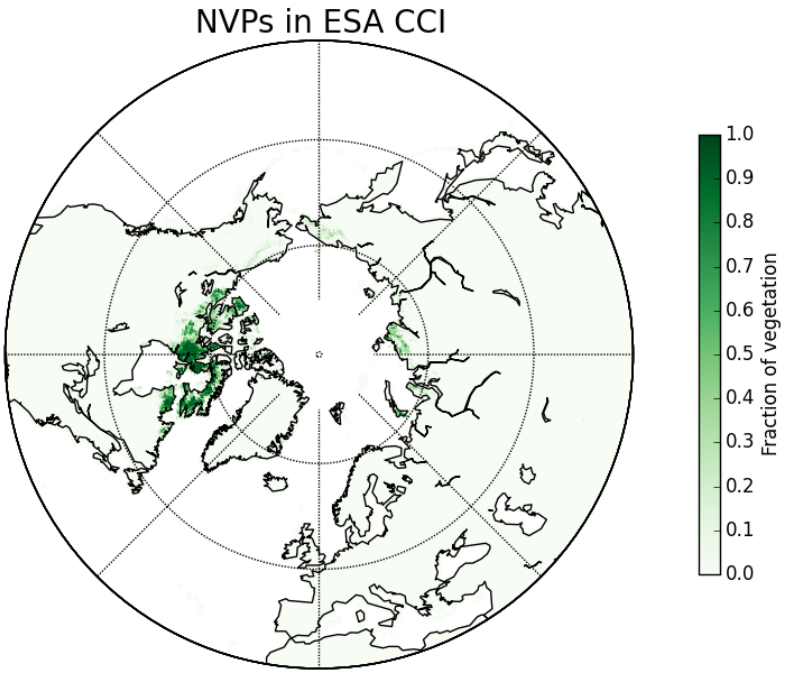


Figure 25. Distribution des mousses et des lichens présents dans la LCC correspondante, issus de carte de l'ESA CCI.

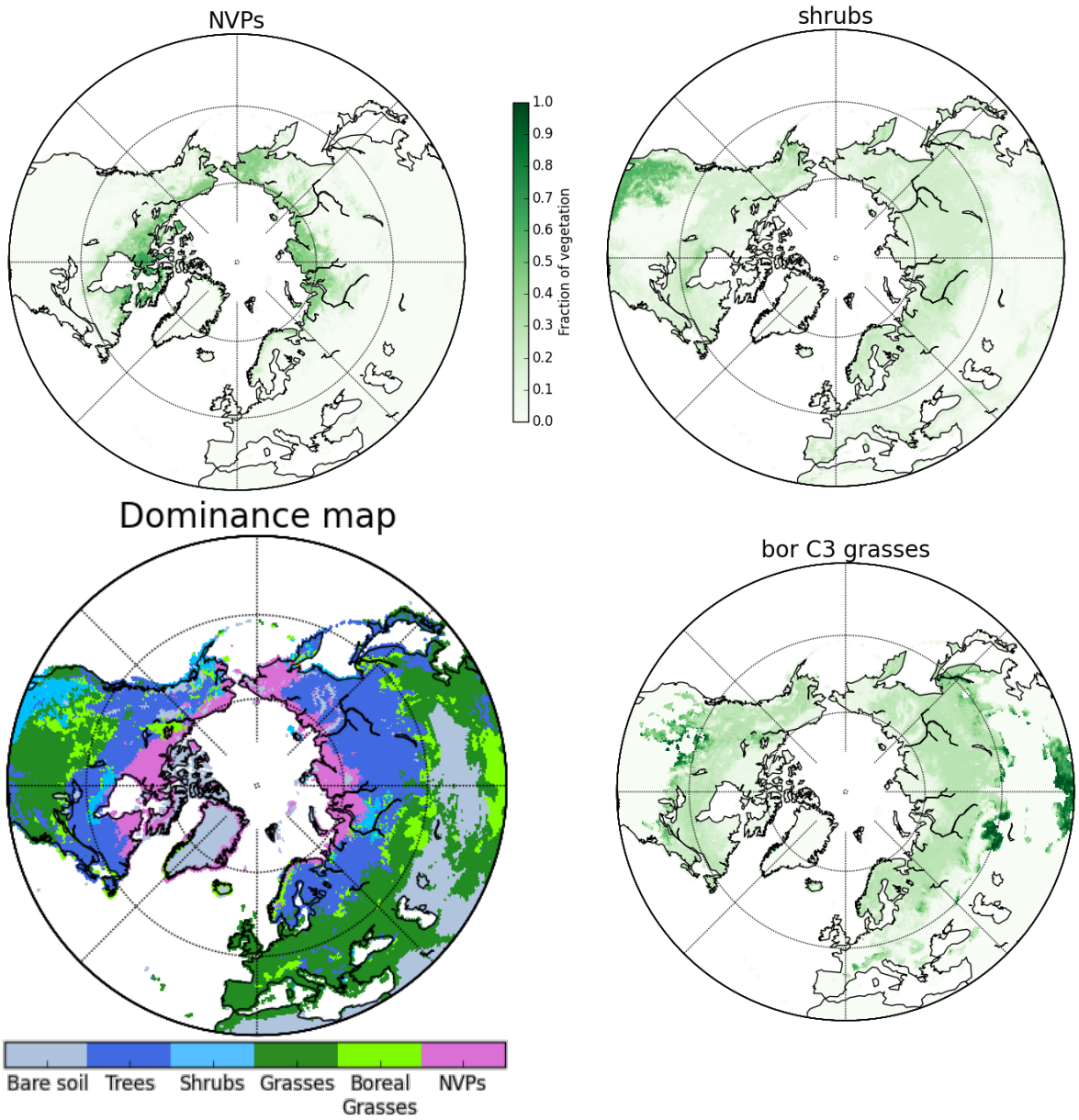


Figure 26. Distribution spatiale des nouveaux PFTs (plantes non vasculaires, buissons, herbacées C3 boréales) ainsi que la carte de dominance des PFTs, à partir de 30°N.

2.2.4. Données biogéochimiques sur les nouveaux PFTs

Afin de valider les développements et d' « étalonner » les nouveaux PFTs boréaux il était nécessaire d'obtenir des données homogènes sur ces trois PFTs et distribuées selon un gradient Nord-Sud suffisant. Il est cependant très difficile de trouver des données non ponctuelles de biomasse et de productivité des NVPs, bien que cela soit plus aisé pour les buissons. Par exemple la base de données TRY (Kattge et al., 2011) ne contenait au début de cette étude que très peu de données complètes.

Les données de productivité et de biomasse utilisées pour développer les NVPs, les buissons boréaux et les herbacées C3 boréales ont été proposées par Anna Peregon (LSCE), Natalya Kosykh et Nina Mironycheva-Tokareva (de

l'ISSA, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Russie) et proviennent d'une région située à l'ouest de la Sibérie. Cette région est particulièrement adaptée à l'obtention des données nécessaires pour le développement des nouveaux PFTs car le gradient latitudinal est important, incluant une large variété d'écosystèmes naturels et l'influence anthropique est assez faible. Ces données ont été initialement présentées pour les NVPs dans l'article de Peregon et al., (2008), sur une période allant de 1993 à 2001. Pour cette étude, nous disposions d'une base de données étendue jusqu'à 2013 et qui contient également des observations des buissons et des herbacées boréales.

Pour chaque observation, une description botanique a été effectuée, accompagnée d'un prélèvement d'échantillons de biomasse. La période d'étude s'étale chaque année de juin à octobre, dont plus de 90 % des observations entre juillet et septembre. Autant que possible, afin d'obtenir des informations sur la variabilité interannuelle, l'échantillonnage a été reconduit sur les mêmes sites plusieurs années, et ce jusqu'à 10 années consécutives. La méthode d'estimation de la productivité et de la biomasse sur le terrain et en laboratoire est décrite précisément dans Peregon et al. (2008, 2016).

La base de données contient des observations de la biomasse verte estivale ($g.m^{-2}$) et de la productivité primaire nette (NPP - $g.m^{-2}.an^{-1}$) avec les coordonnées GPS associées et un classement entre 7 zones climatiques (forêt-steppe, sud de la taïga, Sibérie centrale, taïga, nord de la taïga, forêt-toundra, toundra). Elle est cependant différenciable en deux entités distinctes. La première contient 2 209 observations de biomasse et de NPP des mousses, allant de 55°N à 71°N et de 63°E à 91°E, résumées dans le Tableau 5. Pour faciliter l'exploitation de ces données, les observations ont été regroupées selon 36 sites (un site contenant un nombre variable de mesures). La seconde contient 660 observations présentant chacune la biomasse, la productivité et la surface au sol des plantes non vasculaires (mousses et lichens), des buissons et des herbacées (ainsi que la surface du sol nu), allant de 55°N à 66°N et de 68°E à 83°E, résumées dans le Tableau 6. Ces observations on été regroupées sur 16 sites (faisant partie des 36 sites précédemment établis). Dans cette seconde base, nous n'avons gardé que les données des PFTs dont la surface foliaire dépassait 10 % de la surface étudiée, afin d'éviter des valeurs non réalistes de biomasse ou productivité par PFT. Un résumé plus précis des valeurs de biomasse et de productivité est disponible en ANNEXE C.

Tableau 5. Synthèse des données de biomasse et de productivité sur les 36 sites

Site	Données	Biomasse		Productivité (NPP)	
	Nombre	Moyenne $gC.m^{-2}$	Écart-Type $gC.m^{-2}$	Moyenne $gC.m^{-2}.an^{-1}$	Écart-Type $gC.m^{-2}.an^{-1}$
Tous	1209	217.3	104.6	117.0	61.2
Par année et par site	105	214.5	76.3	110.6	39.2
Par site	36	214.3	50.9	108.4	27.7
Par année	18	204.4	49.6	110.0	31.9
Forest-steppe	112	218.4	127.6	110.0	95.1
South Taiga	32	207.1	85.1	121.5	56.9
Central Siberia	4	177.1	54.0	144.3	44.1
Middle Taiga	318	212.3	98.4	113.2	55.0
North Taiga	475	211.0	94.2	124.0	55.3
Forest-tundra	222	242.4	122.7	114.8	59.7
Tundra	46	203.6	94.5	94.7	56.5

Tableau 6. Synthèse des données de biomasse et de productivité sur les 16 sites. Légende : biom pour biomasse (gC.m-2), NPP pour la productivité nette (gC.m-2.an-1). (10%) signifie que seule la végétation représentant au moins 10 % de la surface totale a été prise en compte.

Site	Herbacées boréales			Buissons boréaux			Plantes non vasculaires		
	Nb	biom*	NPP*	Nb	biom*	NPP*	Nb	biom*	NPP*
Tous	588	359.2 ± 353.0	215.1 ± 201.1	565	670.4 ± 825.8	172.5 ± 466.0	645	317.5 ± 196.7	108.1 ± 67.4
Tous (10%)	218	557.7 ± 427.2	321.1 ± 222.2	381	768.2 ± 432.9	165.3 ± 104.8	644	317.3 ± 196.9	108.0 ± 67.4
Par année et par site (10%)	33	669.2 ± 444.7	401.8 ± 245.8	45	834.4 ± 285.6	175.3 ± 76.8	48	339.7 ± 195.9	105.8 ± 64.0
Par site (10%)	12	594.3 ± 296.5	361.5 ± 174.9	15	848.1 ± 219.3	174.4 ± 55.7	16	297.8 ± 158.3	96.8 ± 43.1
Par année (10%)	12	621.9 ± 234.5	375.5 ± 148.1	14	814.4 ± 154.3	180.6 ± 65.6	14	316.2 ± 99.9	103.0 ± 37.3
Forest steppe (10%)	33	1314.3 ± 854.3	626.8 ± 392.0		894.7 ± 266.4	155.0 ± 69.5		320.6 ± 213.5	90.2 ± 56.1
South taiga (10%)	25	541.6 ± 382.8	249.0 ± 175.7		930.8 ± 449.5	204.9 ± 66.4		375.6 ± 153.3	90.6 ± 37.3
Middle Taiga (10%)	367	475.8 ± 218.8	297.7 ± 144.8		682.9 ± 356.4	154.2 ± 101.0		293.6 ± 134.9	112.5 ± 54.0
North Taiga (10%)	134	601.7 ± 208.5	317.1 ± 151.6		922.0 ± 463.7	202.0 ± 107.8		381.6 ± 323.2	125.9 ± 97.4
Forest tundra (10%)	101	334.3 ± 285.3	246.1 ± 225.2		858.2 ± 605.3	155.4 ± 118.6		308.3 ± 165.1	78.2 ± 64.5

En comparant les moyennes totales et en observant les écart-types associés, on constate une certaine hétérogénéité des données : la valeur de l'écart-type est de l'ordre de 50% à 90% de celle de la moyenne. Si l'on compare l'ensemble des observations (par site, par année, pour chaque année et chaque site ou enfin par zone climatique) aucune tendance ne se dessine. Cette variabilité est très probablement due aux différences spatiales au sein même d'un site : des variations importantes d'hydrologie, de température ou de disponibilité des nutriments impliquent des variations importantes de productivité (NPP) et de biomasse. A cause de la résolution d'un modèle climatique (au mieux dans

ORCHIDEE de 50 km), qui ne permet pas de représenter cette hétérogénéité, il sera donc difficile de faire coïncider précisément le modèle avec les données. Il faudra donc être attentif lors de la corrélation entre les observations et les simulations et prendre en compte la variance des observations.

2.3. La méthode

S'agissant d'une thèse de développement de modèle, il a été nécessaire de suivre une démarche précise afin de bien de vérifier la pertinence des processus devant être intégrés et la cohérence physique et informatique. De plus, afin de paramétrer ces processus, une méthode d'assimilation de données (optimisation) a été utilisée. Enfin, pour être capable de statuer sur la représentation de la nouvelle végétation implémentée et sur la significativité des différences observées entre les différentes simulations, des diagnostics mathématiques ont été utilisés.

2.3.1. Méthodologie générale

Afin de modéliser plus précisément la végétation présente aux hautes latitudes (toundras, taïgas, zones humides, etc.) il est apparu que la description initiale présente dans ORCHIDEE était limitée, ne pouvant décrire la végétation arbustive ou les tapis de mousses et lichens de type toundra très présents dans les climats polaires (CAVM Mapping Team et al., 2003). Il a donc été décidé d'ajouter de nouveaux types de végétation. Une étude bibliographique a montré d'une part que dans certains modèles les différents types de végétation boréale étaient décrits (par exemple dans BIOME4, Kaplan et al., 2003) mais aussi que les équations utilisées pour décrire ces PFTs n'étaient pas transposables en l'état dans ORCHIDEE. Il a donc été décidé de développer indépendamment trois nouveaux PFTs fondés sur les caractéristiques biologiques et écologiques des types de plantes rajoutés. Ainsi, l'introduction de plantes non vasculaires a été établie à partir d'une photosynthèse, une phénologie et un accès à l'eau bien distincts des herbacées traditionnelles, alors que les buissons ont été développés avec une nouvelle allométrie et des interactions avec l'environnement différentes des arbres (notamment vis-à-vis de la neige). Dès le début de cette thèse, l'introduction des herbacées C3 boréales se voulait plus directe, puisqu'il s'agissait seulement d'adapter les paramètres issus des herbacées C3 traditionnelles (PFT global dans la version standard d'ORCHIDEE), étant donné qu'aucun processus fondamental devant être implémenté pour les régions boréales n'a été identifié.

Dans cette approche écosystémique il a fallu toutefois rester simple dans la description de la végétation étant donné l'objectif initial d'intégrer ces développements –après validation– dans la version standard d'ORCHIDEE, schéma de surface continentale global intégré à un GCM. Le développement des nouveaux PFTs s'est donc effectué à partir de PFTs présents dans la version

standard d'ORCHIDEE et parfois, pour des questions de cohérence avec cette dernière, des simplifications de type empirique ont été effectuées (telles qu'attribuer un profil racinaire aux plantes non vasculaires afin d'accéder à l'eau présente en surface du sol, alors qu'elles ne possèdent par définition pas de racines).

De plus ce travail de développement de nouveaux PFTs s'est heurté à un manque relatif de références bibliographiques ou d'antécédent dans d'autres modèles globaux (principalement pour les plantes non vasculaires). Le principe a donc été tout d'abord de se pencher sur les processus identifiés comme clés pour la survie et la croissance de la végétation en milieu naturel, d'étudier comment dans le modèle ORCHIDEE il était possible d'intégrer de tels comportements, puis de faire un point bibliographique pour obtenir un maximum de pistes de développement tant qualitatives (les équations associées) que quantitatives (la paramétrisation de ces équations). Dans les cas où il n'existait pas ou peu d'estimation des paramètres d'équations pouvant décrire un processus dans la bibliographie, à partir des données présentées en 2.2.4 une optimisation (décrite en 2.3.2) a été effectuée afin de sélectionner les valeurs de ces paramètres.

Dans un second temps, une fois tous les développements effectués, des premiers tests ont été réalisés afin de vérifier la concordance entre les données disponibles (2.2.4), la carte de végétation (2.2.3, uniquement dans le cas de l'étude de la dynamique de végétation) et les simulations. Cette étape d'évaluation des performances du modèle a nécessité aussi une importante « chasse » aux bogues (erreurs de codage) ainsi qu'aux processus pouvant avoir été négligés. Cette étape a été particulièrement ardue car il a fallu identifier l'origine du problème, savoir s'il provenait d'un problème de la version standard, d'une erreur au sein d'un développement, d'un souci de paramétrisation d'un des nouveaux PFTs ou d'un oubli d'un processus important. Notons que dans l'ordre, c'est initialement la version hors dynamique de végétation qui a été développée, puis les processus contrôlant la dynamique de végétation (DGVM).

Afin d'observer la cohérence des développements, le comportement des nouveaux PFTs dans une simulation globale, et afin de mettre en évidence l'impact final aux hautes latitudes de l'amélioration de la description de la végétation boréale par rapport à sa représentation initiale (qui ne comprenait que les herbacées C3 globals et des arbres boréaux), un certain nombre de sorties du modèle ont été analysées. Pour prendre en compte les composantes principales d'un schéma de surface, les flux d'eau, d'énergie et de carbone ont été exploités, à savoir principalement l'évaporation et la transpiration, la température de surface et du sol, l'albédo, la biomasse totale, la productivité (i.e., assimilation de carbone), le LAI et enfin la surface de végétation (avec DGVM uniquement). De plus, plusieurs types de graphiques et cartes on été utilisés :

- Des « scatter plots » ou diagrammes de dispersion, soit des graphiques mettant en correspondance les données issues des observations et les valeurs issues des simulations. Ils permettent de juger de l'accord moyen entre les données et les simulations. Notons que la variance des

observations utilisées est importante, une caractéristique particulière à prendre en compte dans la lecture des diagrammes.

- Des transects Nord-Sud au niveau de 3 régions distinctes : en Amérique du Nord (-100°E, ±2°), en Europe (25°E, ±2°) et en Asie (80°E, ±2°), visibles sur la Figure 27. Ils permettent d'observer le long d'un gradient Nord-Sud le comportement de la végétation

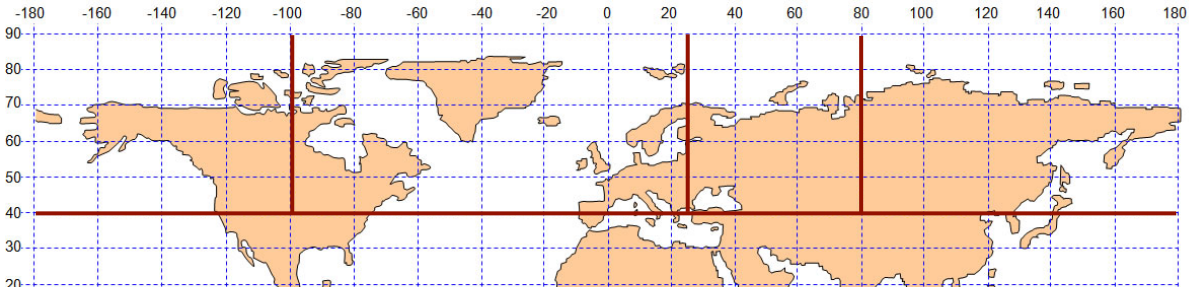


Figure 27. Carte du monde avec les trois transects (carte source Wikipédia).

- Des séries chronologiques entre 1901 et 2013 (et de 2014 à 2100 avec le DGVM) permettant de regarder l'évolution de la végétation et des impacts relatifs, ainsi que l'évolution de la végétation avec le DGVM. Elles sont particulièrement intéressantes pour observer l'impact d'un changement climatique.
- Des cartes de l'ensemble de la zone d'étude (située au-delà du 40ième parallèle), obtenues sur une moyenne des dix dernières années étudiées. Elles peuvent soit montrer la distribution géographique d'une variable (telle que l'albédo) soit permettre une comparaison entre des simulations différentes ou entre une simulation et d'autres estimations indépendantes.

Les simulations présentées dans cette thèse ont été effectuées avec une résolution de 2°, bien que lors du développement et de l'optimisation (section 2.3.2) une résolution allant jusqu'à 0,5° a également été utilisée. Elles se répartissent en deux parties distinctes : les simulations hors DGVM et les simulations avec DGVM. Hors DGVM, un spinup (simulation longue prenant aléatoirement le forçage dans un nombre restreint d'années, permettant d'atteindre un état d'équilibre sur des variables non initialisées, comme par exemple le carbone contenue dans la végétation ou dans le sol) sur les années 1901 à 1950 pendant 5 mille ans a été construit, à partir duquel une simulation de 113 ans (de 1901 à 2013) a été réalisée, notée « ORC2.0 ». Avec le DGVM, un spinup de mille ans (sur les années 1901 à 1950) a été réalisé, suivi d'une simulation entre 1901 et 2013, notée « DGVM ». A partir du résultat de cette simulation, des simulations futures ont été réalisées sur la période allant de 2014 à 2100 et suivant les deux scénarios climatiques RCPs 4.5 et 8.5, notées respectivement « DGVM4.5 » et « DGVM8.5 ». Chacune de ces configurations a été effectuée avec deux descriptions différentes de la végétation, à savoir la version standard des PFTs (« 13 PFTs », liste présentée dans la Figure 14), notée (en référence au nombre de PFTs présents), et la version standard à laquelle on a ajouté les trois nouveaux PFTs boréaux (« 16 PFTs »).

De plus, afin de comparer la version d'ORCHIDEE obtenue dans cette thèse avec la version initialement utilisée, deux autres configurations ont été utilisées dans la section 3.2, avec un forçage climatique CRU-NCEP de 1901 à 2013, un spinup court ramené à 150 ans (nous ne nous intéressons pas ici à la quantité de carbone contenue dans le sol, qui nécessite un spinup plus long) et une résolution de 2°. La première configuration contient uniquement les 13 PFTs standards dans une version d'ORCHIDEE très proche de l'originale utilisée pour cette thèse, notée « ORI ». La seconde configuration a été établie avec les 13 PFTs standards mais dans une version où un certain nombre d'améliorations ont été implémentées (résolution de « bogues », mise à jour d'équations) et où de nouveaux processus dans le sol qui interviennent indépendamment de la description de la végétation ont été implémentés (la discrétisation verticale de la litière, la fonction de contrôle de l'humidité et l'intégration des NVPs –si il y en a– dans la thermique du sol, cf Chapitre 3), notée « ORC ».

Le Tableau 7 synthétise l'ensemble des simulations présentées dans cette thèse, leur configuration, en indiquant un nom générique. Les données de forçage climatique utilisées sont définies dans la section 2.2.2.

Tableau 7. Description des 6 ensembles de simulations effectuées. ORI et ORC présentent chacune une unique simulation « 13 PFTs » alors que « ORC2.0 » et les DGVM présentent une simulation « 13PFTs » ainsi qu'une simulation « 16 PFTs ». *Pour le forçage, cf section 2.2.2. **fichiers de forçage issus de IPSL-CM5A-LR.

Nom	DGVM	Spinup	Simulation	Résolution	Forçage*
ORI	Non	150 ans	1901-2013	2°	CRU-NCEP
ORC	Non	150 ans	1901-2013	2°	CRU-NCEP
ORC2.0	Non	5000 ans	1901-2013	2°	CRU-NCEP
DGVM	Oui	1000 ans	1901-2013	2°	CRU-NCEP
DGVM4.5	Oui	DGVM	2014-2100	2°	RCP45**
DGVM8.5	Oui	DGVM	2014-2100	2°	RCP85**

2.3.2. L'optimisation

Dans cette thèse de nombreux processus ont été implémentés afin de mieux représenter la végétation boréale. Bien que nous ayons au maximum essayé d'intégrer des données issues de la bibliographie, il a été souvent difficile d'« étalonner » les paramètres utilisés dans les équations décrivant ces processus. Par exemple, comment choisir la vitesse de carboxylation maximale (Vc_{max}, cf. section 2.1.4.1) sachant qu'elle est très dépendante de chacune des espèces considérées dans un PFT et également du modèle étudié, comme on peut le constater dans Rogers (2014). Afin d'être capable de paramétrer les équations implémentées dans le modèle, nous avons utilisé dans cette thèse un outil d'optimisation bayésienne sur une sélection de paramètres. En quelques mots, il permet de lancer successivement de nombreuses simulations tests en faisant varier les paramètres choisis dans une gamme de variation prescrite, puis de comparer les résultats obtenus avec les données disponibles (dans notre cas la biomasse totale en été et la productivité nette annuelle, présentées en 2.2.4) et ce afin de sélectionner le meilleur jeu de paramètres. L'optimisation intègre de plus

les erreurs associées aux observations, au modèle ainsi qu'aux paramètres à estimer.

Plus spécifiquement, lors de cette comparaison nous avons estimé que les erreurs associées aux paramètres (matrice notée B) ainsi qu'au modèle et aux observations (matrice notée R) sont toutes indépendantes et suivent une loi Gaussienne. Ainsi une fonction de coût J(**x**) est définie (Équation 31 d'après Tarantola, 1987), représentant l'écart entre le résultat des simulations et les observations ainsi que l'écart entre les paramètres optimisés et une connaissance a priori sur ces paramètres (terme Bayesien).

Équation 31 $$J(x) = \frac{1}{2}\left[(H(x)-y)^T \mathbf{R}^{-1} (H(x)-y) + (x-x_b)^T \mathbf{B}^{-1} (x-x_b)\right]$$

Avec J(**x**) la fonction de coût à minimiser, **y** les observations, **H**(**x**) les résultats des simulations, $\mathbf{x}_b$ la valeur initiale du paramètre (prior), **x** sa valeur optimisée. **R** représente la matrice de covariance (ou de variance) associée aux observations (comprenant le forçage climatique et la structure du modèle), **B** représente la matrice de variance (ou covariance) associée aux valeurs initiales attribuées aux paramètres.

Notons que comme les erreurs associées aux modèles sont parfois plus importantes que les erreurs des observations, **R** est définie comme étant une matrice diagonale (dû à l'indépendance des observations) avec pour valeur la moyenne au carré entre la première simulation (avec la valeur initiale des paramètres) et les observations (comme dans Kuppel et al., 2013).

L'objectif est donc de minimiser cette fonction de coût afin d'obtenir l'ensemble des paramètres optimaux. Afin de trouver le vecteur de paramètre optimal minimisant J(**x**) on a utilisé une approche de type Monte-Carlo fondée sur un algorithme génétique (GA), décrite dans Santaren et al. (2014). Le principe est de considérer un vecteur de paramètres comme un chromosome ayant pour ensemble de gènes les paramètres. Il s'agit d'un algorithme itératif, qui définit initialement un ensemble de vecteurs (chromosomes) dont les paramètres (gènes) diffèrent suivant une variation aléatoire. A chaque itération (génération) une variation aléatoire et un échange des paramètres (gènes) entre les vecteurs (chromosomes) sont définies. La sélection « génétique » repose alors sur une minimisation de la fonction de coût. Il faut noter qu'ici nous n'avons pas utilisé un algorithme fondé sur la minimisation directe du gradient de J(x) compte tenu du risque de tomber dans un minimum local du fait de la non linéarité des processus engagés. L'intérêt du GA par comparaison à une approche de type gradient est discuté dans Bastrikov et al. (in preparation). Pour une description plus précise (en anglais) sur cette méthode d'optimisation d'ORCHIDEE (nommée ORCHIDAS pour Data Assimilation System), reportez-vous à la page internet : https://orchidas.lsce.ipsl.fr.

Le choix des paramètres optimisés pour chacun des nouveaux PFTs dépend principalement de trois critères:

- L'importance du paramètre pour la simulation des flux de carbone et d'eau ou pour le bilan d'énergie,
- la différence pressentie avec le paramètre du PFT d'origine (i.e. le Vc_{max}), combinée à une faible connaissance du paramètre (i.e. une incertitude associée forte pour le nouveau PFT),
- l'ajout d'un processus pour lequel a été identifié un (des) paramètre(s) clé(s) mal connu(s).

Pour chacun des paramètres et afin d'obtenir la valeur optimisée (POST), une valeur initiale (prior), minimum (min) et maximum (max) ont dû être définies. Quand cela a été possible ces valeurs ont été définies suivant les valeurs du PFT d'origine ou suivant les valeurs indiquées dans la littérature. La liste des paramètres initiaux et optimisés, classés par PFT est disponible dans le Tableau 8. Une unique optimisation a été effectuée pour chacun des PFTs, comprenant donc simultanément 6 à 12 paramètres.

Enfin, l'intégralité des simulations effectuées lors de ces optimisations a été réalisée avec le forçage CRU-NCEP (cf section 2.2.2), à une résolution de 0,5°, pour chacun des sites avec des observations exploitables (jusqu'à 36, cf section 2.2.4) et avec au minimum 10 années de simulation (19 pour les buissons) avant la première comparaison observations – simulation afin de garantir une mise à l'équilibre de la biomasse aérienne et la productivité associée. La durée de la simulation avant comparaison a été fixée suivant des critères de temps de simulation et du temps nécessaire avant d'atteindre l'équilibre pour les variables considérées (les buissons accumulent de la biomasse au niveau des branches ce qui augmente le temps pour atteindre cet équilibre). Notons que pour le GA, le nombre de vecteurs (jeux de paramètres) considérés (la population) a pu atteindre 20 et que le nombre d'itérations (génération) a pu atteindre 40 totalisant donc 800 simulations. Chaque simulation comprend un découpage par site sur au moins 10 ans, donc jusqu'à 400 000 années simulées pour une unique optimisation (en moyenne 150 000).

J'ai utilisé les résultats de l'optimisation pour réaliser toutes les simulations globales. Notons que bien que la procédure d'optimisation permette aussi d'estimer les erreurs a posteriori sur les paramètres, je n'ai pas analysé cette information en détail durant cette thèse. Cette procédure m'a également permis qualitativement de mettre le doigt sur des bogues du modèle, comme une modification du stress hydrique lors de l'activation d'un processus sans rapport évident.

Tableau 8. Description des paramètres optimisés, de leur valeur initiale (prior), minimale (min), maximale (max) et de la valeur obtenue (POST). La valeur de la fonction de coût est également incluse de façon indicative.

Nom complet (unités)	Symbole	prior	min	max	POST
Plantes Non Vasculaires		(coût J(x) : avant 40 880, après 28 240 (-31%))			
Conductance stomatique lorsque l'irradiance est nulle (Cmol.m^{-2}.s^{-1}.bar^{-1})	g_0	0.103	0.006	0.2	0.052
Facteur empirique de la conductance (-)	b1	0.35	0.15	0.45	0.41
Sénescence : âge des feuilles critique (jours)		455	180	730	470
Perte de biomasse maximale (jours^{-1})	l_{max}	0.015	0.005	0.025	0.0050
LAI seuil avant turnover	LAI_{lim}	2.5	2.3	2.7	2.4
Coefficient lié au LAI_{lim} (-)	l_{coef}	0.007	0.0025	0.02	0.014
Constante du profil racinaire (-)	r_p	40	10	70	18
Constante de dessiccation minimale (-)	d_{off}	0.3	0.01	0.6	0.55
LAI maximal (m^2.m^{-2})	LAImax	3	2	4	3.06
Vitesse de carboxylation maximale à 25°C (µmol.m^{-2}.s^{-1})	$Vc_{max(25)}$	30	20	40	28
Surface foliaire spécifique (m^2.gC^{-1})	SLA	0.017	0.004	0.03	0.0084
Respiration de maintenance à 0°C (gC.gC^{-1}.jour^{-1})	f_{m_rest}	0.0018	0.001	0.0026	0.0026
Buissons boréaux		(coût J(x) : avant 523 100, après 190 900 (-64%))			
Hauteur maximale (m)	H_{max}	3	2.5	3.5	3.5
Surface foliaire spécifique (m^2.gC^{-1})	SLA	0.02	0.012	0.028	0.027
LAI maximal (m^2.m^{-2})	LAI_{max}	3.5	2.5	4.5	2.5
Vitesse de carboxylation maximale à 25°C (µmol.m^{-2}.s^{-1})	$Vc_{max(25)}$	45	30	60	38
Temps de résidence (années)		30	10	50	32
Fraction de GPP perdu pour la respiration de croissance (-)	f_{g_resp}	0.45	0.3	0.6	0.59
Herbacées C3 boréales		(coût J(x) : avant 132 400, après 61 460 (-54%)			
Vitesse de carboxylation maximale à 25°C (µmol.m^{-2}.s^{-1})	$Vc_{max(25)}$	50	30	70	40
Vc_{max} : énergie de désactivation (J.mol^{-1}) *	E_d	195000	190000	200000	200000
Vc_{max} : constante du facteur entropique (J.mol^{-1}.K^{-1}.°C^{-1}) *	b	-0.54	0	-1.08	0
Vitesse de transfert d'électron					
Vj_{max} : énergie de désactivation (J.mol^{-1}) *	E_d	195000	190000	200000	200000
Vj_{max} : constante du facteur entropique (J.mol^{-1}.K^{-1}.°C^{-1}) *	b	-0.38	0	-0.76	0
Constante du profil racinaire (-)	r_p	7	4	10	5.6
Surface foliaire spécifique (m^2.gC^{-1})	SLA	0.023	0.02	0.026	0.022

* Pour les herbacées C3 boréales, les valeurs des paramètres E_d et b sont directement liées entre les Vc_{max} et Vj_{max} par une équation.

2.3.3. Outils mathématiques utilisés

Les résultats, ou variables simulées par le modèle (« outputs », par exemple température, l'évaporation ou la surface foliaire) comprennent au minimum trois dimensions : la longitude, la latitude et la date. A cela, il faut parfois ajouter une

discrétisation par couches ou catégories : par type de végétation (PFT), couche de sol, colonne d'eau, etc. cf. 2.1.3. Dans cette thèse, l'analyse de ces variables repose principalement sur des cartes pour les zones boréales, des séries temporelles pour des régions clés et des transects Nord-Sud (cf. section 2.3.1). Pour mettre en lumière les différences induites par les configurations des simulations de nombreuses cartes de comparaison ont été produites. Afin de les qualifier trois méthodes ont été utilisées.

2.3.3.1. Le test de Student

Dans la majorité des cas l'objectif est de comparer deux variables, initialement, ou pouvant être ramenées, à trois dimensions (latitude, longitude et date) puis à deux avec une moyenne sur les 10 dernières années simulées. Afin de définir pour chacun des points de la carte si la différence observée est significative ou non, une comparaison des deux moyennes a été effectuée. Bien que le test de Wilcoxon semble adapté avec peu d'années considérées (n=10), j'ai préféré le test de Student, plus simple à mettre en œuvre et plus utilisé dans le domaine des sciences du climat. Le principe est de vérifier pour chaque point la véracité de l'hypothèse H_0, selon laquelle les deux moyennes sont identiques. Soit on rejette cette hypothèse (avec une probabilité de se tromper choisie généralement supérieur à p_{value}=5%) et dans ce cas on peut conclure que la différence est significative, soit on ne la rejette pas (sans pour autant pouvoir conclure sur la similitude des moyennes).

Afin de pouvoir appliquer le test de Student, on suppose que la moyenne des sorties des modèles (et des observations dans le cas échéant) suit une distribution normale. Pour les variables étudiées cette hypothèse est vraisemblable (théorème central limite) lorsque n est suffisamment grand. Néanmoins il serait intéressant de vérifier et de tester la sensibilité à n, en utilisant des valeurs plus importantes de n, sachant que n=30 est régulièrement utilisé.

Ensuite, on choisit un échantillon de taille fixée de chaque population (simulation), dans cette thèse un échantillon de taille n=10 (ans), dont l'on suppose la moyenne normalement distribuée. On calcule la valeur de cette moyenne ainsi que l'écart-type. Il est alors possible d'obtenir la valeur de la statistique de Student, « t », afin de tester si les moyennes des deux populations sont différentes (Équation 32).

Équation 32

$$t = \frac{\overline{x}_1 - \overline{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Avec $\overline{x}_i$ les moyennes des deux populations (i = 1 ou 2), s_i les écart-types de ces populations et n_i les effectifs (ici n_1=n_2=10).

t suit une loi de Student de (n_1-1 + n_2-1 =) 18 degrés de liberté. Afin de définir si la différence des deux moyennes est significative il ne reste plus qu'à tester l'hypothèse H_0 en utilisant une table des valeurs de la distribution de la loi de Student : dans le cas où la valeur de la statistique est supérieure au quantile

(fixé souvent à 95%) on rejette H_0, la différence entre les moyennes étant alors significative. Dans notre cas il s'agit d'un test bilatéral, étant donné que l'on s'intéresse à la différence entre les moyennes de deux simulations sans importance du sens (c'est-à-dire de quelle moyenne est supérieure) ; on utilise donc la valeur absolue de t, par rapport à la valeur du quantile supérieur à 97,5 %. Avec 18 degrés de liberté et un quantile de 97,5%, la table des valeurs de distribution de la loi de Student nous donne une valeur de 2,101. Donc si la valeur absolue de t excède 2,101 alors on rejette l'hypothèse H_0, les deux moyennes $\overline{x}_i$ sont donc significativement différentes.

Dans la plupart des cas j'ai donc choisi de masquer, dans les cartes décrivant la différence entre deux variables, les valeurs pour lesquelles les différences ne sont pas significatives.

2.3.3.2. La « Distance Euclidienne par proximité »

Dans certains cas, il n'est pas possible d'obtenir pour une variable contenant plusieurs catégories une représentation simplifiée (i.e. une carte) sans perdre une part importante des informations. C'est le cas pour les recouvrements de végétation, où une unique carte contenant la fraction de maille recouverte par chacun des 13 PFTs ou des 16 PFTs serait rapidement illisible. Afin de représenter la dispersion de la végétation deux types de carte ont été développés : des cartes de dominance de végétation où les PFTs ont été regroupés par groupes (arbres, herbacées, buissons, plantes non vasculaires et C3 boréales) ou bien des « cartes de couleurs » (ou « color-map ») où la végétation est regroupée par strate (arborescente, herbacée et arbustive). Dans ce dernier cas chaque strate est représentée par une couleur RGB (Rouge Vert Bleu) avec une teinte issue du mélange de chaque couleur représentant les fractions respectives. Pour autant, il n'est pas possible d'entrevoir les différences au sein d'une même strate (ou groupe) et il est parfois difficile de distinguer quantitativement les différences entre des strates (ou groupes). Afin de comparer les distribution des PFTs (uniquement dans le Chapitre 4) et simplifier l'exploitation des « cartes de couleurs », des cartes de distance Euclidienne « par proximité » ont été développées. Il s'agit d'établir des cartes de différences entre l'ensemble des PFTs (la distance Euclidienne), via une approche permettant non pas de comparer « cellule par cellule » deux cartes (méthode classique), mais « une cellule et ses voisines » sur une carte avec la « cellule correspondante ainsi que ses voisines » sur une seconde carte.

La mesure de la diversité entre deux cellules (D_{cc}), définie comme la distance Euclidienne entre les PFTs, a été développée en suivant une méthode préexistante (Legendre et al., 2005; Poulter et al., 2011; Ottlé et al., 2013; Zhu et al., 2015). Il s'agit sur chacune des cellules de la grille de calculer la différence des fractions de couverture des PFTs deux à deux puis de prendre la racine carrée de la somme de ces différences au carré. Afin d'obtenir une valeur normalisée dans l'intervalle [0,1], la formulation finale de cette distance est présentée dans l'Équation 33. Une valeur nulle indique une végétation strictement identique alors qu'une valeur égale à 1 indique une végétation distincte (dominée par deux PFTs différents). On obtient donc pour chacune des cellules de la carte une valeur de la distance Euclidienne.

Équation 33 $$D_{cc} = \sqrt[2]{\frac{\sum_{k=1}^{n}\left(v_{c,a,k}-v_{c,b,k}\right)^2}{2}}$$

Avec $v_{c,a,k}$ et $v_{c,b,k}$ la valeur moyenne de la couverture maximale du PFT k de la cellule c pour les simulations a et b respectivement, n étant le nombre total de PFT.

Dans un second temps, et afin de répondre à la problématique soulevée dans les premiers mois de la thèse, à savoir pourquoi dans les représentations des différences spatiales il n'est pas possible de distinguer les cas où il y une différence localisée (par exemple lors d'une migration d'un PFT) par rapport à une différence marquée (par exemple lors de l'apparition d'un PFT au milieu de nulle part), une approche « par proximité » a été développée. Celle-ci est illustrée sur la Figure 28, représentant une distribution de deux PFTs (le sol nu et un PFT lambda). Graphiquement, cette approche implique de pouvoir distinguer dans le calcul de la distance Euclidienne les cas 1 et 2. Dans les « cartes » A et B, seul le PFT lambda est représenté, en blanc pour une fraction nulle et en noir pour une fraction égale à 1. Le sol nu comporte des fractions opposées (car la somme des fractions est égale à un). Dans le cas 1, le PFT est présent au niveau des extrémités opposées suivant la simulation A et B. Dans le cas 2, la situation est similaire sauf que les cellules où le PFT est présent sont proches. La carte présentant la distance Euclidienne entre deux points (notée D_{cc}), représente une valeur nulle en blanc et une valeur maximale (=1) en noir. Elle indique dans les deux cas une distance Euclidienne maximale lorsque le PFT est présent, n'ayant pas d'équivalent dans la seconde carte. Le principe de la distance Euclidienne « par proximité », notée D_{Fuzzy}, est de prendre en compte, dans le cas où une cellule voisine (c*) dans la carte B présente une distribution des PFTs proche de la cellule « centrale » (c) de la carte A, la distance Euclidienne de cette cellule voisine ($D_{cc'}$) pondérée par la distance séparant les deux cellules (d). Ainsi dans la Figure 28, si dans le cas 1 D_{Fuzzy} (ou D_f) est identique à D_{cc}, dans le cas 2 D_{Fuzzy} est inférieure à D_{cc}. Cet outil permet donc de différencier deux cas de figure : une modification profonde de la végétation (disparition ou apparition d'un PFT) (cas 1), ou un déplacement, une réduction ou une extension de l'aire de répartition d'un PFT (cas 2).

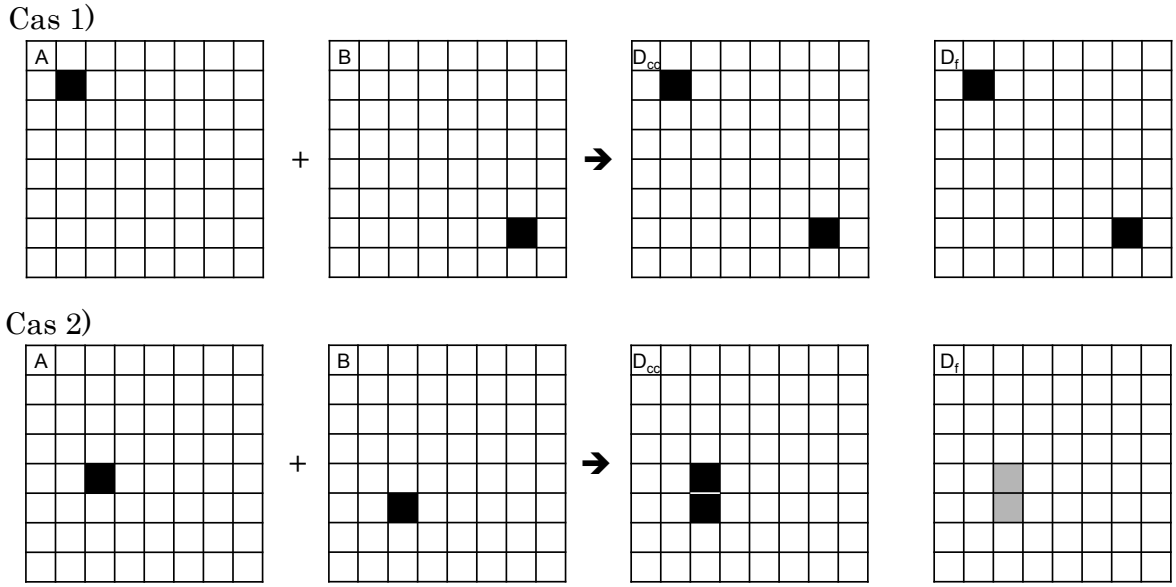


Figure 28. Présentation du principe de distance Euclidienne par proximité (D_{Fuzzy} ou D_f) par rapport à la distance Euclidienne standard (D_{cc}) selon deux cas 1 et 2. Dans les cartes A et B la fraction de végétation d'un unique PFT est représentée. Les valeurs nulles sont représentées en blanc, les valeurs égales à 1 en noir et les valeurs intermédiaires en gris.

Afin de calculer la valeur de la distance Euclidienne par proximité (D_{Fuzzy}), j'ai ici transposé une méthode décrite par Hagen (2003) et utilisée pour la comparaison de classes (et précisément l'étude du coefficient statistique Kappa, présentée succinctement à la fin de cette section). Dans un premier temps, l'objectif est d'obtenir D_{Fuzzy} entre les deux cellules (c) présentes aux mêmes coordonnées sur les deux cartes :

- La première étape est de calculer entre ces deux cellules (c) la distance Euclidienne standard D_{cc} suivant l'Équation 33. On calcule de la même manière les valeurs de la distance Euclidienne (notées D_{cc*}) entre la cellule c de la première carte (notée A) et chacune des cellules voisines (c*) de la seconde carte (notée B), et inversement (D_{c*c}) entre la cellule c de la carte B et toutes les cellules voisines c* de la carte A.
- La seconde étape est d'attribuer des valeurs aux distances (d) séparant la cellule « c » étudiée et chacune des cellules voisines c* étudiées, notées d_{c*}. Pour cela plusieurs fonctions peuvent être utilisées (Hagen, 2003; Visser and de Nijs, 2006) et dans cette étude il a été décidé d'utiliser une formulation courante, définie dans l'Équation 34, basée sur la distance réelle (d) et un distance de référence. Les valeurs de d_{c*} sont donc comprises entre 0 et 1, et sont décroissantes avec la distances entre c et c*.

Équation 34 $$d_{c*} = \frac{1}{1+\left(d/d_{ref}\right)^2}$$

Avec d la distance entre la cellule centrale c et la cellule voisine c*, et d_{ref} la distance de référence fixée dans notre cas à 1.5. Les distances sont exprimées en nombre de cellules, avec au maximum d = 3.

- La dernière étape est de sélectionner la valeur de la distance Euclidienne D_{Fuzzy}. Pour cela on sélectionne la plus grande valeur de « distance totale », c'est-à-dire la distance Euclidienne D_{cc} et D_{cc*} ou D_{c*c} pondérée par la valeur de la distance d_{c*} de chacune de ses voisines, notée D^*_{cc*}. Notez que cette pondération s'effectue sur (1-D_{cc}), comme indiqué dans l'Équation 35, afin de diminuer la valeur de la distance Euclidienne proportionnellement à la distance d_{c*}.

Équation 35

$$D_{Fuzzy} = \min(D_{cc}, D^*_{cc*}, D^*_{c*c})$$
$$\text{avec } D^*_{cc*} = (1 - d_{c^*}.(1 - D_{cc*})$$

Cette méthode est ensuite utilisée pour l'ensemble des cellules de la grille afin d'obtenir une carte de D_{Fuzzy}.

Ainsi D_{Fuzzy} reste une distance Euclidienne, mais prenant en compte la répartition et les similitudes spatiales de la végétation. La Figure 29 montre un exemple (à partir de deux distributions de PFTs simulées) d'une distance Euclidienne standard (a) et d'un distance Euclidienne « par proximité » (b), en prenant en compte au maximum une distance entre cellules d=3 (ce qui représente jusqu'à 28 cellules c*). Tout d'abord, on remarque que le message global fourni par ces deux cartes est assez proche. Cependant on remarque que des distances Euclidiennes (a) importantes (en rouge foncé) présentes notamment au niveau du Groenland et des pays scandinaves sont beaucoup plus faibles dans la carte (b), indiquant qu'il y a eu au niveau de ces régions un déplacement local de la végétation entre les deux simulations. Alors qu'au niveau de l'Europe de l'Est, les distances Euclidiennes sont importantes dans les deux cartes, indiquant une apparition ou disparition d'un ou de plusieurs PFTs. La carte des fractions de végétations (non présentée ici) permet d'observer que dans le premier cas on a bien une croissance des aires de répartition des herbacées et NVPs au Groenland, et des arbres dans les pays Scandinaves, alors qu'on a une disparition importante des arbres en Europe de l'Est.

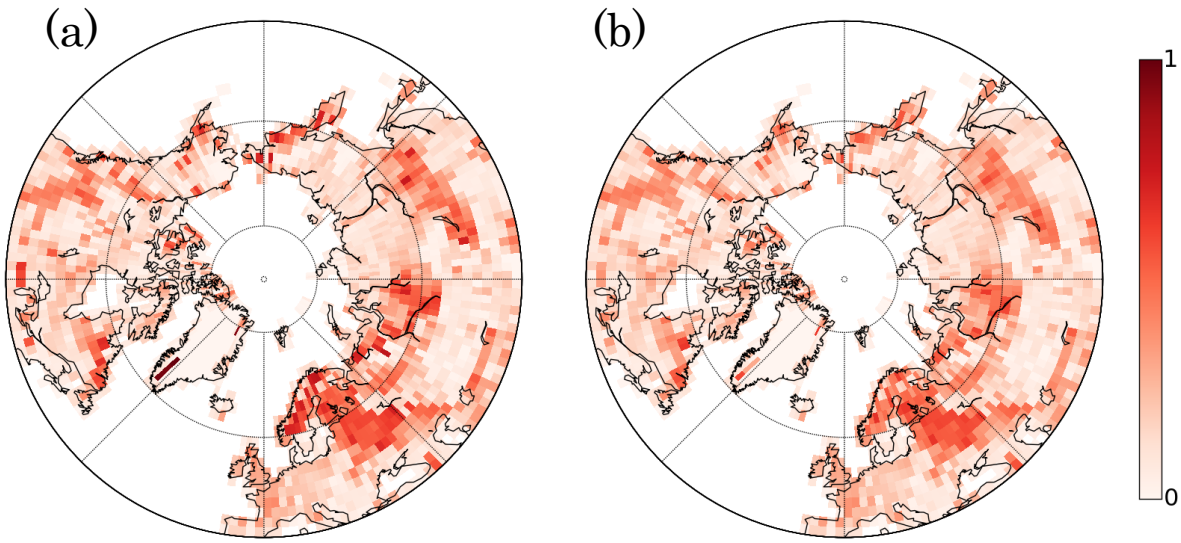


Figure 29. Distance Euclidienne entre deux simulations (avec la nouvelle version de la végétation boréale, entre la simulation future avec le RCP 8.5 et la simulation de l'époque actuelle). (a) distance Euclidienne standard, (b) distance Euclidienne par proximité.

Comme indiqué précédemment, le développement de cet outil s'est grandement inspiré de la méthode présentée par Hagen (2003), bien qu'elle ait été développée pour comparer des classes. Deux aspects n'ont pas été sélectionnés et utilisés dans cette thèse, malgré les tentatives pour les intégrer. Voici leur présentation succincte.

Dans la méthode initiale, Hagen (2003) propose d'établir en plus d'un ajustement par rapport aux cellules limitrophes un ajustement par rapport à la proximité spatiale de deux classes différentes. En d'autres termes, cela signifie que dans le cas où trois classes « blanc », « noir » et « gris » sont considérées, des notes intermédiaires sont attribuées si le gris prend la place du blanc ou du noir, alors qu'une note nulle est appliquée si du blanc est présent à la place du gris. Dans l'étude des PFTs, cela reviendrait à dire que lorsque qu'il y a une substitution d'un type d'arbre par un autre, la distance Euclidienne devrait être plus faible que si on a une substitution d'un arbre par une herbacée. La difficulté de cette approche est qu'il faudrait définir à l'intérieur même du calcul des différences de recouvrement d'un même PFT (issues de deux simulations différentes) une information prenant en compte « par quel type de PFT les changements observés sont compensés », ce qui entraine une complexification substantielle. Une méthode alternative prenant en compte la distance Euclidienne entre, non pas la dispersion des PFTs, mais les différentes strates ou groupes de PFTs a été envisagée, mais l'information était redondante avec l'information fournie par la « carte de couleurs RGB » présentée initialement.

Ensuite, une fois la différence de classes obtenue (correspondant dans notre cas à la distance Euclidienne D_{Fuzzy}), une approche du coefficient Kappa est calculée dans Hagen (2003). Il s'agit d'une évaluation statistique moyenne de la différence entre deux cartes, et donc de la comparaison de cette différence obtenue à l'échelle de la carte avec celle qui aurait été obtenue lors de la comparaison de deux cartes ayant des valeurs aléatoires. Cette méthode (particulièrement utilisée dans l'étude de tout type de cartes, notamment issu de la télédétection) a été développée initialement par Monserud and Leemans (1992), comme représenté dans l'Équation 36.

Équation 36 $$\widehat{k} = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e}$$

Avec p_o la proportion de cellule en accord (même classes dans les deux cartes) et p_e cette proportion attendue par chance (si la distribution des classes est aléatoire).

Avec la distance Euclidienne (D_{cc}), il est possible de calculer une valeur approchée de p_o par la moyenne des similitudes $\frac{\sum_{cc}^{N}(1-D_{cc})}{N}$ (avec N le nombre de cellules). Par contre il est nécessaire de calculer la valeur de p_e. Pour cela il faut calculer la valeur de la distance Euclidienne attendue pour une distribution aléatoire des PFTs (tout d'abord dans le cas standard puis « par proximité »). Dans les deux cas, la difficulté est de calculer la valeur de $\sum_{k=1}^{n}\left(v_{c,a,k} - v_{c,b,k}\right)^2$ dans le cas d'une distribution pour chacun des PFTs non uniforme, ne suivant pas de loi simple identifiée et respectant l'égalité $\sum_{k=1}^{n} v_{c,a,k} = 1$. Au vu des contraintes il a été décidé de ne pas aller plus loin dans l'obtention d'une valeur

similaire du Kappa. Notons que d'autres coefficients statistiques existent également, tels que présentés dans Foody (2004).

2.3.3.3. La biomisation

Afin d'avoir une vision globale de la végétation, l'utilisation de cartes de PFTs peut s'avérer limitée. De plus, afin de pouvoir comparer les végétations simulées, les observations disponibles sont la plupart du temps définies sous forme de biomes, c'est-à-dire de méga-écosystèmes. Il est dans ce cas possible de transformer la végétation simulée (sous forme de PFTs) en biomes. Ce procédé s'appelle la biomisation. Dans cette thèse une méthode adaptée de Prentice et al. (2011) a été utilisée, elle-même adaptée de Joos et al. (2004), et a déjà été utilisée avec ORCHIDEE (Kageyama et al., 2013). Il s'agit d'un algorithme se basant sur la fraction de la couverture des feuilles (projetée au sol), la hauteur de la végétation boisée (arbres et buissons), le nombre de degrés jours supérieurs à 5°C (GDD_5 en °C par jour), ainsi que le climat associé aux arbres dominants (Figure 30). Les valeurs limites ont été adaptées pour représenter les biomes arctiques et actuels alors que l'algorithme a été développé pour identifier des biomes lors de l'Holocène et à l'échelle de la planète (Joos et al., 2004; Prentice et al., 2011; Kageyama et al., 2013). Les régions englacées sont masquées, et les biomes non présents en régions boréales ont été retirés.

Cette méthode permet donc de comparer plus facilement entre elles les évolutions globales de la végétation simulée ou alors les observations et les simulations. On peut également modifier l'algorithme utilisé lorsque les biomes observés sont classés différemment.

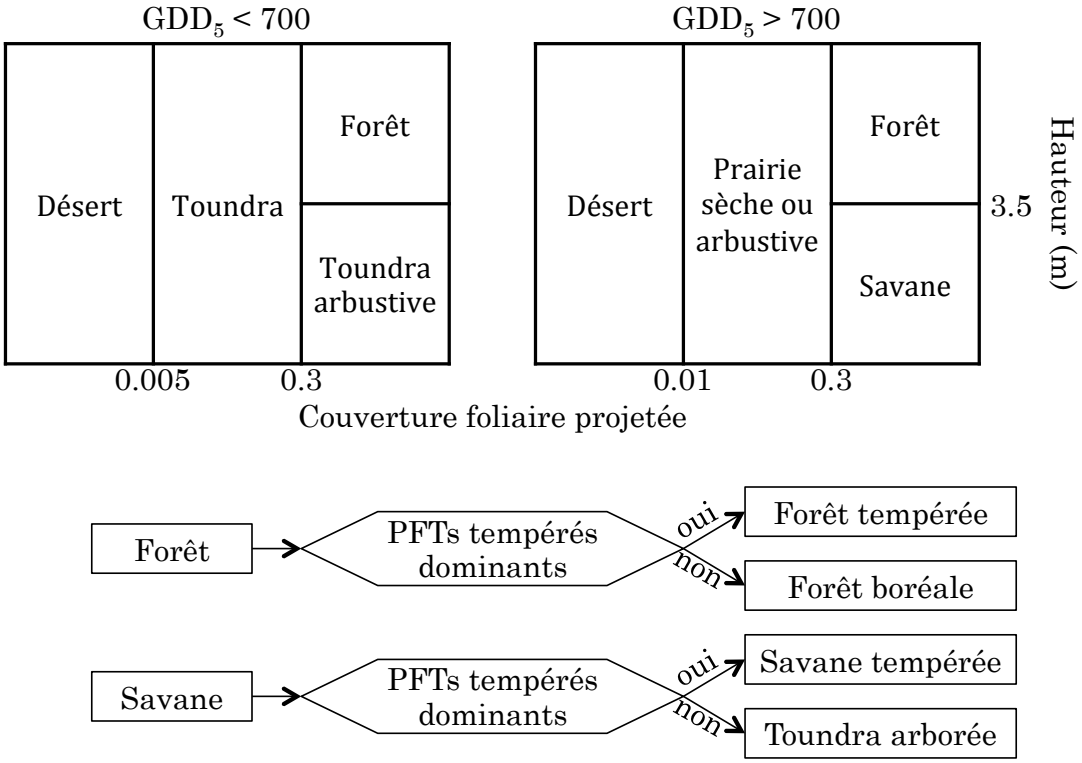


Figure 30. Algorithme de biomisation dans les régions Arctiques, permettant de convertir des fractions de PFTs simulées dans ORCHIDEE en biomes, en fonction du nombre de degrés jours au-dessus de 5°C (GDD_5), de la fraction de couverture foliaire projetée, de la hauteur moyenne de la végétation arborée et du type de climat des PFTs dominants.

Chapitre 3
LA VEGETATION BOREALE REDEFINIE

3.1. Motivations et description succincte des PFTs boréaux

Pour répondre aux enjeux actuels des projections climatiques, une nouvelle description de la végétation présente dans les régions boréales a été définie dans le modèle ORCHIDEE. Pour cela, en partant des 13 types fonctionnels de plantes (PFTs) présents dans la version standard du modèle (Krinner et al., 2005) et présentés dans la Figure 14, trois nouveaux PFTs ont été ajoutés, à savoir les plantes non vasculaires (NVPs), les buissons boréaux et les herbacées (C3) boréales. L'impact de ces ajouts doit être évalué à différentes échelles spatiales et temporelles afin de déterminer les conséquences que cela peut avoir sur les variables pouvant influencer le climat : les flux de carbone (via la photosynthèse, l'accumulation de biomasse, la dégradation de la litière, etc.), les flux d'énergie (via la thermique du sol, l'évolution de l'albédo, etc.) et les flux hydriques (via l'évaporation, la transpiration, le drainage, etc.).

L'ajout des NVPs, regroupant entre autres les bryophytes (mousses et sphaignes) et les lichens, est celui qui a demandé le plus de travail en profondeur lors de l'implémentation dans le modèle. L'absence de tissus conducteurs (xylème et phloème, permettant le flux de la sève brute ou élaborée et donc de l'eau, des éléments minéraux, ou des produits de la photosynthèse) entraine une absence d'organe tel que les racines, la tige ou les feuilles (au sens strict). L'accès des NVPs à l'eau, l'oxygène ou le CO_2 nécessaires pour la photosynthèse ou la respiration (Équation 1 et Équation 2) s'en trouve donc modifié par rapport aux plantes vasculaires. Afin de simplifier l'introduction des NPVs dans le modèle ORCHIDEE, je suis parti du PFT « herbacées C3 », en maintenant donc des processus tels que l'accès à l'eau à travers des racines ou la conductance stomatique pour les échanges gazeux au niveau des feuilles. Par contre, un certain nombre de paramètres spécifiques à la végétation considérée ont été modifiés et de nouveaux processus ont été ajoutés. Par exemple, la conductivité stomatique (permettant les échanges gazeux au niveau des feuilles) a été augmentée et rendue moins dépendante des conditions environnementales pour rendre compte du fonctionnement des NVPs. Seuls les deux réservoirs « feuilles » et « reproductifs » (Tableau 1) ont été maintenus, par contre la perte des feuilles en automne a été supprimée et compensée par deux nouveaux processus : une mortalité induite par l'absence d'activité photosynthétique significative sur une période donnée et une seconde induite en cas d'accumulation de biomasse (réservoir feuilles) trop importante (comme dans les tourbières). Pour représenter l'absence de racine, leur taille a été limitée à quelques centimètres.

La résistance des NVPs à l'absence d'eau (liquide) via le processus de dessiccation a également été intégrée (perte d'une partie de l'eau présente dans la plante, entrainant une diminution de la capacité photosynthétique à moyen terme, ainsi que de la respiration). Afin de reproduire l'impact biophysique des NVPs sur l'environnement, leurs effets sur la conductivité et la capacité thermique du sol ont été pris en compte ; de plus la décomposition de la litière a été mise à jour (au travers de sa discrétisation verticale et de sa dépendance à l'humidité).

L'ajout des buissons boréaux a quant à lui suivi une logique « fonctionnelle » : il était en effet peu réaliste d'avoir des arbres de 20 mètres de haut pour représenter une toundra buissonnante, composée de buissons, de bouleaux nains, etc. A partir des arbres boréaux décidus, une nouvelle allométrie des buissons a été implémentée, passant du « pipe tune model » pour les arbres (section 2.1.4.2) à une représentation issue de Aiba and Kohyama (1996). Il s'agit ainsi non plus d'une croissance polynomiale de la hauteur, mais d'une croissance admettant une asymptote horizontale (une hauteur maximale définie). Cette nouvelle représentation permet d'obtenir une hauteur des buissons inférieure à 5 mètres, ce qui permet une prise en compte plus réaliste des interactions entre les buissons et leur environnement, comme la neige. Pour cela l'impact de la végétation haute (buissons et arbres) sur les dépôts de neige (densité et couverture spatiale) a été pris en compte, ainsi que la protection (notamment aux faibles températures) fournie par le manteau neigeux aux buissons. Afin de modéliser l'impact de ces interactions sur les variables climatiques, le calcul de la rugosité et de la fraction de neige sur la végétation a été mis à jour. Un certain nombre de paramètres ont également été modifiés par rapport à leurs valeurs initiales utilisées pour les arbres.

Enfin, l'ajout d'un PFT « herbacées C3 boréales » a été effectué à partir des herbacées C3 standards afin de différencier les caractéristiques biogéochimiques et la résistance des herbacées aux conditions climatiques par rapport aux espèces présentes aux latitudes tempérées (i.e., les prairies françaises) et celles présentes au nord de la Sibérie. Les principales modifications portent sur le choix des paramètres contrôlant la capacité photosynthétique et sa sensibilité aux températures saisonnières.

Ce travail fait l'objet d'un article soumis début 2017 à *Geoscientific Model Development* (Druel et al., 2017), présenté ci-dessous (section 3.3) et résumé dans la section 0. Il reprend les objectifs de ce travail, comporte une description précise des processus implémentés et enfin une discussion des résultats obtenus (bilan d'eau, de carbone et d'énergie) avec la végétation boréale comparée à une simulation standard. Les simulations utilisées correspondent aux simulations « ORC2.0 » présentées dans le Tableau 7. Avant cet article, une description d'un travail préliminaire est fournie dans la section 3.2. Cette section décrit les différences dues aux modifications et corrections apportées à la version originale d'ORCHIDEE ayant servis de point de départ à ce travail (version présentée dans Zhu et al., 2015) en préambule au développement des nouveaux PFTs.

3.2. Impacts induits par la modification du modèle en préambule au développement des nouveaux PFTs.

Si la section suivante met en avant la différence entre la végétation standard (13 PFTs) et celle comprenant la nouvelle description de la végétation boréale (16 PFTs), il s'agit dans les deux cas de la version finale développée dans cette thèse. Celle-ci comprend néanmoins la résolution de quelques bogues rencontrés, la mise à jour ou l'amélioration d'équations « obsolètes », touchant l'ensemble des PFTs. On peut citer par exemple la réécriture des calculs de :

- la rugosité qui comportait une erreur dans son expression, ne prenant pas en compte la faible rugosité des espaces occupés par les herbacées en hiver (section 2.1.4.3).
- la fraction de neige sur la végétation qui ne prenait pas en compte la végétation et dont l'expression datait des années 90 (section 2.1.4.3).
- l'allométrie des arbres qui, suite à une erreur, fournissait des valeurs fixes lorsque la végétation était statique (section 2.1.4.2).
- la fonction de décomposition dans le sol en fonction de l'humidité, qui attribuait une valeur de décomposition maximale lorsque la quantité d'eau dans le sol était maximale, négligeant ainsi la chute de la décomposition en cas de conditions saturées anoxiques (section 2.1.4.1).

L'impact de ces modifications est potentiellement très important, bien qu'il ne s'agisse pas de développements majeurs. Il est donc important de quantifier et qualifier l'impact de ces modifications, afin de pouvoir estimer l'impact global que cela peut avoir sur l'ensemble des sorties du modèle. Pour cela, une simulation a été réalisée avec la version 13 PFTs initiale utilisée en amont de cette étude (ORI, Tableau 7, présentée dans Zhu et al., 2015) et comparée avec une simulation de la version actuelle (ORC, Tableau 7) utilisant la végétation standard (13PFTs). Quelques résultats importants sont présentés dans la Figure 31 ; ils montrent l'impact induit par les changements précédemment cités, n'intervenant pas uniquement sur les PFTs boréaux ajoutés.

On note une diminution importante de la productivité en juillet dans la nouvelle version du modèle sur une grande bande de latitude moyenne (située entre 40°N et 60°N), qui représente parfois jusqu'à 30% de la NPP présente dans ORI. La biomasse est impactée du même ordre de grandeur et sur une zone similaire. Les différences de transpiration reprennent la même structure spatiale que pour la NPP, avec un impact essentiellement en juillet, alors que le reste de l'année les différences restent faibles. Si l'albédo de la végétation est très faiblement modifié en juillet et août, l'albédo total est très différent entre les deux versions du modèle, principalement en janvier (régulièrement entre -0,1 et -0,2 à partir de 50°N), plus faiblement en avril (-0,1 au nord de 65°N) et en octobre (autour de 0,05 ponctuellement) et pas du tout en juillet. Enfin la rugosité est impactée toute l'année, mais avec des différences selon les régions : elle est faiblement inférieure en Europe dans la nouvelle version, très inférieure à l'est de la Sibérie ou à l'ouest de l'Amérique du Nord, alors que dans l'ouest de la Sibérie et à l'est de l'Amérique du Nord elle est pratiquement identique en juillet et octobre et sensiblement supérieure en janvier et avril.

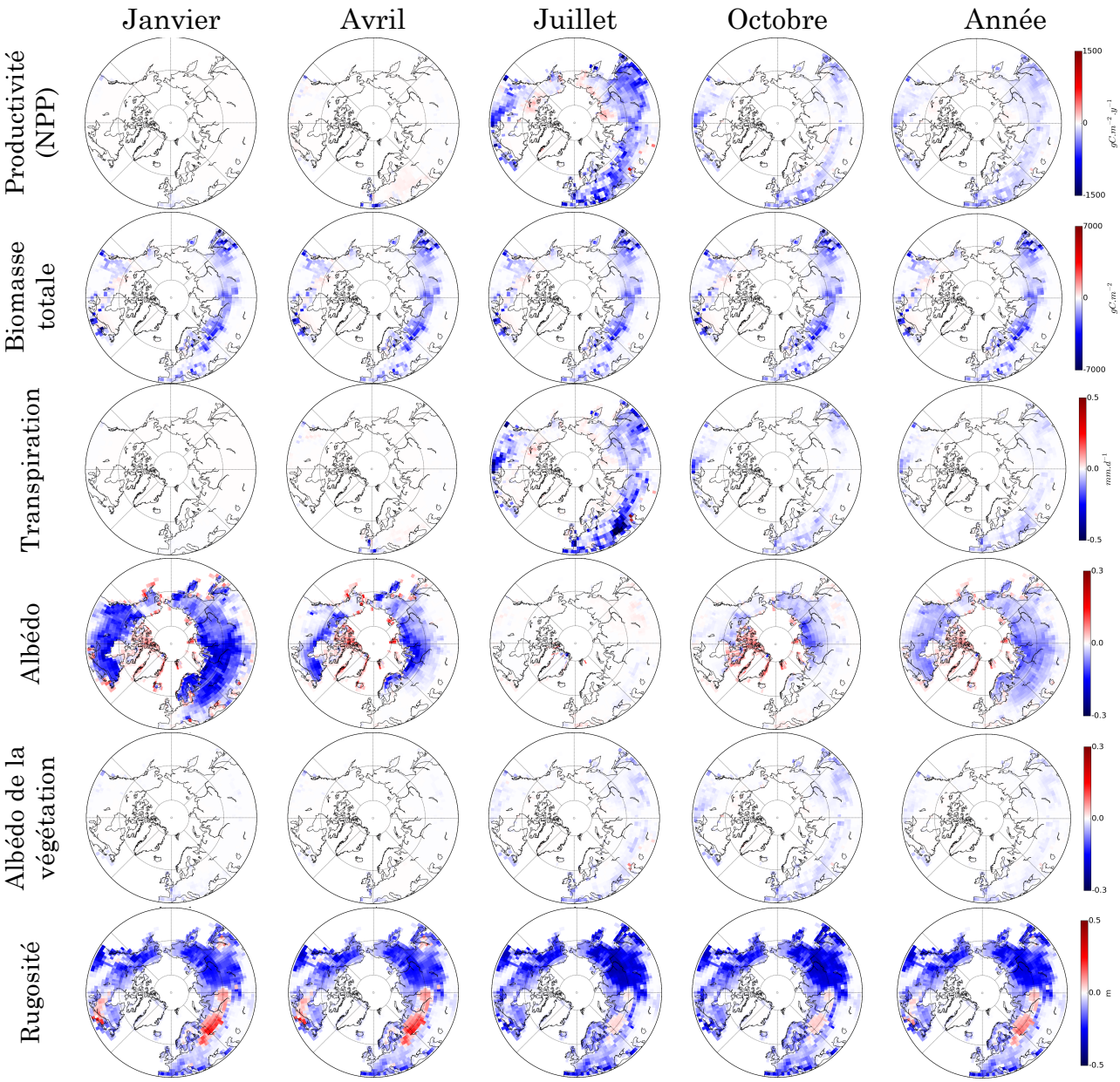


Figure 31. Cartes montrant les différences entre le modèle final (ORC, développé dans cette thèse) et le modèle initial (ORI) avec 13 PFTs, pour la productivité primaire nette, la biomasse vivante totale, la transpiration, l'albédo total, l'albédo de la végétation et enfin la rugosité. Il s'agit des moyennes sur 10 ans (2004-2013) pour janvier, avril, juillet, octobre et annuelles. Notez que pour les albédos, l'échelle n'est pas identique à celle présentée en section 3.3.

Alors que la répartition de la végétation originale (avec 13 PFTs présentés dans la Figure 14) n'a pas été modifiée entre les deux simulations (« ORC » et « ORI »), des différences notables sont observées. L'écart de biomasse entre les deux simulations est relativement constant toute l'année et quantitativement important (entre 500 et 700 gC.m^{-2}), impliquant que la végétation concernée correspond aux PFTs arborés, les herbacées perdant la majorité de leur biomasse en hiver. La corrélation entre les variables concernées, à savoir une biomasse, une NPP et une transpiration plus faibles, traduit l'importance du couplage photosynthèse – transpiration via notamment la surface foliaire. Une diminution du LAI pendant la période de croissance explique en effet une baisse de

productivité et de transpiration dans ORC par rapport à ORI. Au contraire, l'albédo de la végétation, qui correspond à la contribution de la végétation à l'albédo total sans prendre en compte le sol nu et la neige, semble faiblement impacté par ces changements. Par manque de temps je n'ai pas décortiqué plus en avant le lien entre les modifications apportées (voir liste ci-dessus) et cette chute de biomasse et de productivité.

Les différences d'albédo total entre ORC et ORI sont importantes et principalement concentrées en hiver, dans des régions marquées par une couverture de neige. De plus on note une faible différence en octobre lors des premières neiges et une différence plus importante en avril aux hautes latitudes où la neige est persistante. Étant donné que l'expression de l'albédo de la neige est identique dans les deux versions, il s'agit de différences apportées par la modification du calcul de la fraction de neige sur la végétation (qui est maintenant dépendante de l'épaisseur de la neige et de la hauteur de la végétation à travers la rugosité, cf. Équation 27). C'est donc la différence induite par la prise en compte de la hauteur de la végétation qui est en cause.

Enfin la différence de rugosité entre ORC et ORI est a priori due aux modifications des équations décrivant la hauteur de végétation (section 2.1.4.2) et la rugosité (section 2.1.4.3). Ainsi d'un côté la modification du calcul de la hauteur de la végétation arborée (qui permet maintenant d'avoir une hauteur variable lorsque la végétation est fixe) a eu pour impact direct une modification de la rugosité dans la plupart des régions boréales. D'un autre côté, la prise en compte des surfaces de sols sur lesquelles il y a des herbacées qui flétrissent en hiver implique une diminution de la rugosité. Notons que la prise en compte de la hauteur de la végétation qui surplombe la neige pour calculer la rugosité entraine une légère diminution de celle-ci.

Comme on peut donc le constater, des mises à jour et améliorations du code ont induit des différences non négligeables dans les variables biogéochimiques et physiques. Ces modifications peuvent donc avoir un effet important pour des simulations couplées avec le modèle de circulation globale LMDZ. Il semble donc essentiel d'étalonner les processus impliqués afin de vérifier l'accord entre les observations et les simulations. Par exemple pour l'albédo, un ajustement des paramètres de l'albédo de la végétation est en cours (à l'aide d'une optimisation (section 2.3.2) via les données issues de l'instrument MODIS, MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) afin d'ajuster la nouvelle implémentation. Par ailleurs, il faudrait observer l'impact d'autres variables initialement mal représentées, telles que la hauteur de végétation ou la rugosité, sur la circulation atmosphérique (via la vitesse du vent) comme le suggère Vautard et al. (2010).

3.3. Nouvelle représentation de la végétation boréale (article in review)

Towards a more detailed representation of high-latitude vegetation in the global land surface model ORCHIDEE (ORC-HL-VEGv1.0)

Arsène Druel[1,2], P. Peylin[1], G. Krinner[2,] P. Ciais[1], N. Viovy[1], A. Peregon[1,3], V. Bastrikov[1], N. Kosykh[3] and N. Mironycheva-Tokareva[3]

[1]Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, CEA-CNRS-UVSQ CE Orme des Merisiers, 91 190 Gif sur Yvette, France
[2]CNRS, Univ. Grenoble Alpes, Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), F-38000 Grenoble, France
[3]Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch Russian Academy of Sciences (SB RAS), Novosibirsk, 630090, Ak. Lavrentieva ave., 8/2, Russia

Correspondence to: Arsène Druel (arsene.druel@gmail.com)

Journal: Geoscientific Model Development

Abstract. To improve the simulation of vegetation-climate feedbacks in the high latitudes, three new circumpolar Plant Functional Types (PFTs) were added in the ORCHIDEE land surface model, namely non-vascular plants (NVPs) representing bryophytes and lichens, arctic shrubs, and arctic C3 grasses. Non-vascular plants are assigned no stomatal conductance, very shallow roots, and can desiccate during dry episodes and become active again during wet periods, which gives them a larger phenological plasticity compared to grasses and shrubs. Shrubs have a specific carbon allocation scheme, and differ from trees by their larger survival rates in winter, due to protection by snow. Arctic C3 grasses have the same equations than in the original ORCHIDEE version, but different parameter values, optimized from in-situ observations of biomass and NPP in Siberia. In situ observations of living biomass and productivity from Siberia were used to calibrate the parameters of the new PFTs using a Bayesian optimization procedure. With the new PFTs, we obtain a lower Net Primary Productivity (NPP) by 31% (from 55°N), as well as a lower roughness length (-41%), transpiration (+33%) and a higher winter albedo (by 3.6%) due to a larger snow cover. A simulation of the water balance and runoff and drainage in the high northern latitudes using the new PFTs results in an increase of fresh water discharge in the Arctic ocean by 11% (+140 km^{-3} y^{-1}), owing to less evapotranspiration. Future developments should focus on the competition between these three PFTs and boreal trees PFTs, in order to simulate their area changes in response to climate change, and the effect of carbon-nitrogen interactions.

1 Introduction

To understand the role of vegetation feedbacks in climate change, global land surface models included in Earth System Models (ESM) describe the carbon, water and energy exchanges between the vegetation and the atmosphere at large scales. To this end, Surface-Vegetation-Atmosphere transfer schemes (SVATs, e.g. Henderson-Sellers et al., 1996) were developed and coupled with General Circulation Models (GCMs) that provide the meteorological forcing used as input to SVATs. Several studies show that the terrestrial biosphere plays an important role in controlling the spatial and temporal distribution of carbon, water and energy fluxes, and thus indirectly in modulating regional to continental scale climate. Specifically, it appears that high-latitude ecosystems have a significant impact on the climate (Bonan, 1995; Christensen et al., 1999; Chapin et al., 2000). For example, circumpolar vegetation changes have played an important role in the last glacial inception, i.e. 26.5 ka to 20 ka (Clark et al., 2009). Reduced tree cover led to an increase in albedo and snow cover, a reduction in temperature and precipitation and ultimately changes in atmospheric circulation and cooling of the high latitudes (Gallimore and Kutzbach, 1996; de Noblet et al., 1996; Meissner et al., 2003; Vavrus et al., 2008;

Colleoni et al., 2009). In the circumpolar regions, critical physical processes are the dynamics of permafrost (Lawrence and Slater, 2005; Koven et al., 2011), snow deposition and cover and its effect on surface albedo, soil thermal dynamics and the impact of vegetation roughness length on momentum and flux exchanges with the atmosphere. While the Net Primary Productivity (NPP) and living plant biomass is low at high latitudes because of harsh climatic conditions and a short growing season, carbon stocks in high-latitude soils, and in particular in permafrost, are very large (e.g. Tarnocai et al., 2009; Hugelius et al., 2011) because of reduced soil organic matter decomposition and the burial of frozen carbon below the active layer over long time scales. Changing soil properties and temperature in response to future warming could therefore release CO_2 and CH_4 from thawed permafrost, with a potential carbon release on the order of 92 ± 17 PgC by 2100 under the current warming trajectory (RCP8.5) (Schuur et al., 2015). Altogether, high-latitude vegetation significantly affects regional and global climates and must therefore be correctly represented in ESMs, in particular in the light of projected strong Arctic and sub-Arctic climate warming and related biogeographic shifts. With the current warming trajectory, the colonisation of shrubs could be significant (Frost and Epstein, 2014), and as observed by Blok et al. (2011b), it could lead to an Artic greening (Blok et al., 2011b; Bonfils et al., 2012) with increased leaf area, decreased surface albedo in winter, and potential increase of temperatures at local and regional scales.

Until recently the description of circumpolar vegetation in land surface models is relatively simple and discretized on few Plant Functional Types (PFTs) that share similar equations and differ only by parameters values (except for phenology which is usually PFT-specific). In most land surface models (for instance those used in CMIP5 Earth System Models) all vegetation types were classified as either trees or grasses PFTs. Taiga and tundra, where non-vascular plants and shrubs dominate the landscapes in the reality, cover about 15% of global land surfaces (Beringer et al., 2001). In the BIOME ecosystem model (used specifically to study past and future vegetation transition) the tundra diversity was taken into account in the early 2000s (Kaplan et al., 2003). Chadburn et al. (2015) recently included mosses in the JULES model (Best et al., 2011). Similarly, a first description of lichen and bryophytes was implemented in the JSBACH model (Porada et al., 2013). Biogeochemical and biophysical characteristics of shrubs are already implemented in some models, such as in the Community Land Model (Oleson et al., 2013), JULES (Clark et al., 2011) and JSBACH (Baudena et al., 2015). In this study we further develop the ORCHIDEE model (Krinner et al., 2005), the land surface component of the Institute Pierre Simon Laplace (IPSL) ESM, to represent non vascular plants, arctic shrubs and tundra grasses. This study focuses on the parameterizations of these three new PFTs, their interactions part of the Dynamic Global Vegetation Model (DGVM) of ORCHIDEE being treated in a following study.

To date, the ORCHIDEE model contains 8 different types of trees (tropical broad-leaved evergreen and raingreen, temperate needleleaf evergreen, broad-leaved evergreen and summergreen, boreal broad-leaved summergreen, needleleaf evergreen and summergreen), 4 types of grasses (C3 and C4 grassland as well as C3 and C4 generic crops) and bare soil (Krinner et al., 2005), using the PFT concept. In the reality, high latitude vegetation contains graminoid tundra, shrubs and wetlands including mosses and sedges (see CAVM, for Cirumpolar Arctic Vegetation Map, Mapping Team et al., 2003) while in ORCHIDEE it was represented by a single PFT for C3 grasses and several PFTs for boreal trees, namely boreal broadleaved deciduous, needleleaved deciduous and evergreen conifers (Krinner et al., 2005). In view of the diversity of circumpolar vegetation, the current discretization of the vegetation in ORCHIDEE does not allow to properly model the regional dynamics of water, carbon and energy fluxes.
Key plant functional types missing in the model for the high-latitudes are mosses and lichens and shrubs. Mosses and lichens are non-vascular plants; their uptake of nutrients is not supported by xylem sap flow and their gas exchange of water and CO_2 is not regulated by stomata. Moreover, mosses and lichens have different environmental needs than grasses (i.e., more resistant for hydric and thermal stress or for nitrogen limitation). Shrubs are smaller than trees and have a different morphology, inducing a larger snow accumulation in winter, and tolerance to wind or cold temperature, and a different potential for colonisation (shrubs being endemic in many tundra ecosystems can grow rapidly in response to warming whereas trees need to establish).

The aim of this study is to improve the description of circumpolar vegetation in ORCHIDEE by adding mosses and shrubs and adjusting parameters related to C3 grasses, in order to improve the spatial and temporal dynamics of biogeochemical and biophysical processes in the soil-plant-atmosphere continuum. The implementation of the new plant functional types is described in Sect. 2. Results obtained both for site scale and large-scale simulations are described in Sect. 3. Sect. 4 presents a summary of the key findings together with some perspectives.

2 Methods

2.1 ORCHIDEE: overall model description

ORCHIDEE describes the exchange of energy, water and carbon between the atmosphere and the biosphere. The model includes the representation of carbon and water exchange at leaf scale scaled up to canopy-scale, the allocation of carbon within plant compartments (leaves, roots, heartwood and sapwood), autotrophic respiration, litter production, plant mortality and decomposition of soil organic matter (after Parton et al., 1988). Leaf-scale photosynthesis follows the formulation of Farquhar et al. (1980) for C3 plants and Ball and Berry for stomatal conductance (Ball et al., 1987) implemented according to Yin and Struik (2009) and Kattge and Knorr (2007), i.e. with a seasonal acclimation of maximum photosynthetic rates to temperature.

The soil hydrology model includes an 11-layer diffusion model following the van Genuchten (1980) equations for texture-dependent hydraulic saturation capacity and vertical diffusivity (de Rosnay et al., 2002). The model runs at half-hourly time step but describes slow processes such as carbon allocation, respiration, phenology or litter decomposition at a time step of one day. ORCHIDEE uses the concept of Plant Functional Types (PFTs) to describe the heterogeneity of land surface ecosystems. Thirteen PFTs (including bare soil) are already present with 8 types of trees and 2 natural and 2 agricultural herbaceous (C3 and C4) types (Krinner et al., 2005), as summarized in Table 1.

The high latitude version of ORCHIDEE (ORC-HL from ORCHIDEE rev1322) used in this study includes a soil-freezing scheme (Gouttevin et al., 2012) and a 3-layer explicit snow model (described initially in Wang et al., 2013). In this new ORCHIDEE version (ORC-HL-VEGv1.0), 3 new PFTs are added to the 13 original ones (Table 1), i.e. non-vascular Plants (NVP) including bryophytes (mosses, liverworts and hornworts) and lichens, boreal shrubs, and boreal C3 grasses. Note that tropical trees are not present in high latitude.

Bare soil			
Trees	Tropical	Broadleaf	Evergreen
		Broadleaf	Raingreen
	Temperate	Needleleaf	Evergreen
		Broadleaf	Evergreen
		Broadleaf	Summergreen
	Boreal	Needleleaf	Evergreen
		Broadleaf	Summergreen
		Needleleaf	Summergreen
*Shrubs	*Boreal	*Broadleaf	*Summergreen
Grasses	Natural	C3	Global
			*Arctic
		C4	
	Crops	C3	
		C4	
*Non-Vascular (C3) plants			

Table 1: PFTs included in ORCHIDEE. New PFTs incorporated in this study are indicated with asterisks.

2.2 Non Vascular Plants (NVP): Bryophytes & Lichens

Bryophytes and lichens (NVPs) are very specific plant vegetation types, with a rather small amount of living biomass, around 200 $g.m^{-2}$ (Bond-Lamberty and Gower, 2007; Gornall et al., 2007), but with significant dead organic matter beneath. In contrast, in boreal and tundra ecosystem where mosses compose a small fraction of total ecosystem biomass, their net primary productivity (NPP) can be up to 50% of total annual NPP (Viereck et al., 1986; Beringer et al., 2001) and corresponds to approximately 1–6% of the global terrestrial net primary productivity (NPP) (Ito, 2011; Porada et al., 2013). In addition, NVPs have no sap (i.e. no water circulation), no roots (only rhizoids to hold on to the ground) and no active stomata to optimize the uptake of CO_2 in order to minimize water loss.

We modified the equations of C3 grasses plants in order to describe NVPs as follows. First, we consider that NVP biomass is mainly represented by leaf carbon (i.e., no wood, reserves and root). Their leaves are assumed to access water in the top-soil without roots (i.e. no carbon allocated to a root compartment). We also modified the equations of photosynthesis and stomatal conductance, carbon allocation, and energy balance. In the following we detail how the few key processes of ORCHIDEE have been adapted as well as the new processes were implemented to represent NVP specificities. For all other processes and associated parameters not described below, we used the C3 grasses equations (as reported by Krinner et al., 2005).

2.2.1 Photosynthesis and stomatal conductance

Photosynthesis of C3 plants in ORCHIDEE is based on Farquhar and Sharkey (1982), with the stomatal conductance (***gs***) implemented according to Yin and Struik (2009):

$$g_s = g_o + \frac{A+R_d}{C_i + C_{i*}} \times f_{VPD} \quad \textbf{(1)}$$

With g_O the stomatal conductance when irradiance is null, A the rate of CO_2 assimilation, R_d the dark respiration rate, C_i the intercellular CO_2 partial pressure and C_{i*} the C_i-based CO_2 compensation point in the absence of dark respiration. f_{VPD} is a function describing the effect of leaf-to-air vapour pressure difference (***VPD***), described empirically following Yin and Struik (2009):

$$f_{VPD} = \frac{1}{[1/(a_1 - b_1.VPD) - 1]} \quad \textbf{(2)}$$

With a_1 & b_1 empirical constants. This function limits the stomatal conductance under dry air conditions.

Vascular plants have stomata (Kirkham, 2005; Ruszala et al., 2011) to regulate gas fluxes (i.e. CO_2, transpiration). For NVPs, the situation is more complex and diverse (Williams and Flanagan, 1996; Chater et al., 2013): some species have "non active" stomata (Ruszala et al., 2011) like *Oedipodium*, others have only "pseudo-stomata" like *Sphagnum*, and some have no stomata like *Andreaeobryum* (Haig, 2013). For the sake of simplicity and given the lack of a well established photosynthesis model for each NVPs type, we considered that all NVPs have "pseudo-stomata". We thus kept Eq. (1) for g_s (Yin and Struik, 2009) but with a conductance that only weakly depends on the VPD. Observation of NVPs transpiration suggests that their conductance has a small dependence to humidity and atmospheric CO_2 concentration, but a large mean value. We thus defined the coefficients a_1 and a_2 (see Table 2) so that the VPD dependency of leaf stomatal conductance f_{vpd} in Eq. (2) is almost independent of ***VPD*** and chose a large value for g_0 to simulate a high stomatal conductance. This solution is close to that used by Dimitrov et al. (2011), i.e. a constant conductance.

2.2.2 Plant carbon allocation

ORCHIDEE has five biomass carbon reservoirs for C3 grasses: leaves, root, reserve, reproductive organs (fruits), and sapwood below and above ground. We choose to keep only the leaf reservoir to represent the NVP biomass and the fruits pool for reproduction (see Table 2). Furthermore, C3 grasses are summergreen vegetation with only reserve pools during wintertime. Using the leaf pool to represent NVPs biomass implies to consider NVPs as an evergreen PFT (see Table 2) with leaves present all year long. The main challenge is then to adapt

the leaf biomass turnover in order to represent the observed temporal dynamic of lichens and bryophytes biomass.

2.2.3 Biomass carbon turnover

We modified the original leaf senescence parameter from 120 days (for grasslands) to 470 days for NVPs (Table 2). Then we defined an energy cost (i.e. an extra turnover of biomass) for NVP survival in cold winter conditions and limited photosynthesis due to the thickness of the NVPs reducing light penetration. These two processes are described hereafter.

Bryophytes and lichens have a very good resistance to extreme conditions. This adaptation has however an energy and thus a biomass cost, modelled through an additional carbon loss (t_{npp0} in gC.m^{-2}.d^{-1}) based on the cumulative number of day (d_{cum}) when the Net Primary productivity (NPP) is negative or null, as given by Eq. (3).

$$t_{npp0} = b \times k_l$$

$$k_l = \begin{cases} 0 & , d_{cum} < d_0 \\ k_{l\,max} \times \frac{(d_{cum} - d_0)}{(d_m - d_0)} & , d_0 < d_{cum} < d_m \\ k_{l\,max} \times \frac{(d_{cum} - d_f)}{(d_m - d_f)} & , d_m < d_{cum} < d_f \end{cases} \quad (3)$$

Where b the (leaf) biomass of NVPs (gC.m^{-2}) and k_l the additional fraction of biomass lost during extreme conditions (or turnover rate in d^{-1}) with a maximum value of $k_{l\,max}$ (in d^{-1}), d_0 a threshold delay time (in days) before increasing the turnover, d_f (days) the maximum number of days for applying the extra turnover, and d_m (days) the day number when k_l reaches its maximum value after d_0. The values of all parameters are summarised in Table 2. Figure 1 illustrates the increasing biomass turnover linked to extreme conditions with k_l as a function of time in the season with negative or zero NPP.

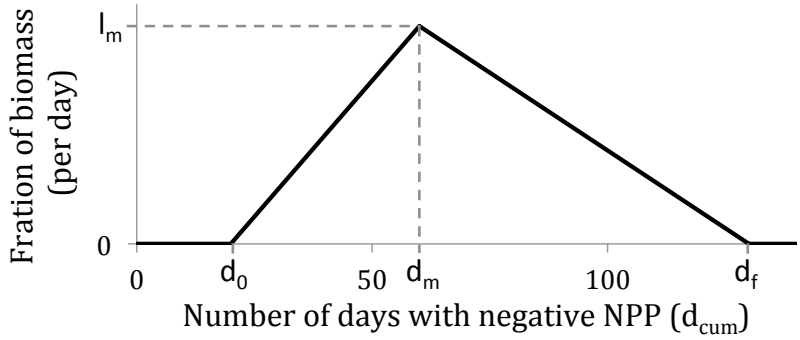


Figure 1: Additional non-vascular biomass loss turnover rate (k_l in d^{-1}) during the non-growing season period when NPP is lower or equal than zero, starting at 0 on the horizontal axis.

Using NPP to determine the period of the year with extreme conditions allows us to combine different stress factors such as cold temperature and very low moisture. Hence the combination of short-term stress episodes (periods when $d_0 > 0$) such as a short drought followed by a snowfall (blocking of light and cold temperatures stress) on the NVPs could result in a long-term impact (increase in turnover) on vegetation.

The second turnover is related to favourable conditions with a large growth of biomass during the growing season (such as in peatlands). Given their large NPP under favourable conditions, NVPs can accumulate biomass over several tens of centimetres. In this case, sunlight cannot reach the lower portion of the canopy due to light penetration decreasing, although this biomass is still considered as leaf material (see 2.2.1). The underneath biomass usually dies from a lack of light and possibly a lack of oxygen in wet conditions. Given that oxygen concentration is not simulated in this model, the effect of anoxic conditions and severe light limitation are simply parameterized by increasing the overall leaf biomass turnover rate during the growing season. We chose the Leaf Area Index (LAI) to define this additional turnover: when the maximum LAI (LAI_{max}) is reached, the

underlying layers will not receive any sunlight, resulting in an increase of their turnover (t_{missL}) represented by Eq. (4).

$$t_{missL} = b \times \left(e^{l_{coef} \times (LAI - LAI_{lim})} - 1\right), \text{ if LAI} > \text{LAI}_{max}, \quad (3)$$

Where b is the daily leaf biomass of NVPs (gC.m^{-2}), l_{coef} a coefficient and LAI_{lim} a threshold leaf area index defined from Bond-Lamberty and Gower (2007). These two parameters are optimized in Sect. 2.6.1 and their values reported in Table 2.

2.2.4 Water access for NVPs

Plant water uptake

In ORCHIDEE, all vegetation types have access to soil water through a root system. The ability of roots to extract water depends on soil moisture in the different soil layers (11 currently, see 2.1) and the root density profile (R) (de Rosnay, 1999):

$$R(z) = e^{-r_p \times z} \quad (5)$$

With z the soil depth (m) and r_p a PFT dependent parameter to control the shape of the root profile.

NVPs do not have roots to absorb water (or nutrients from the underlying substrate). Some of them, such as *Sphagnum*, can have threadlike rhizoids but only to anchor to the soil. So they can only access the surrounding surface water. However, ORCHIDEE does not include a surface liquid water reservoir; thus for simplicity we have assumed that NVPs have access to water stored in the first top-soil layers. This assumption allows keeping an internal coherence between PFTs and facilitating the treatment of the competition for water between PFTs. The value of the r_p parameter (Table 2) for NVPs was defined through the optimization (see Sect. 2.6.1). With 50% water uptake (without roots) at 2.5cm and 95% at 11cm, we obtained water access values closed to those proposed by Dimitrov et al. (2011) or by Chadburn et al. (2015). Figure 2 illustrates the soil water uptake profile for NVPs, and the root profiles for C3 grasses and boreal trees (use in ORCHIDEE).

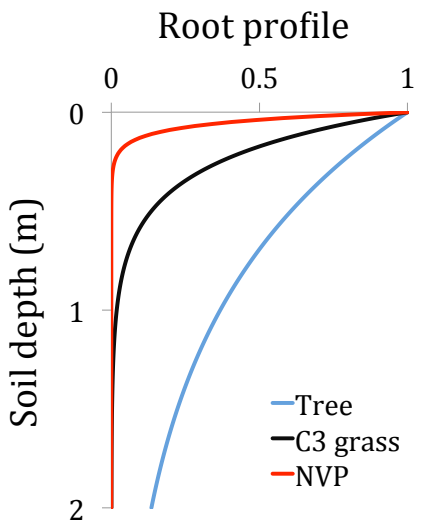


Figure 2: Root profile of boreal broadleaf trees, C3 grasses and soil water uptake profile for NVPs.

Impact of drought on the desiccation of NVPs

During and after a water stress period, the water content of NVPs decreases significantly (desiccation) which reduces the plant photosynthetic capacity (Williams and Flanagan, 1996; Wania et al., 2009; Dimitrov et al., 2011). As for the other PFTs in ORCHIDEE, the instantaneous effect of soil water limitation will reduce photosynthesis through a soil water stress function imposed on the maximum photosynthetic capacity (Farquhar et al, (1980) photosynthesis model). Additionally, for NVPs, plant desiccation occurs and the time needed before recovery to optimum photosynthetic capacity must be taken into account.

To account for this effect, Wania et al. (2009) reduced gross primary production as a function of the annual mean water table position. In ORC-HL-VEGv1.0 we chose to use a monthly running mean hydric stress factor ($\boldsymbol{w_s}$) computed from the relative water content in each soil layer weighted by the specific water uptake profile of NVPs defined in Fig. 2. We defined a desiccation function, $\boldsymbol{d_{ess}}$, as a linear function of $\boldsymbol{w_s}$ (Eq. (6) and Fig. 3) varying between 1 (no impact) and a minimum value $\boldsymbol{d_{off}}$, when $\boldsymbol{w_s}$ decreases to zero under maximum water stress. The function $\boldsymbol{d_{ess}(w_s)}$ illustrated in Fig. 3 scales the maximum rate of carboxylation (Vc_{max}) as well as the maintenance respiration. The maximum rate of electron transport (Vj_{max}) is scaled through Vc_{max}. Indeed, leaves maintenance respiration defined in ORCHIDEE being a function of the leaf carbon content (biomass) and LAI, should then be reduced when NVP get desiccated. With this formulation, we can take into account the impact of a drought on a monthly time scale.

$$\boldsymbol{d_{ess}} = \begin{cases} \boldsymbol{d_{off}} + \frac{\boldsymbol{1 - d_{off}}}{\boldsymbol{w_{s\,min}}} \times \boldsymbol{w_s}, \boldsymbol{w_s} < \boldsymbol{w_{s\,min}} \\ \boldsymbol{1} \qquad\qquad\qquad\quad , \boldsymbol{w_s} \geq \boldsymbol{w_{s\,min}} \end{cases} \tag{6}$$

With $\boldsymbol{w_{s\,min}}$ the minimum threshold hydric stress for desiccation (a constant defined in Table 2).

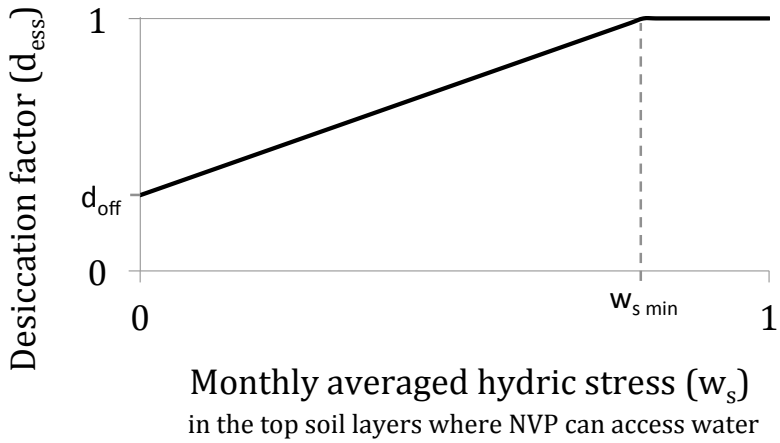


Figure 3: Desiccation function for non vascular plants.

2.2.5 Heat transfers

Non vascular plants and more precisely bryophytes form an insulating layer above the soil, with thus a strong control on the heat exchange between the atmosphere and the soil (Dyrness, 1982; Beringer et al., 2001; Blok et al., 2011a). In its standard version, ORCHIDEE does not account for the thermal insulation properties of vegetation in the calculation of the surface energy budget. For the sake of simplicity and following the same approach as in Chadburn et al. (2015), in ORC-HL-VEG we modified the upper soil layer characteristics to describe the effects of NVPs on the heat transfers to the soil over a depth that is equivalent to the NVP thickness and for the fraction of each grid cell box covered by NVPs.

First we estimate the thickness of NVPs ($\boldsymbol{h}$) assuming a fixed biomass density:

$$\boldsymbol{h} = \frac{\boldsymbol{b}}{\boldsymbol{\rho}} \tag{7}$$

With $\boldsymbol{b}$ the total NVPs biomass ($g.m^{-2}$) and $\boldsymbol{\rho}$ its density ($gC.m^{-3}$; see Table 2).

The thermal capacity / conductivity (Eqs. (8) & (9)) of the upper soil layers (equivalent to the depth of the NVPs layer) are modified based on the soil volumetric moisture content (as in the standard ORCHIDEE version) and the heat conductivity and capacity of NVPs, following Soudzilovskaia et al. (2013). The heat thermal capacity of the top-soil thickness $\boldsymbol{h}$ occupied by NVPs, $\boldsymbol{C}$, follows from:

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{C_{dry}} + \boldsymbol{m_{vol}} \times (\boldsymbol{C_{wet}} - \boldsymbol{C_{dry}}) \tag{8}$$

Where $\boldsymbol{m_{vol}}$ is the volumetric relative moisture content over a thickness $\boldsymbol{h}$, $\boldsymbol{C_{dry}}$ the dry thermal capacity of dry NVPs and $\boldsymbol{C_{wet}}$ the wet heat capacity of wet NVPs (from Soudzilovskaia et al., 2013; see Table 2). Note that in the standard case without NVPs, $\boldsymbol{C_{wet}}$ and $\boldsymbol{C_{dry}}$ are defined from the soil texture (see Wang et al., 2016). In the case of frozen soil we use an ice capacity ($\boldsymbol{C_{ice}}$) for NVPs, deduced relatively to $\boldsymbol{C_{ice}}$ of soil. When the soil is

partly frozen a weighting average between the two thermal capacities is calculated (using, $\boldsymbol{x}$, the unfrozen soil fraction). The overall thermal conductivity, $\boldsymbol{\lambda}$, follows from:

$$\boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{\lambda_{dry}} + \boldsymbol{m_{vol}} \times (\boldsymbol{\lambda_{sat}} - \boldsymbol{\lambda_{dry}})$$
$$\boldsymbol{\lambda_{sat}} = \boldsymbol{\lambda_{sat\_wet}}^{\boldsymbol{x}} \times \boldsymbol{\lambda_{sat\_ice}}^{\boldsymbol{1-x}} \quad \textbf{(9)}$$

With $\boldsymbol{\lambda_{dry}}$ the dry soil thermal conductivity, $\boldsymbol{\lambda_{sat\_wet}}$ the unfrozen wet thermal conductivity (from Soudzilovskaia et al., 2013) and $\boldsymbol{\lambda_{sat\_ice}}$ the frozen thermal conductivity of NVPs (derived relatively to $\boldsymbol{\lambda_{sat\_ice}}$ of soil.) See Table 2 for values and units. Note that the current version of ORCHIDEE only calculates one energy budget being the average of all vegetation types present in a grid cell; the overall thermal soil characteristics thus correspond to a weighted average of the soil characteristics according to the fraction of NVPs covering a grid cell.

2.2.6 Soil organic matter decomposition

In the standard version of ORCHIDEE, two important factors, temperature and moisture, exert a control on litter and soil organic matter decomposition (following the CENTURY model, Parton et al., 1988). These factors are computed from weighted mean soil temperature and soil moisture profiles, assuming an exponential profile of soil organic matter content and associated decomposition processes between 0 and 2m depth. For the moisture control of decomposition, the original function (Parton et al., 1988; Krinner et al., 2005) is increasing with soil moisture content (maximum at saturation), which is not adapted for water-saturated soils, where anoxic condition reduces bacterial activity (such as in peatlands). As these conditions may prevail for NVPs covers, we modified the original scheme.

First, we introduced a vertical discretization of below ground litter carbon pools, assuming it follows the same distribution as the root profile for vascular plants or soil water uptake profile for NVPs (exponential decay as Eq. (5), in de Rosnay, 1999), as in Frolking et al. (2001). Thus, the below ground litter is considered to be linked to vegetation source (i.e. roots for vascular plants). Moreover we consider that there is no above-ground litter for NVP, so that leaf litter is treated like below ground litter, as in Frolking et al. (2001) and Chadburn et al. (2015). With this new vertical discretization, we chose to use the temperature and soil moisture of each layer to define the control litter decomposition.

To account for anoxic conditions often prevailing in water saturated NVP ecosystems causing slow decomposition rates (Frolking et al., 2001), we changed the moisture decomposition function ($\boldsymbol{R_{SR}}$) applied for each layer as in Moyano et al. (2012), using a look-up table approach. Equation (10) describes the new function and the reduced decomposition with soil moisture content (applied for the litter issue of all PFTs).

$$\boldsymbol{PR_{SL}(m_{vol})} = \boldsymbol{m_{c(3)}} \times \boldsymbol{m_{vol}}^{\boldsymbol{3}} + \boldsymbol{m_{c(2)}} \times \boldsymbol{m_{vol}}^{\boldsymbol{2}} + \boldsymbol{m_{c(1)}} \times \boldsymbol{m_{vol}} + \boldsymbol{m_{c(0)}}$$

$$\boldsymbol{SR\ (m_{vol})} = \prod_{\boldsymbol{k=0}}^{\boldsymbol{m_{vol}}} \boldsymbol{PR_{SL}(k)}$$
$$\boldsymbol{R_{SR}(m_{vol})} = \frac{\boldsymbol{SR(m_{vol})}}{\max_{\boldsymbol{0<k<1}}(\boldsymbol{SR(k)})} \quad \textbf{(10)}$$

With $\boldsymbol{SR}$ the soil respiration (coefficient), $\boldsymbol{PR_{SR}}$ the proportional response of $\boldsymbol{SR}$ to soil moisture, $\boldsymbol{R_{SR}}$ the relative respiration, $\boldsymbol{m_{vol}}$ the soil volumetric moisture content (unit less), $\boldsymbol{m_{c(1\text{-}3)}}$ three parameters taken from Moyano et al. (2012). $\boldsymbol{SR}$ is equal to the product of all $\boldsymbol{PR_{SL}}$ values (denoted by $\boldsymbol{\Pi}$ symbol) at each 0.01 moisture interval ($\boldsymbol{k}$), from zero to the computed $\boldsymbol{SR}$ moisture. To obtain $\boldsymbol{R_{SR}}$, $\boldsymbol{SR}$ is divided by the maximum of $\boldsymbol{SR}$ for all $\boldsymbol{k}$ intervals (0 to 1). See Table 2 for constant values. Note that the temperature function decomposition is not modified.

2.2.7 Summary and other parameters

Other parameters and processes used for NVPs are set equal to those of C3 grasses, such as albedo and roughness as described by Krinner et al. (2005). We have optimized specific parameters of NVPs (listed with asterisk in Table 2) against observation (see Sect. 2.5.1), following a Bayesian optimization framework (see Sect. 2.6.1). The values of the main parameters for the NVPs including the optimized ones are reported in Table 2.

Parameters	Description	Original C3 grasses	Non-Vascular Plants
Phenotype		Summergreen	Evergreen
Organs	Organs proportion	roots, reserves, leaves, fruits (10%)	Leaves (95%), fruits (5%)
g_0 (mol.m^{-2}.s^{-1}.bar^{-1})	Stomatal conductance when irradiance is null	0.00625	0.052 *
a_1 (-)	Empirical constants	0.85 (all PFT)	0.85
b_1 (-)	Empirical constants	0.14	0.41 *
Senescence (day)	Theoretical number of days before senescence	120	470 *
d_0 (day)	Delay before increasing the turnover (if NPP≤0)	-	20
d_m (day)	Number of days when the fraction of biomass loss is maximal (if NPP≤0)	-	60
d_f (day)	Maximum number of day for this extra turnover (if NPP≤0)	-	130
$k_{l\,max}$ (days)	Maximal fraction of biomass loss (if NPP≤0)	-	0.05 *
LAI_{lim} (-)	Threshold leaf area index (for turnover)	-	2.4 *
l_{coef} (-)	Coefficient	-	0.014 *
r_p (-)	Parameter to control root profile	4	18 *
$w_{s\,min}$ (-)	Minimum hydric stress before any desiccation effect	-	0.8
d_{off} (-)	Offset of desiccation effect	-	0.55 *
ρ (gC.m^{-3})	Density	-	0.5 .10^4
C_{dry} (J.m^{-3}.K^{-1})	Dry soil thermal capacity	1.80	0.29.10^6
C_{wet} (J.m^{-3}.K^{-1})	Wet thermal capacity	3.03	4.29.10^6
C_{ice} (J.m^{-3}.K^{-1})	Ice thermal capacity	2.11	3.26.10^6
λ_{dry} (W.m^{-2}.K^{-1})	Dry soil thermal conductivity	0.4	0.092
λ_{sat_wet} (W.m^{-2}.K^{-1})	Wet thermal conductivity	0.6	0.754
λ_{sat_ice} (W.m^{-2}.K^{-1})	Ice thermal conductivity	2.2	0.715
$m_{c(0)}$ (-)	Constant		1.178
$m_{c(1)}$ (-)	Constant		-1.12
$m_{c(2)}$ (-)	Constant		2.22
$m_{c(3)}$ (-)	Constant		-1.40
LAI_{max} (m^2.m^{-2})	Maximum Leaf Area Index	2	3.06 *&***
$Vc_{max(25)}$ (µmol.m^{-2}.s^{-1})	Maximum rate of carboxylation at 25°C	70	28 *
SLA (m^2.gC^{-1})	Specific Leaf Area	2.6 10^{-2}	0.84 10^{-2} *
f_{m_resp} (gC.gC^{-1}.day^{-1})	Maintenance respiration coefficient at 0°C	2.62.10^{-3}	2.57.10^{-3} *

Table 2: Non Vascular Plant parameters.

* Optimized parameter (see Sect. 2.6.1)
** Estimated from Yoshikawa et al. (2002) and O'Donnell et al. (2009)
*** Estimated from Bond-Lamberty and Gower (2007)

The implementation of the NVP PFT is performed in such a way that if we need to separate in different sub-PFTs (i.e. study bryophytes and lichens separately), this would be easy to do, with new associated parameters.

2.3 Boreal deciduous shrubs

Shrubs share similar biogeochemical and biophysical processes as trees. Therefore, the introduction of a new shrub PFT is based on the equations of the boreal deciduous broadleaved tree PFT. The main difference between trees and shrubs concerns the size, and thus the allometry resulting from carbon allocation. Further, shrubs grow faster and therefore colonize landscapes before trees do. For high-latitudes, the protection of shrubs against cold by snow is an important process that needs to be taken into account, since snow depth and shrub height are positively correlated (McFadden et al., 2001; Sturm et al., 2001). Snow cover tends to be thicker when shrubs are present (McFadden et al., 2001), and a thicker snow cover better protects shrubs from frost damage.
In the following, we describe these particularities including the new allometry, the snow – shrubs interactions as well as the impact of shrubs on surface roughness and albedo. Note that all modifications are generic so that we can easily create additional shrubs types, such as needleleaf or evergreen phenotype, with only few parameter changes.

2.3.1 Shrub allometry

Tree allometry in ORCHIDEE is based on a pipe tune model (Smith et al., 2001). It represents the relation between height and diameter as a power (or log-linear) function, with no height limit. Shrub development is more horizontal than vertical (Bentley et al., 1970; Sitch et al., 2003; Lufafa et al., 2009), which requires modification of the tree allometry. We implemented the allometry rules described by Aiba and Kohyama (1996) with specific values for shrubs from Martínez and López-Portillo (2003). Equation (11) gives the allometry relation between individual height ($\boldsymbol{H}$, m), diameter ($\boldsymbol{D}$, m), volume ($\boldsymbol{V}$, m^3), the number of individuals ($\boldsymbol{n_i}$), the total crown area ($\boldsymbol{C_a}$, m^2), the total stem basal areal ($\boldsymbol{T}$, m^2), the total woody biomass ($\boldsymbol{m_w}$, gC.m^{-2}) and wood density ($\boldsymbol{\rho_w}$, between 0 and 1). The height of a shrub is a logarithmic function of its diameter (Eq. (11.a)) and its volume is represented by a cylinder (Eq. (11.b)). The shrub vegetation cover is defined as a function of the total stem basal area (Eq. (11.c)). With simple geometric relations (Eq. (11.d)) and assuming a fixed crown area ($\boldsymbol{C_a}$ become a constant) the system can be solved and all key variables expressed as a function of shrub woody biomass ($\boldsymbol{m_w}$) (the height is given by Eq. (11.e)). If the crown area is not fixed (e.g. with dynamical vegetation), there is no analytical solution to obtain the height.

a) $\boldsymbol{1/H = 1/(A \times D^{\gamma}) + 1/H_{max}}$
b) $\boldsymbol{V = \pi/4 \times \frac{H_{max} \times A \times D^{2+\gamma}}{H_{max} + A \times D^2}}$
c) $\boldsymbol{C_a = \beta \times T^{\alpha} = \beta \times (n_i \times \pi/4 \times D^2)^{\alpha}}$
d) $\boldsymbol{m_w = n_i \times V \times \rho_w}$ **and** $\boldsymbol{H = \frac{n_i \times V}{T}}$
e) $\mathbf{H} = \boldsymbol{\frac{m_w}{\rho_w \times \left(C_a/\beta\right)^{1/\alpha}}}$ **(11)**

Were $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{\beta}$, $\boldsymbol{\gamma}$, $\boldsymbol{\alpha}$ and $\boldsymbol{H_{max}}$ are parameters adapted from Martínez and López-Portillo (2003) (see Table 4). Here, the parameter $\boldsymbol{H_{max}}$ defining the maximal height (m) was optimized (see Sect. 2.6.1). To be in accordance with imposed vegetation coverage, a minimum woody vegetation height ($\boldsymbol{H_{min}}$, m) was prescribed, based on the maximum height, according to:

$$\boldsymbol{H_{min} = H_{max}/h_c} \quad \textbf{(12)}$$

Where $\boldsymbol{h_c}$ is a factor defined in Table 4. Based on the new shrub allometry description equations (Eq. (11)), new parameters can be derived for shrubs with the pipe tune model (Table 4).

2.3.2 Impact of shrubs on snow

Shrub vegetation affects snow cover through snow compaction and spatial heterogeneity of snow deposition. Shrub (and tree) branches support part of the snow cover. As a result, the snow weight on lower snow layers is smaller and the compaction of snow crystals is reduced. Moreover, wind is reduced by the presence of a shrub (and tree) canopy, which further reduces snow compaction compared to short vegetation cover. We kept the

original snow compaction equation in ORCHIDEE (Wang et al. (2013), their Eqs. (11), (12) and table A1) but chose new values for the parameters controlling compaction depending upon low or high vegetation (Table 3) in order to model a different depth and density over the fraction of a grid cell covered with shrubs (and tree).
Currently there is no sub-grid simulation of snow cover and energy balance in ORCHIDEE, so there is no distinction according to the fraction of different PFTs present in a grid cell. To account for differences between PFTs we compute snow compaction separately for short vegetation (bare soil, grass and NVP), shrubs and trees. The resulting average snow depth and density over a grid cell is obtained by weighting each vegetation-dependent compaction by its fraction. The deposition of snow is assumed to be the same among the different PFTs. A PFT dependent snow depth is needed to compute the protection of vegetation by snow (Sect. 2.3.3). To compensate for the lack of an explicit PFT dependent snow depth, an empirical correction is applied to account for the effect of vegetation type on snow compaction and deposition on shrubs:

$$\boldsymbol{d_{s\_v} = d_{s\_f} \times d_s}$$
$$\boldsymbol{d_{s\_f} = \begin{cases} 1 + f_v, & f_v \leq 0.5 \\ 2 - f_v, & f_v > 0.5 \end{cases}} \quad \textbf{(13)}$$

With $\boldsymbol{d_{s\_v}}$ the snow depth of high vegetation (shrubs and trees, m), $\boldsymbol{d_s}$ the average snow depth (m) over the grid-cell, and $\boldsymbol{d_{s\_f}}$ a function of $\boldsymbol{f_v}$, the fraction of high vegetation.

Parameters	Description	Original values	Ground vegetation (Bare soil, Grasses and NVPs)	High vegetation (Shrubs and Trees)
a_{sc}	Snow settling parameter (s^{-1})	2.8×10^{-6}	1.4×10^{-6}	4.2×10^{-6}
b_{sc}	Snow settling parameter (K^{-1})	0.04	0.02	0.06
c_{sc}	Snow settling parameter ($m^3.kg^{-1}$)	460	230	690
a_η	Snow Newtonian viscosity parameter (K^{-1})	0.081	0.0405	0.12
b_η	Snow Newtonian viscosity parameter ($m^3.kg^{-1}$)	0.018	0.009	0.027
η_0	Snow Newtonian viscosity parameter (Pa.s)	3.7×10^7	1.85×10^7	5.55×10^7

Table 3: Snow compaction parameters. Original values from Wang et al. (2013) and herbaceous and high vegetation values are choose to stay in the range value proposed by Wang et al. (2013).

2.3.3 Shrubs mortality reduced by snow protection

ORCHIDEE, when used to compute dynamically the vegetation distribution includes a tree mortality during extremely cold days, calculated as the percentage of biomass lost at the end of each day (see Zhu et al., 2015). This mortality depends on a minimum temperature, as defined in Eq. (14). We used the same equation than in Zhu et al. (2015) but boreal needleleaf trees are also assigned a critical minimum survival temperature.

$$\textbf{If } T_{min} < T_{min,crit},\ \boldsymbol{M_{ce} = k_{ce} \times (T_{min,crit} - T_{min})} \quad \textbf{(14)}$$

With $\boldsymbol{M_{ce}}$ the mortality rate due to cold extremes, $\boldsymbol{T_{min,crit}}$ the minimum critical survival temperature (defined for each PFT), $\boldsymbol{T_{min}}$ the daily minimum air temperature and $\boldsymbol{k_{ce}}$ a mortality coefficient. The values of these parameters are given in Table 4.

For shrubs we use a similar approach to control the loss of biomass due to extreme cold temperature. A mortality rate similar to Eq. (14) is applied to the highest parts of shrubs that are not covered by snow. For the part of shrubs situated inside snow layers (see 2.3.2, Eq. (13) for the shrubs snow depth calculation), snowpack temperature is used in Eq. (15). We defined a daily vertical profile of minimum temperature $\boldsymbol{T_{min}(z)}$ function of shrub height above ground (z), by linear interpolation between soil, snow layers and air temperatures above the shrub height emerging from the snow pack. To simulate the mortality of shrub parts being exposed to extreme cold, the following mortality equation is applied from the top part of shrubs.

$$M_{ce} = \int_{H_{min}}^{H} k_{ce} \cdot fn(T)\ dz$$
$$f_n(z) = \begin{cases} 0 & , T_{min} \geq T_{min\,crit} \\ T_{min\,crit} - T_{min}(z), & T_{min} < T_{min\,crit} \end{cases} \quad (15)$$

With M_{ce} the extreme cold mortality, $T_{min.crit}$ a minimum critical temperature (defined by PFT), k_{ce} a coefficient, H is the shrub height and H_{min} its minimum height (Eq. (12)). The values of the parameters of Eq. (15) for shrubs are given in Table 4. This equation is the integral of Eq. (14) applied to the height of shrubs.

2.3.4 Modification of roughness and albedo

In ORCHIDEE the surface roughness length is directly computed from the height of the vegetation. Similarly, surface albedo depends on the vegetation type. Because shrubs can be partially or entirely covered by snow, the computation of surface roughness and albedo in the presence of shrubs needs to take into account snow height. The calculation of surface roughness length has thus been modified. First vegetation height is computed separately for shrubs (using Eq. (11)) and for trees (using the original pipe tune model equation of Smith et al., 2001). The height of the snow cover over shrubs is then subtracted from the vegetation height in order to estimate the height of the vegetation above the snow surface (i.e. the relative height), which determines the surface roughness. The relative difference between the relative height and the total height is not substantial for trees (height > 5m), but it can be important for shrubs (> 30cm) which can be totally covered by snow. To represent the spatial heterogeneity of snow cover, when the snow thickness is close to the height of vegetation, a linear function is applied to estimate the height above snow:

$$H_{\mathrm{PFT_{as}}} = \begin{cases} H_{PFT} - d_s & , H_{PFT} > d_s \cdot (1 + \Delta_{z_0}) \\ 0 & , H_{PFT} < d_s \cdot (1 - \Delta_{z_0}) \\ (H_{PFT} - d_s\,(1 - \Delta_{zo}))/2, & \text{else} \end{cases} \quad (16)$$

Where H_{PFT} is the height of the PFT, H_{PFT_as} is the height of the PFT above the snow, d_s depth of snow, and Δ_{zo} the width of the transition zone due to spatial heterogeneity of snow cover (see Table 4).

To compute the roughness length z_0, for trees and shrubs the maximum fraction of vegetation $f_v = f_{v\_max}$ (prescribed if the vegetation cover is static, or calculated when the vegetation cover is dynamic, and independent of LAI) is used to take into account the influence of trunks and branches even if there are no leaves. For grasses and NVPs, only the projected surface of the foliage in the canopy $f_v = f_{v\_max}(1-e^{-LAI/2})$ is used because there is no woody elements. The rest of surface is considered as bare soil with a constant roughness length value.
Finally the roughness length of a given PFT is calculated as its height above snow multiplied by a roughness parameter z_{o_c}, as initially in ORCHIDEE. If this value is lower than the bare soil roughness (z_{0_bs} fixed), then the latter value is used. The grid cell mean roughness length is computed as a function of each PFT roughness weighted by the vegetation cover, f_v:

$$\log(z_0) = \sum_{PFT} \left(f_v \times \log\left(\max\left(\frac{H_{PFT\_as}}{z_{o\_c}}, z_{o\_bs} \right) \right) \right) \quad (17)$$

Where z_0 is the grid-cell averaged roughness (m), z_{0_bs} the roughness of the bare soil (m), f_v the fraction of each PFT and z_{0_c} a constant roughness parameter. The values of the parameters of Eq. (17) are given in Table 4.

The mean albedo of a grid cell depends on the vegetation, bare soil and snow albedo and their fractional coverage. While snow albedo is a function of snow age (computed for each vegetation type), bare soil and vegetation albedo are constant in time. A critical parameter to weigh the different terms is the fraction of the grid cell covered by snow, $snow_{frac}$, on bare soil and vegetation. In ORCHIDEE this fraction only depends on the snow mass, as defined in Chalita and Le Treut (1994). We chose to modify this approach in order to account for the effect of the vegetation structure as in Douville et al. (1995) and Boone (2002), using the roughness length calculated from Eq. (17) which is given by:

$$snow_{frac} = \frac{snow_{dz}}{snow_{dz} + \xi . z_0} \quad (18)$$

With $snow_{frac}$ the fraction of the grid covered by snow, $snow_{dz}$ the snow thickness, z_0 the roughness length and ξ a parameter (defined in Table 4).

2.3.5 Shrub parameters

Table 4 summarizes the main parameter values used in the equation described previously as well as few other parameters modified for the shrub PFT (compared to the initial tree PFT).

Allometry				
Parameters	**Description**	**Trees**	**Shrubs**	
		Pipe tune	Pipe tune (like trees)	Aiba and Kohyama (1996)**
A	Allometry constant	-	-	0.75
β	Allometry constant	40.0	8.0	Log(β) = 2.42
γ	Allometry constant	0.5	0.55	1.15
α	Allometry constant	100.0	216.9	0.8
δ	Allometry constant	1.6	1.6	-
H_{max} (m)	Maximum height	15	3.5 *	3.5 *
H_{f_dia} (0-1)	Maximum height used to compute the diameter	-	-	0.90
h_c	Minimum height factor	10	10	10
Other **Parameters**				
Parameters	**Description**	**Trees**	**Shrubs**	
k_{ce} (-)	Coefficient of mortality due to extreme coldness	0.04	0.04	
$T_{min,crit}$ (°C)	Minimum critical temperature	-45	-45	
z_{0_c} (m)	Roughness constant	16	16	
z_{0_bs} (m)	Roughness of the bare soil	0.01	0.01	
Δ_{zo} (-)	Width of the transition zone when d_s is around H_{PFT}	0.3	0.3	
ξ (-)	Snow fraction constant	5	5	
SLA ($m^2.gC^{-1}$)	Specific Leaf Area	2.6 10^{-2}	2.7 10^{-2} *	
LAI_{max} ($m^2.m^{-2}$)	Maximum Leaf Area Index	4.5	2.5 *	
$Vc_{max(25)}$ ($\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$)	Maximum rate of carboxylation at 25°C	45	38 *	
Residence Time (y)		80	32 *	
f_{g_resp} (0-1)	Fraction of GPP which is lost as growth respiration	0.28	0.59 *	

Table 4: Shrub parameters.

* Optimized parameter (see Sect. 2.6.1)

** Adapted from Martínez and López-Portillo, 2003

2.4 Cold climates C3-Grasses

We re-parameterized the grassland PFT for circumpolar regions, following the generic equations of C3 grasses. Few parameters have been calibrated (see list in Table 5) to modify primarily the photosynthetic activity, the root distribution in the soil and the leaf development.

The rate of carboxylation limited by Rubisco (V_c) and by electron transport (V_j) are dependent on specific parameters (following Yin and Struik (2009) and presented in Eq. (19)), themselves function of monthly mean temperature (t_m, K) (Eq. (20)).

$$F(T) = k_{25} \times e^{\frac{E_a(T-T_{25})}{T_{25} \cdot R \cdot T}} \times \frac{1+e^{\frac{T_{25} \cdot \Delta S - E_d}{T_{25} \cdot R}}}{1+e^{\frac{T \cdot \Delta S - E_d}{T \cdot R}}} \quad \textbf{(19)}$$

With F(T) the rate function V_c or V_j, k_{25} the maximum of each rate ($Vc_{\_max}$ or $Vj_{\_max}$) at a reference temperature T_{25} (25°C or 298 K; note that $Vc_{\_max}$ and $Vj_{\_max}$ are linked by a linear function being temperature dependent), T the current temperature (K), E_a the activation energy, E_d the deactivation energy, ΔS the entropy factor and R the ideal gas constant (Table 5).

The entropy factor ΔS for Vc_{max} or Vj_{max} is calculated as follows:

$$\Delta S = a + b \times t_m \quad \textbf{(20)}$$

With a and b two constants (Table 5). This formulation from Kattge and Knorr (2007) include an adaptation of seasonal growth temperature (derived from spatial relation between Vc_{max} and J_{max} in TRY database and extrapolated for temporal equations). Observations by Miller and Smith (2012) of the optimal temperature for photosynthesis for graminoids and forb tundra (10 to 20°C) were used to define new parameter values, which were then optimized (list of variable in Table 5). The optimization procedure is described in Sect. 2.6.1.

The depth over which 95% of the root is located corresponds roughly to 0.5 meter for boreal C3 grasses and to 1 meter for temperate C3 grasses, according to Bonan et al. (2003) or Iversen et al. (2015). Using this estimate we changed the a priori value of the root profile shape parameter (r_p parameter; see Eq. (5) and de Rosnay, 1999) for cold grasses and after optimization (see Table 5) we obtained that 95% of the roots are within the first 40 cm of the soil.

The specific leaf area (SLA) was also optimized for cold climate grasses, using as a priori the initial values from C3 temperate grasses. Note that for simplicity and because of their weak impact on simulation when the vegetation is fixed, we did not add survival or establishment limits as in Bonan et al., (2003) and Oleson et al. (2013) or a cumulated degree-day threshold (above zero criteria) for the development (Miller and Smith, 2012).

Parameters	Description	Original C3 grass	Boreal C3 grass
$Vc_{max(25)}$ (mol.m^{-2}.s^{-1})	Maximum rate of carboxylation at 25°C	70	40 *
E_a (J.mol^{-1})	Activation energy	71 513	71 513
E_d (J.mol^{-1})	Deactivation energy	200 000	200 000 *
a (J.mol^{-1}.K^{-1})	Entropy constant	668.39	668.39
b (J.mol^{-1}.K^{-1}.°C^{-1})	Entropy constant	-1.07	0.0 *
$J_{max(25)}$	Maximum rate of electron transport at 25°C		
E_a (J.mol^{-1})	Activation energy	49 884	49 884
E_d (J.mol^{-1})	Deactivation energy	200 000	200 000 *
a (J.mol^{-1}.K^{-1})	Entropy constant	659.7	659.7
b (J.mol^{-1}.K^{-1}.°C^{-1})	Entropy constant	-0,75	0 *
r_p (-)	Parameter to control root profile	4	5.6 *
SLA (m^2.gC^{-1})	Specific Leaf Area	2.6 x 10^{-2}	2.2 x 10^{-2} *
R (J.mol^{-1}.K^{-1})	Ideal gas constant	8.314	8.314

Table 5: Boreal C3 grasses parameters.

* Optimized parameter (see Sect. 2.6.1). Note that J_{max} and Vc_{max} parameters, namely E_d and b, were linked for the optimization.

2.5 Observations and vegetation distribution

2.5.1 Field survey data

The calibration of the parameters entering in the equations of NVP, shrubs and cold climate grasses is based on observations for the period 1993-2001 gathered in Peregon et al. (2008) and extended up to 2013 for this study. The data set contains georeferenced point-scale observations of the total summertime living biomass ($g.m^{-2}$) and annual net primary productivity NPP ($g.m^{-2}.yr^{-1}$) for non-vascular plants (mosses and lichens) and vascular plants (grasses and shrubs) in boreal wetlands. Test sites for field observations located in Western Siberia (Latitude 55° to 71° N, Longitude 63 to 91° E), which is suited for spatial analysis of NPP and biomass due to its flat topography along a wide latitudinal gradient and large variety of natural ecosystems, with minor anthropogenic influence.

At each test site, detailed geobotanical descriptions were recorded and biomass sampling was conducted. Sampling was repeated two or three times during the growing season at the same test sites for several consecutive years to obtain information on interannual variability. Field studies were conducted between June and October at more than 99% of the test sites, and between July and September for 90% of them. General descriptions of in-field and laboratory methods used to estimate NPP and biomass in wetlands are described in Peregon et al. (2008, 2016).

The data set takes into account all components of NPP and living biomass: above-, land-surface and belowground fractions measured in-situ at different topographical features (such as hummocks, hollows, ridges). In order to avoid the "bound" effect and use of values at the border between two vegetation classes, we chose to take into account only observation where the studied vegetation represented at least 10% of the surface. Spatial differences in these microsite characteristics (i.e. hydrologic and thermal regimes, nutrient availability) strongly determine vegetation characteristics, as well as NPP and biomass, and small-scale heterogeneity induced by these microsite characteristics can be as large as the large-scale variability due to climatic gradients across the area covered by the dataset. Because the small-scale variability cannot be represented in a large-scale model like ORCHIDEE, and small-scale information on microsite hydrological and topographical characteristics were not available, no perfect model-data fit can be expected and we should rather seek for a broad model-data agreement.

The data have therefore been grouped into supersites at 0.5° spatial resolution, giving 36 supersites. The 36 sites have data on mosses (comprising in total 1209 individual observations), but only 16 supersites presenting non-vascular plants, shrubs and grasses (comprising in total 660 individual observations) (Fig. 4).

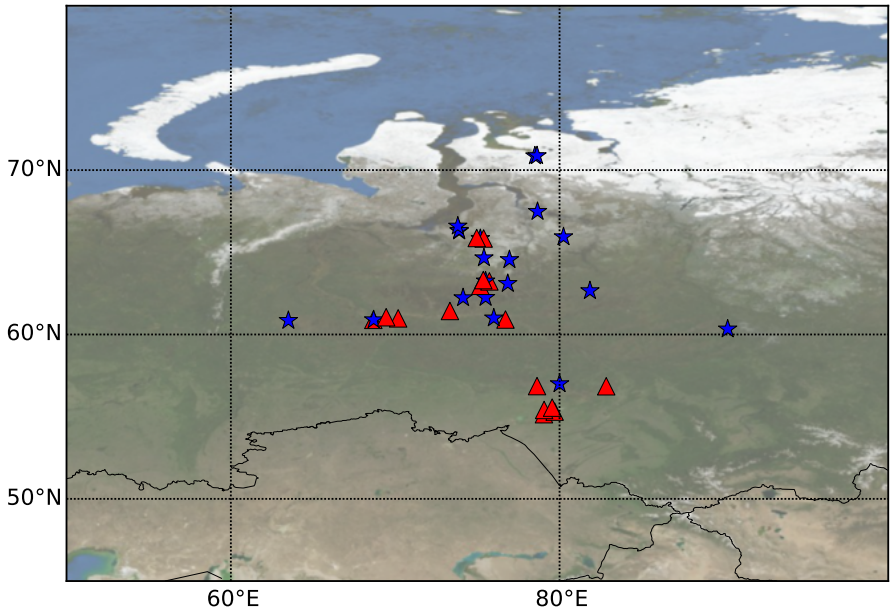


Figure 4: 36 sites of vegetation green biomass and Net Primary productivity (NPP). Triangles in red: sites with NVPs, grasses and shrubs at the same location, stars in blue: sites with only NVPs.

2.5.2 Vegetation distribution

For this study we prescribe the spatial distribution of the vegetation, while a follow-up study will focus on the dynamics of vegetation. We thus had to update the vegetation map used by the standard version of ORCHIDEE in order to include the spatial distribution of the new PFTs. The land cover product used to define PFT distribution in ORCHIDEE is derived from the land cover product of the European Space Agency (ESA) Climate Change Initiative (CCI) (available at http://www.esa-landcover-cci.org/). The product is based on medium–resolution satellite observation and provides information on the vegetation distribution using land cover classes (LCC) defined by the United Nations Land Cover Classification System (UNLCCS). In order to match the satellite land cover classes with the PFTs coverage in ORCHIDEE, we use a conversion table established by Poulter et al. (2015). Note that the climate classification system of Köppen (Peel et al., 2007) is also used to further partition some vegetation types into tropical, temperate and boreal zones (see also Poulter et al., 2015). The new vegetation map is thus obtained from this Land Cover dataset (version 1.6.1) transformed by conversion table from Poulter et al. (2015) (tool available from http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/), from 300m LCC data. From the standard conversion table used in ORCHIDEE, the three new PFTs were included using the following modifications:

i. The C3 grasses (initially defined globally) that were located in class 5 of Köppen classification (polar and alpine climates) were assigned to the new cold climate C3 grasses PFT.
ii. In the original version of the conversion table, LCCs were first separated between trees and shrubs (Table S1), then aggregated into trees PFTs. Here we kept the shrubs and trees separated to define the shrub PFT coverage.
iii. "Lichens and mosses" LCC were classified by Poulter et al. (2015) into C3 grasses and bare soil PFTs, and now are used to define a separate NVP PFT (Table S1). However the NVP coverage that corresponds to the lichens and mosses LCC is clearly underestimated with the CCI product over Eurasia compared to North America and to other pan-arctic land cover maps (i.e. in Cirumpolar Arctic Vegetation Map: CAVM Mapping Team et al., 2003), in which NVPs cover is much larger. In Loveland et al. (2000) map, we noticed that the tundra biome corresponds to the "sparse vegetation" or to the "lichens and mosses" LCCs distribution; in CAVM Mapping Team et al. (2003) the tundra biome is described as a composite of ~30 to 60% of NVPs. Combining these two maps with the ESA CCI LCC map, we modified the conversion of "sparse vegetation" LCC in the ESA CCI map, initially to 35% bare soil and 40% grass PFTs, into 20% of bare soil, 10% cold climate grass PFT and 45% of the NVP PFT (Table S1).

The resulting spatial distribution of is consistent with CAVM and Loveland et al, with 2.9, 2.2 and 2.8 millions km^2 of NVPs, shrubs and cold climate grasses, respectively, north of 60°N.

The distribution of the different circumboreal PFTs is presented in Fig. 5. NVPs are mainly present in northern latitudes where climate conditions for the other PFTs are too extreme. Shrubs are present everywhere in northern latitudes but sparsely, with the tree PFTs always dominating. This is due to the approach we chose, because shrubs are diagnosed from the same LCCs as trees, with a smaller fractional coverage (Table S1). The cold climate C3 grasses come mainly from boreal forest LCCs in northern latitudes and from meadows further south (Table S1). They are dominant only in the latter.

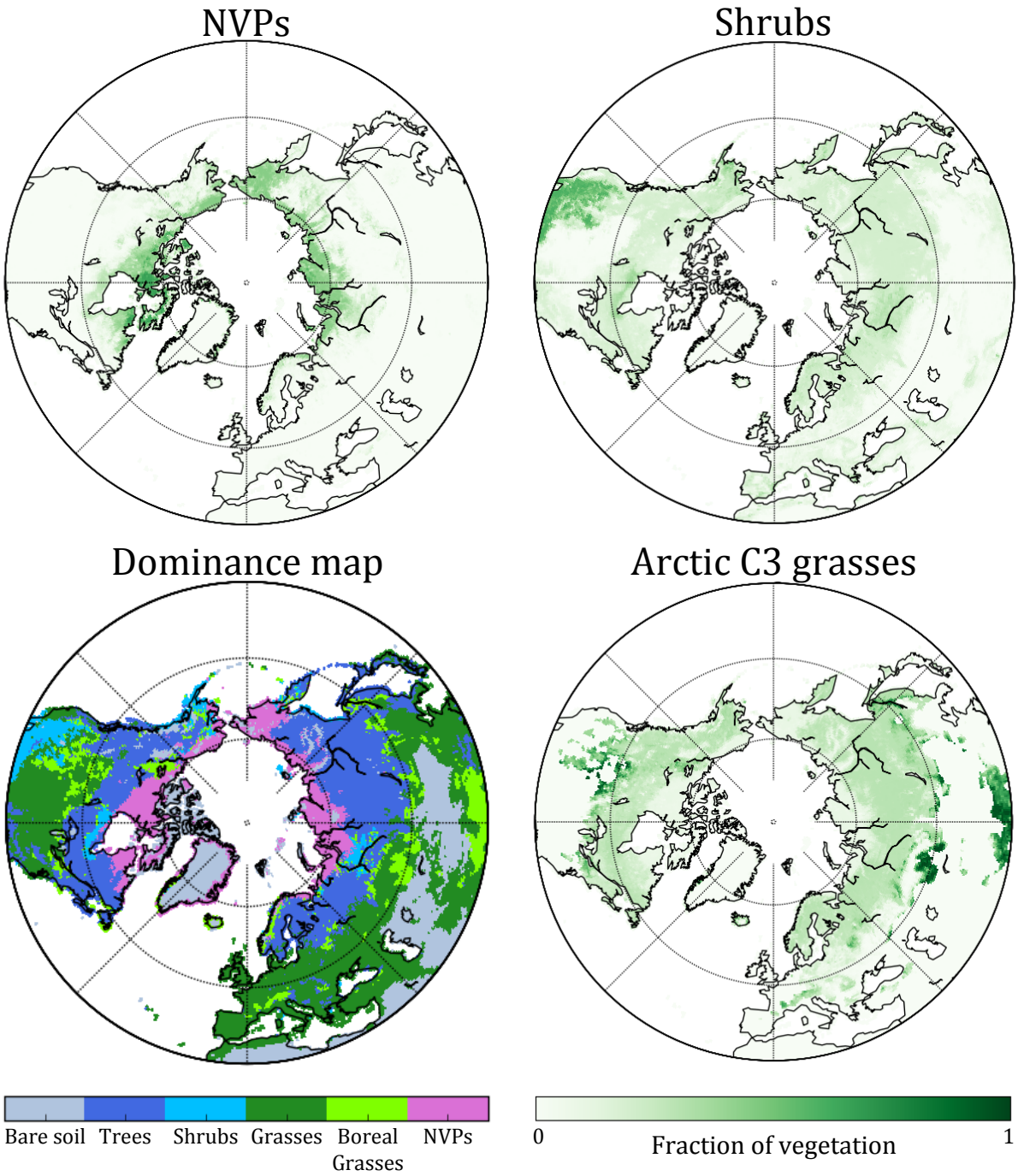


Figure 5: Map of new PFTs vegetation coverage and dominance.

2.6 Optimization strategy and evaluation protocol

2.6.1 Parameter optimization strategy

We used a Bayesian optimization procedure to optimize selected parameters of the new NVPs, shrubs and boreal C3 grass PFTs, where prior information on the parameter is combined with the information that can be extracted from an ensemble of observations (see Sect. 2.5.1). Assuming that the errors associated with the parameters, the observations and the model follow Gaussian distributions, the optimal parameter set corresponds to the minimum of a cost function, $J(\boldsymbol{x})$, that measures the mismatch between i) the observations ($\boldsymbol{y}$) and the

corresponding model outputs, *H(x),* (where *H* is the model operator), and ii) the a priori ($\boldsymbol{x_b}$) and optimized parameters ($\boldsymbol{x}$), weighted by their error covariance matrices (Tarantola, 1987; Eq. (21)):

$$\boldsymbol{J(x)} = \frac{1}{2}\left[(\boldsymbol{H(x)}-\boldsymbol{y})^{T}\,\mathbf{R}^{-1}\,(\boldsymbol{H(x)}-\boldsymbol{y}) + (\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x_b})^{T}\mathbf{B}^{-1}\,(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x_b})\right] \quad \textbf{(21)}$$

R represents the error variance/covariance matrix associated with the observations and **B** the parameter prior error variance/covariance matrix. Note that **R** includes the errors on the measurements, model structure and the meteorological forcing. Model errors are rather difficult to assess and may be much larger than the measurement error itself. Therefore we chose to focus on the structural error and defined the variances in **R** as the mean squared difference between the prior model and the observations (as in (Kuppel et al., 2013). For simplicity we assumed that the observation error covariances were independent between the different observations and therefore we kept **R** diagonal (off-diagonal terms set to zero).

The determination of the optimal parameter vector that minimizes *J(x)* is performed using a Monte Carlo approach based on a Genetic Algorithm (GA) following the implementation of Santaren et al. (2014). The algorithm works iteratively, starting with a pool of vectors of parameters (i.e. the chromosomes) defined from randomly perturbed parameters. At each iteration, it randomly perturbs or exchanges parameters of the chromosomes and ranks them based on the cost function values, so that the best chromosomes (parameter combinations corresponding to the lower cost function values) produce more descendants (following the principle of natural selection). For details of the implementation see Santaren et al. (2014). Note that this algorithm is more efficient to find the minimum of J than a gradient-based method as discussed in Bastrikov et al. (in preparation).

For each optimized parameter, the initial values were taken from the literature or from the values used for the ORCHIDEE boreal deciduous tree PFT for shrubs and from the C3 grasses PFT for NVPs and cold climate C3 grasses. We defined the observation errors (R diagonal) as 50 $gC.m^{-2}$ (1-sigma standard deviation) for the biomass and for NPP, based on field measurements errors (Peregon et al., 2008) and a priori model data mismatch. The number of iteration was set to 25 and the number of chromosomes to 15 for NVPs and 10 for C3 grasses and shrubs, after some initial check of the convergence of the algorithm. Note that in order to spin up the model with respect to the living biomass, each simulation starts 10 years before the observation period for NVPs and grasses, and 19 years for shrubs.

2.6.2 Evaluation Protocol

To illustrate the impact of new boreal vegetation compared to standard PFTs we show the results of two different simulations: one with the standard 13 PFTs of ORCHIDEE (ORC13) and the second with the new circumboreal PFTs (13 standards + 3 new PFTs: ORC16). Both simulations use the CRU-NCEP meteorological forcing (Wei et al., 2014; Viovy, 2015) based on gridded monthly observations from the Climatic Research Unit (CRU) at 0.5° and the climate re-analysis from the National Center for Environmental Prediction (NCEP) model (reduced to 2° resolution), available from 1901 to 2013. We spin up the model carbon pools (above and below ground) with a 5,000 years simulation recycling the forcing files from 1901 to 1950 randomly). We then used a transient simulation from 1901 to 2004 with linked CO_2 concentration. The spatial domain is also limited to the latitudes above 40° North.

First, the total biomass and NPP are evaluated against observations with extended data from Peregon et al. (2008). We then analyse other key variables (such as LAI, albedo, soil temperature, total evaporation, etc.) to provide further insight on the impacts on carbon, energy and water fluxes. The analysis is carried out on multiple spatial and temporal scales. Then, to evaluate the simulated LAI, we use the GLASS (Global Land Surface Satellite) LAI product (Liang et al., 2013; Xiao et al., 2014). This product has a temporal resolution of 8 days and is available from 1982 to 2012. Data used in this study cover the period from 2004 to 2013 and were derived from MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) land surface reflectance (MOD09A1), at a resolution of 1 km. In order to compare this GLASS product with our 2° resolution simulations, an extrapolated map of the 1 km resolution to the 2° resolution was built and a mask was applied to remove 2° resolution grid cells with a land fraction below 0.7.

3 Results

3.1 Model calibration and fit to the observations

Following the optimization protocol described in Sect. 2.6.1, we calibrated 12, 6 and 7 parameters for the NVPs, shrubs and cold climate grasses respectively (see list in Table 2, Table 4 and Table 5). The optimization relies on observations of living biomass and Net Primary Productivity observations presented in Sect. 2.5.1. First we should notice that the selected observations are characterized by a very large standard deviation (SD). For cold climate grasses the SDs of the observed total biomass and NPP are close to their mean values (total biomass = 558 ± 427 $gC.m^{-2}.y^{-1}$; NPP = 321 ± 222 $gC.m^{-2}$). For boreal shrubs the SDs are also very large (total biomass = 768 ± 432 $gC.m^{-2}.y^{-1}$; NPP = 321 ± 104 $gC.m^{-2}$), while for non-vascular plants they reach only half of the mean values (total biomass = 217 ± 105 $gC.m^{-2}.y^{-1}$; NPP = 117 ± 61 $gC.m^{-2}$). The cost function ($J(\mathbf{x})$ in Eq. (21)) was reduced, through the optimization and from prior parameter values, by 31% for NVPs, 64% for shrubs and 54% for boreal C3 grasses and the parameters were optimized within their physical range of variation (see values in Table 2, Table 4 and Table 5). All results that are discussed below were obtained with the optimized parameters set.

Figure 6 shows scatter plots of modelled versus observed living biomass and NPP for the new PFTs. The observations are grouped by bioclimatic zones, including forest-steppe in the south, different taiga ecosystems (south, middle and north), forest-tundra and tundra in the far north. For NVPs the model mean across all sites for biomass and NPP is close to the observed mean (see values in Fig. 6), but the cross-site spread is not well captured. In particular the model spread is too small, especially for the forest-steppe ecosystem, indicating that the current model structure cannot simulate the spatial variability that is observed between sites. Note also that for the forest-steppe region NPP and living biomass of NVPs are largely under-estimated, by more than 50 and 100 $gC.m^{-2}$, respectively. For cold climate C3 grasses the model spread is much smaller than the observation spread (for both NPP and biomass), although the model mean across all sites is relatively close to the observed value. In particular the model fails to represent the large NPP and biomass for the southern ecosystem (the forest-steppe), while for the other ecosystems it overestimates the NPP and slightly the biomass. For shrubs the results are relatively similar with also a too low model productivity for the forest-steppe ecosystem. Overall the model captures for each new PFT the mean across all observations but with a large bias for the southern bioclimatic region, where the low simulated values are probably due to a too large water stress in the model (possibly induced by the forcing file at 2° resolution, unable to reproduce local conditions).

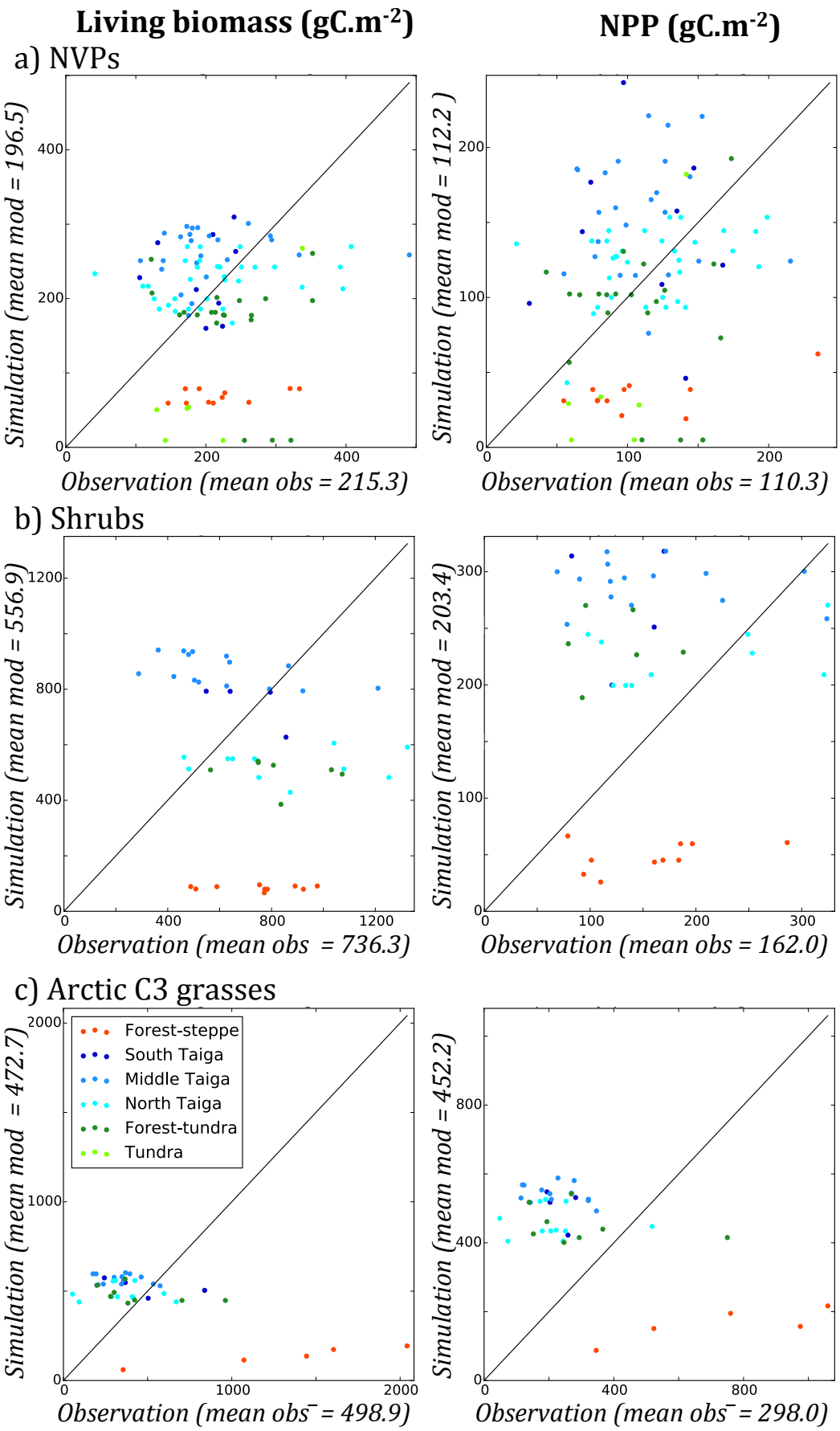


Figure 6: Model versus observed values for the total living biomass (left column) and the NPP (right column), for NVPs (a), shrubs (b) and cold climate grasses (c). The mean values across all sites and all years are displayed for the model and the observations. The colour indicates the associated bioclimatic zones.

We now compare the latitudinal gradient of NPP and biomass over the Central Siberian region shown in Fig. 4. Figure 7 displays model transects from 50°N to 74°N, with mean values calculated over the 78°E to 82°E longitudinal band and over the period 2004-2013, together with the observations aggregated by site (averaged for all year) for each new PFT.

The simulated NPP shows broadly a maximum between 57°N and 65°N for the three PFTs, with a decrease south of 57°N (by more than a factor two from 57°N to 55°N) and a more progressive decrease north of 65°N. For the NVPs the northern NPP decrease occurs only after 69°N. The observed values are broadly consistent within their uncertainties with the simulated latitudinal gradients for the selected region, although in absence of any observations north of 66°N for shrubs and boreal C3 grasses it is not possible to evaluate the slope of the northern decrease of the simulated productivity. For boreal C3 grasses, if we exclude two sites at 55°N and 67°N having much larger NPP, the other sites reveal a latitudinal pattern similar to the model one, although with smaller values. The simulated total living biomass follows similar latitudinal patterns for the three PFTs, with nevertheless higher biomass for shrubs between 57°N and 65°N due to wood accumulation. The biomass observations for NVPs display the same pattern than the model. For cold climate C3 grasses, even without considering the two sites with very large NPP, the observed living biomass is higher than the model ones despite the observed lower NPP (Fig. 7-left). It is probably due to large fraction of below-ground biomass of grasses. For shrubs, the model displays a maximum of biomass around 60°N for this region with large decrease at lower or higher latitudes, that is not directly supported by the set of available observations.

Overall, if the decrease of biomass productivity in the north can be explained by a decline of photosynthesis (due to more extreme conditions), the low value simulated south of 55°N can be attributed to water limitations (snowfall and rainfall are reduced by 30% in the region 50°N - 55°N compared to 60°N - 65°N), due to change of geographical (or bio-climatic) conditions. Note that two grassland sites that are very closely (65.8°N, 75.4°E and 65.9°N, 75.0°E) have very different NPP (750 $gC.m^{-2}$ and 187 $gC.m^{-2}$) and living biomass values (962 $gC.m^{-2}$ and 260 $gC.m^{-2}$), which illustrate the small-scale variability reported above that cannot be captured by the model.

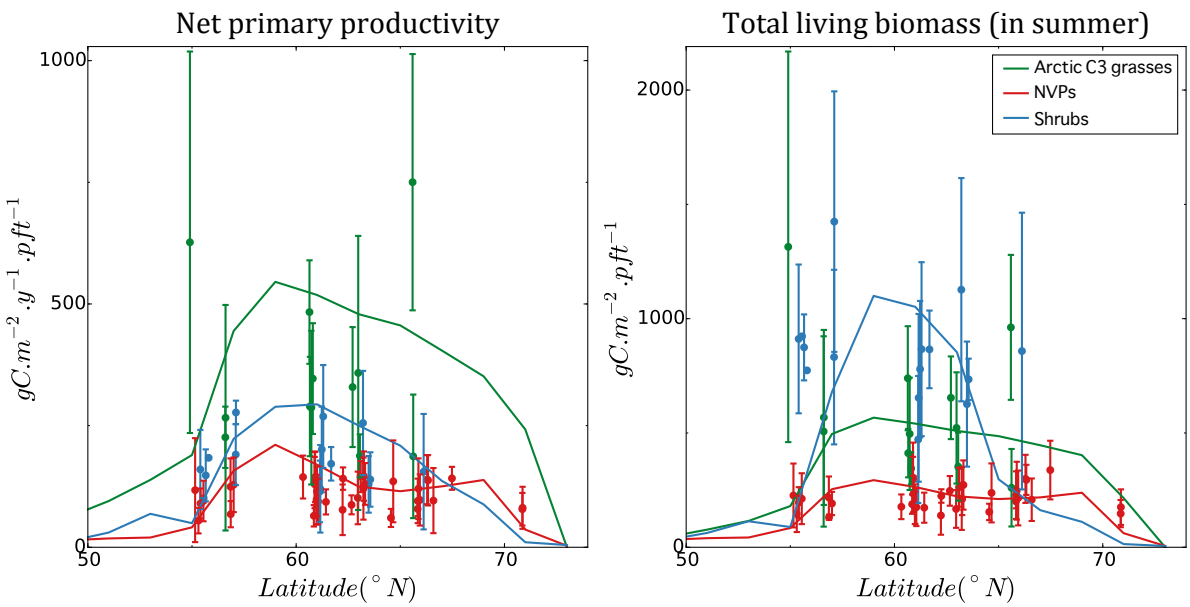


Figure 7: Latitudinal transects of the modelled and observed annual Net Primary Productivity and total living biomass in summer (July, August and September) for the new PFTs, namely boreal C3 grasses, non-vascular plants and shrubs. The simulated values are averaged over the longitudinal band 78°E - 82°E, and per latitudinal bands of 2 degrees, starting at 50°N.

3.2 Carbon fluxes and stocks of the new PFTs: spatiotemporal variations

We now analyse the carbon fluxes (the NPP) and the carbon stocks (July, August and September mean living biomass) obtained with a simulation over the whole boreal zone with the new PFTs (16 PFTs, referred as ORC16; see Fig. 5). The results are averaged over North America (-180°E to -60°E, without Greenland), Europe (-20°E to 40°E) and North Asia (40°E to 180°E) (in Figs. 8-10 and Fig. S1) and we only show the new PFTs (i.e., boreal C3 grasses, NVPs and shrubs) and the boreal broad leaf summergreen trees (from which shrubs are derived) results (expressed by square meter of each PFT).

Latitudinal gradients:

Figure 8 displays latitudinal transects of NPP and living biomass between 45°N and 82°N for each region (see Fig. S1 for the biomass of boreal broadleaved trees). On average we obtain a similar latitudinal gradient in terms of productivity and biomass for all PFTs, with roughly a maximum in North America around 52°N (with above a continuous decrease until 72°N) and in Asia around 58°N (with a decrease until 78°N) and with a plateau in Europe between 50°N and 70°N (follow by an abrupt decrease). The shape of these latitudinal gradients is primarily controlled by the climate, especially the precipitation and temperature gradients with a strong influence of the topography. For example in Asia the precipitation gradient increases from 45°N (less than 1 $mm.d^{-1}$) to a maximum around 55°N - 60°N (1.5 $mm.d^{-1}$) and then decreases again northward, while the mean air temperature (at 2m) decreases gradually from 45°N (around +7°C) to 75°N (-13°C). For this region the decrease of precipitation from 60°N to 45°N explains the decrease of NPP and biomass. In Europe the climatic conditions are on average more favourable (e.g. +5°C at 45°N to +10°C à 70°N) which explains the higher productivity and biomasses at high latitude (i.e. around 70°N).

Boreal C3 grasses have on average comparable living biomass but lower NPP than temperate C3 grasses in the southern latitudes where both PFTs are present. On the other hand NVPs always have a much lower productivity and living biomass than grasses (<50% lower). Despite the fact that the NVPs implementation is based on C3 grasses, we also notice that the latitudinal gradients of both productivity and living biomass differ between these two PFTs with smoother latitudinal variations for the NVPs than the boreal C3 grasses, illustrating also the importance of the added processes for the NVPs (resistances to extreme conditions, see Sect. 2.2.3 and 2.2.4). Similarly, shrubs systematically display a lower NPP (factor two) and much lower biomass (factor 20, Fig. S1) than the corresponding boreal deciduous summergreen trees although with similar latitudinal patterns. The reduced biomass accumulation for shrubs is controlled by the new allometry relations described in Sect. 2.3.1, a lower residence time (i.e. higher mortality) and a higher fraction of GPP lost as growth respiration (Sect. 2.3.5).

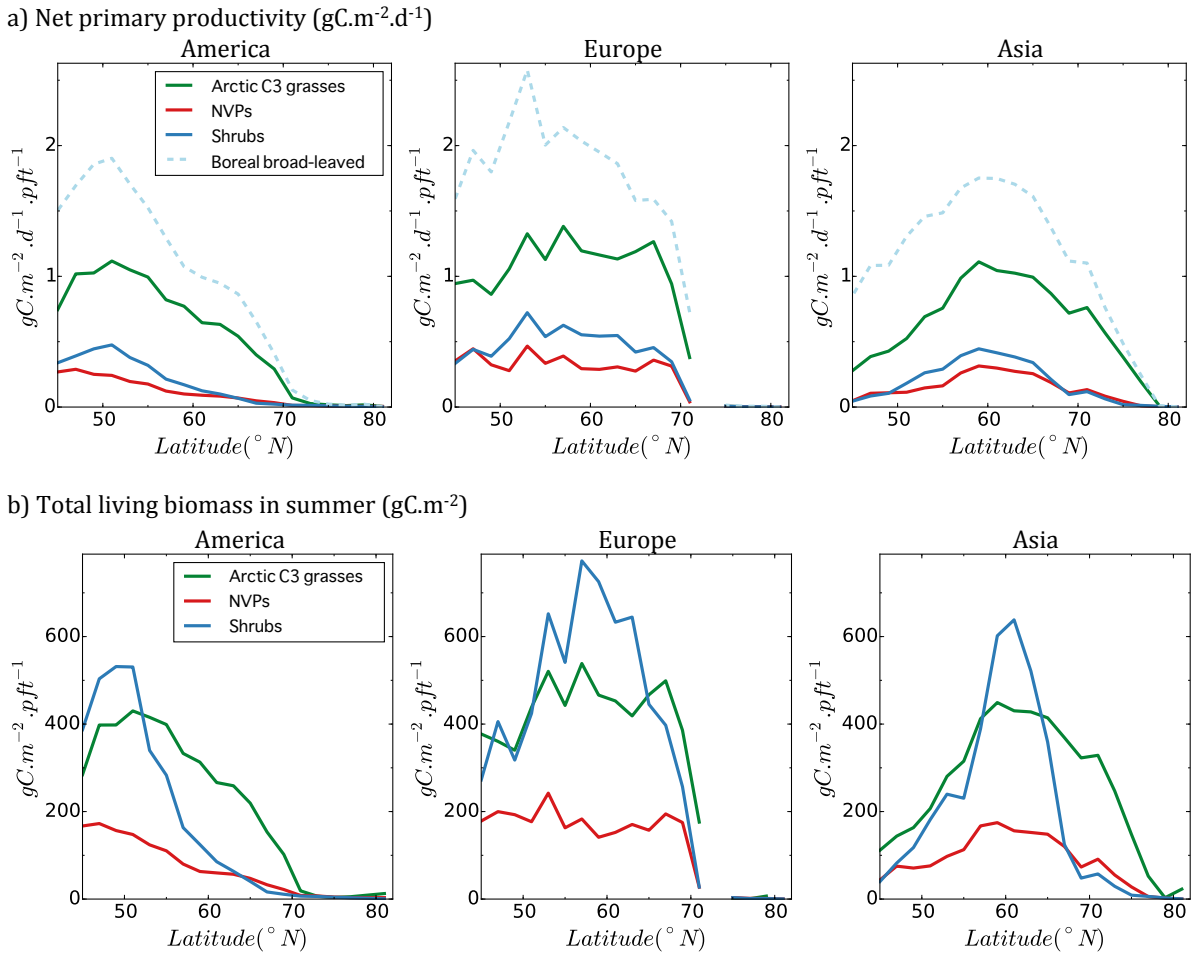


Figure 8: Latitudinal transects of the mean 2004-2013 net primary productivity (NPP) (a) and total living biomasses (b) of new PFTs (boreal C3 grasses, NVPs and boreal shrubs) and boreal broad-leaved tree (dashed, only in a), simulated in ORC16.

Temporal evolution:

Figure 9 shows the yearly time series from 1901 to present day for both NPP and living biomass, averaged north of 55°N, to illustrate the response of the vegetation to climate change. The simulated productivity increases on average for the three regions from 1950 to 2013 (Fig 9.a) by around 25% for boreal C3 grasses, 190% for NVPs and 80% for boreal shrubs (versus 35% for trees). The simulated biomass increases (Fig. 9.b or Fig. S1 with boreal trees) by the same proportion than the NPP for cold climate grasses and NVPs (respectively +25% and +200%), while for shrubs the increase is stronger (+140%). Note also that the biomass increase for shrubs is much larger than for boreal broad-leaved trees (+20%). Globally, the increase of both NPP and biomass over the last 60 years is substantial for all PFTs, but largest for non-vascular plants and shrubs (see number above), which are more sensitive to climate change and CO_2 increase in the model. Note that for shrubs, climate change at high northern latitudes has a direct impact on mortality in winter (Sect. 2.3.3): an increase of the minimum temperature implies a lower mortality. The combination of lower mortality and higher photosynthesis (due to temperature) in Europe, where the temperatures are substantially larger (up to +10°C compared to the other regions), explains the higher increase in simulated biomass and NPP. Note that because the model spin-up was done with climate forcing randomly taken from the period 1901 - 1950 (Sect. 2.6.2) we expect that the impact of climate change in the transient simulation would be small before 1950.

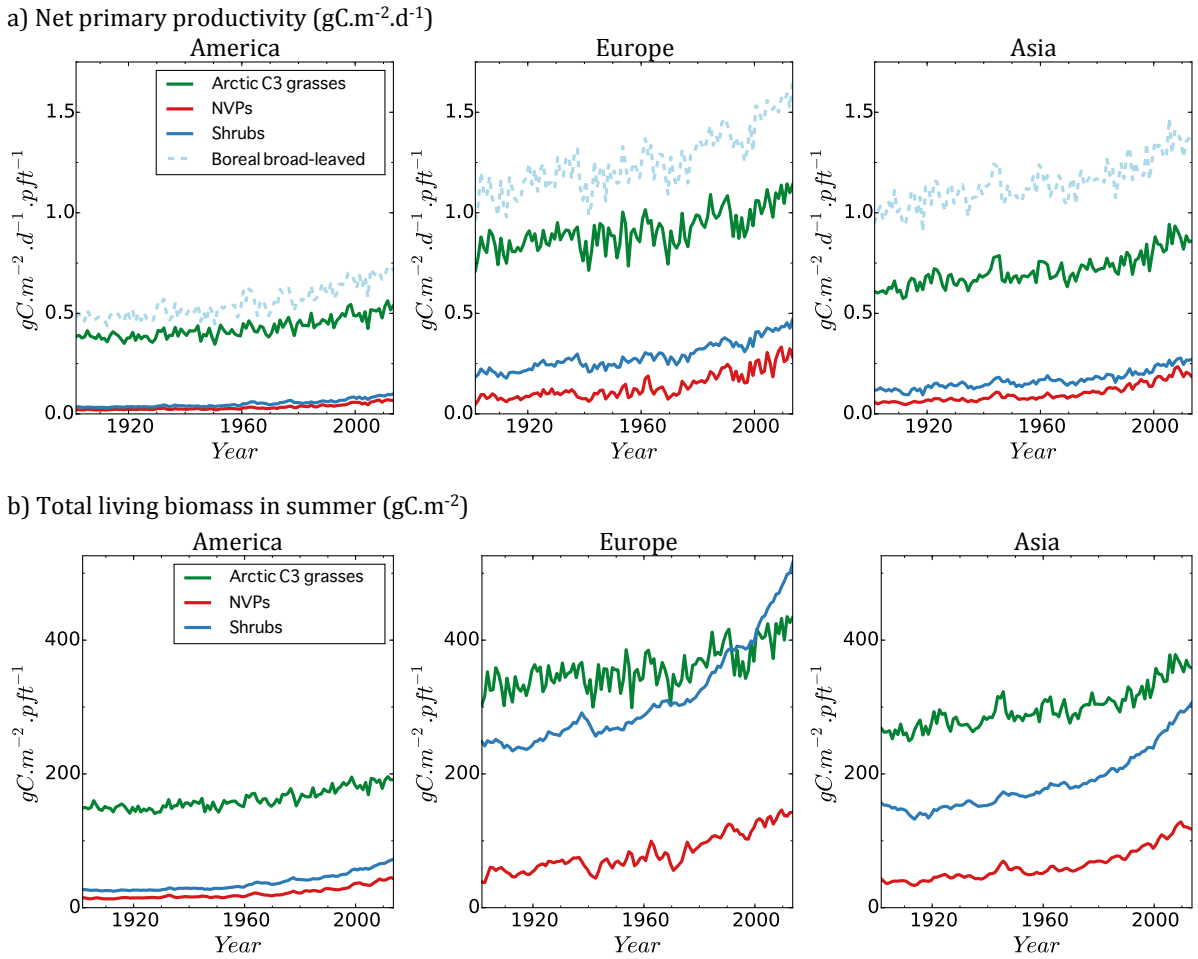


Figure 9: Time series from 1901 to 2013 and from 55°N of Net Primary Productivity (a) and total living biomass (b) of new PFTs (boreal C3 grasses, NVPs and boreal shrubs) and boreal broad-leaved tree (dashed, only in a).

Figure 10 displays the mean seasonal cycle of NPP for the three continental regions (mean over 2004-2013 and above 55°N). As expected, the growing season starts late spring with a sharp increase of the NPP up to July and then a slower decrease up to November, for all PFTs. The seasonality is slightly different for NVPs, for which the maximum is reached earlier (in June), with a small decrease over the summer (with sometimes locally a summer minimum in August) before the large decrease from September on. Such difference is due to the impact of desiccation during summer time (due to an increase of the water stress, see Sect. 2.2.4) that decreases the maximum potential photosynthesis rate. Finally only small differences in the timing of NPP occur between the three regions, with an earlier start in Europe (1 month), probably due to higher temperatures.

Note also that NPP starts slightly earlier in spring for NVPs than for the other boreal PFTs, especially in Europe (Fig. 10). Moreover, the impact of the global increase in temperature is large in spring and autumn, causing a lengthening of the boreal growing season. The vegetation that could make the best use of these temperature increases may thus get a larger benefit of climate change. This is the case for NVPs, which display an earlier start of the growing season in spring (from March in Europe or April elsewhere) and a later end of season in autumn (after October) (not shown). During these two periods, more than 20% of the annual increase in NPP (Fig. 9) for NVPs occurs, while there is almost no increase for other PFTs.

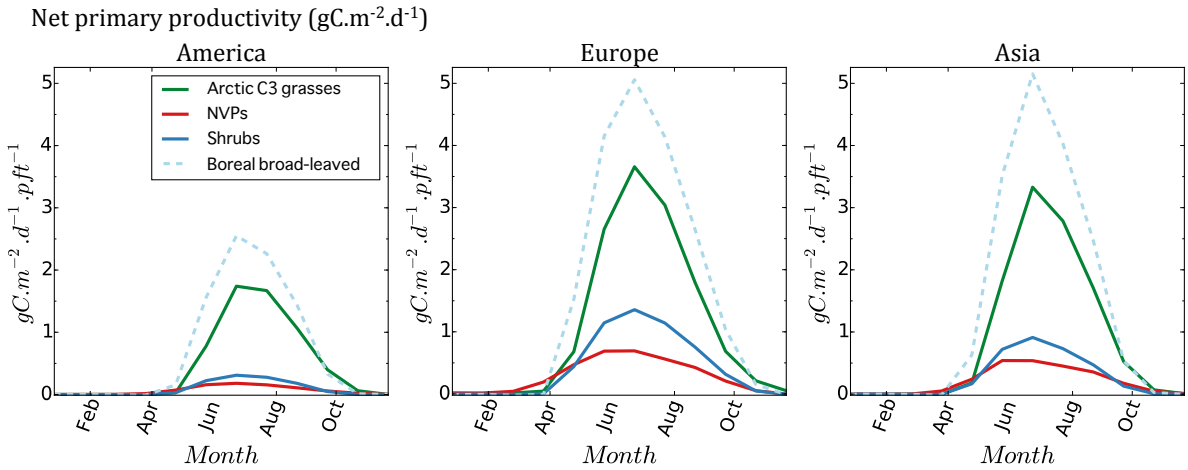


Figure 10: Inter-annual net primary productivity time series (mean 2004-2013) of new PFTs (boreal C3 grasses, NVPs and boreal shrubs) and boreal broad-leaved tree (dashed).

3.3 Evaluation of the simulated Leaf Area Index

Figure 11 displays the mean (over 2004-2013) boreal distributions of Leaf Area Index (LAI) in summer (July, August and September) simulated by ORCHIDEE with the new PFTs (ORC16) and from the GLASS LAI product (see Sect. 2.6.2). It also displays the differences between the simulated LAI (either with the new PFTs description, ORC16, or the old standard description, ORC13) and the GLASS product. Overall the main spatial patterns simulated with ORC16 match relatively well the patterns of the GLASS product with i) a latitudinal band with higher LAI around 60°N in Eurasia and below 60°N in northern America and ii) lower LAI at low latitudes in central Siberia and in above 65°N in Siberia and North America. However, too low LAI seems to be simulated in western Siberia. Comparison between GLASS product and the two model simulations (ORC16 and ORC13) indicates an overall improvement of the simulated LAI with the inclusion of the new boreal PFTs. A substantial decrease of LAI in Northern Europe (from 55°N), Northern-Western Siberia (from 55°N and until 135°E) and Northern America (from 50°N) is simulated in ORC16 compare to ORC13, which is in better accordance with GLASS product. These lower values in ORC16 are attributed, north of 65°N in Asia and America, to the introduction of NVPs in replacement of C3 grasses (Sect. 2.5.2) with lower LAI (see Sect. 3.2). In addition, the introduction of cold climate C3 grasses and shrubs with lower maximum LAI (e.g. 2.5 for shrubs against around 4 for tree PFTs) also contributes. Elsewhere, ORC16 and ORC13 simulations present on average similar LAI anomalies (mainly located in the south), except for Alaska and Eastern Siberia where ORC16 – GLASS anomalies are slightly more negative than with ORC13.

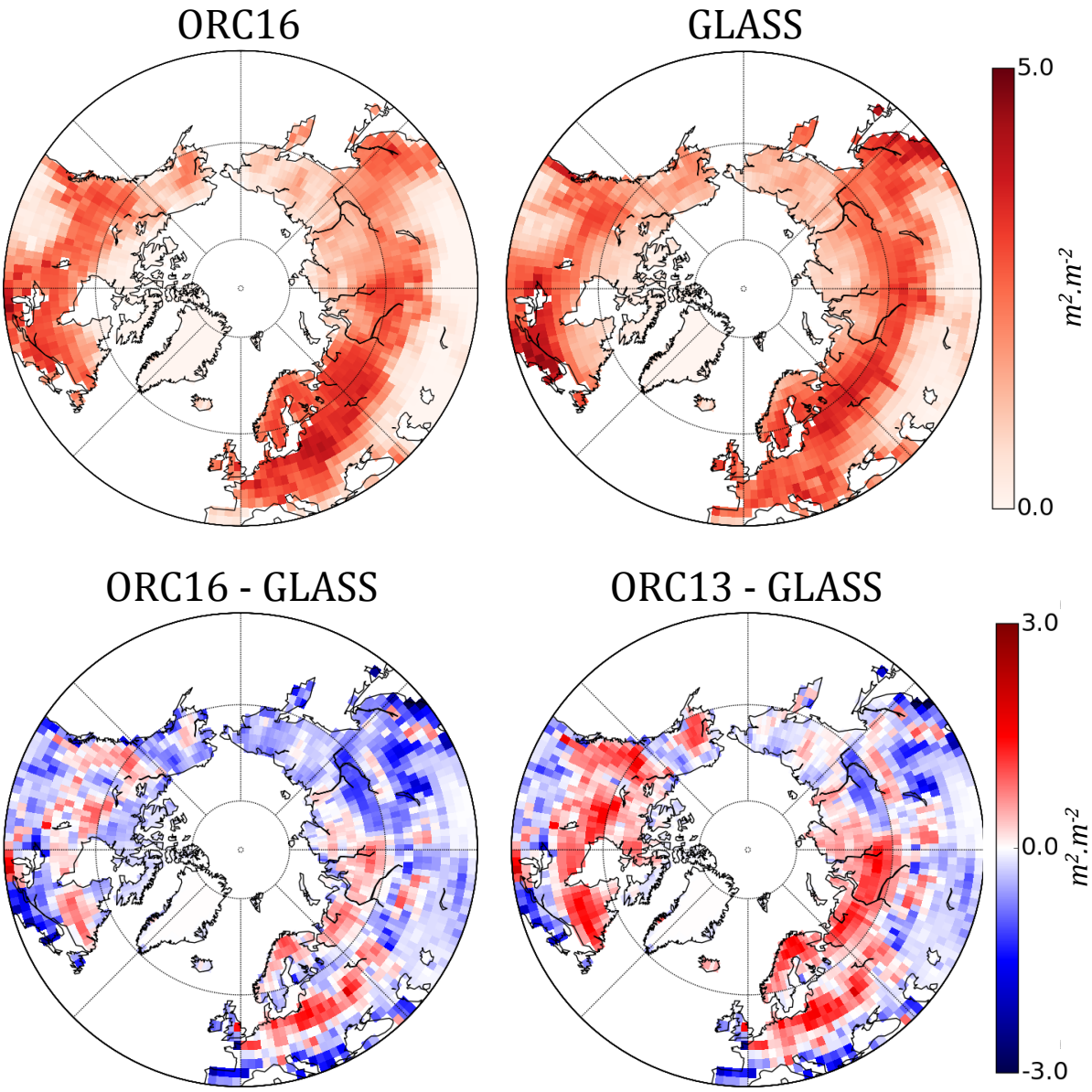


Figure 11: Global maps of leaf area index (LAI) in summer (mean of July, August and September between 2004 and 2013) simulated with the new PFTs (ORC16) and derived from satellite observations (GLASS product), as well as the difference between the simulation with the new PFTs or the old 13 PFTs (ORC16 and ORC13 respectively) and the GLASS product.

3.4 Biophysical impacts of the new boreal vegetation description

We now investigate the impacts of the new vegetation types on a few key variables related to the energy and water budgets (Fig. 12). The annual albedo shows a significant increase (up to 0.1) with the new boreal PFTs (ORC16) compared to the standard version (ORC13). The higher albedo occurs primarily in winter and early spring (see January and April in Fig. 12) in northern high latitudes (North of 60°N), whereas there is nearly no change during summertime and early autumn. If we consider the contribution from vegetation only (i.e. the mean albedo of the fraction of the grid covered by vegetation without the effect of snow cover and without bare soil) there is a small decrease with the new PFTs in most regions, except in northern-central Siberia. These changes are due to the LAI of the different PFTs that control the fraction of the grid effectively covered by the vegetation foliage. The higher vegetation albedo in ORC13 can be attributed to the larger values of the LAI for trees compared to shrubs and for temperate C3 grasses compared to cold climate C3 grasses. In the Siberian region,

the lower vegetation albedo in ORC13 occur in early spring, while higher values are present all year-round, due to changes in LAI with NVPs. Note that changing from a C3 deciduous grassland to an evergreen PFTs (i.e. the NVPs) impact the albedo even in winter time if the snow cover is not complete. Overall, the small changes of vegetation albedo and its dissymmetry with the changes in total albedo indicate that the substantial increase in the total albedo is linked to changes in the snow albedo and/or snow cover. The snow cover is controlled by the snow depth, the vegetation type and its roughness (see Sect. 2.3.4).

Roughness length is stable throughout the year and clearly decreases with the new vegetation types (up to -0.5 m, which represents at least a decrease of 25%, Fig. 12), due to height differences between trees and shrubs, the height being used to compute the roughness length (Eq. (17)). Contrariwise, the snow depth and albedo are not impacted by vegetation changes, because there is no difference between trees and shrubs concerning the snow compaction (described in Sect. 2.3.2). Given that roughness and snow depth contribute to the albedo through the fraction of snow on the vegetation (Eq. (18)), the modification of winter albedo is due mostly to roughness length changes.

As expected, transpiration is mainly affected during the summer period with much lower values (up to -0.5 $mm.d^{-1}$) in July around 60°N in West Eurasia and below 60°N in North America in the ORC16 simulation versus the ORC13 simulation. Crossing this information with the vegetation map, this is probably due to the replacement of trees by shrubs; shrubs have a lower leaf biomass, a lower photosynthesis rate (Figs. 8-10,12), and a lower roughness (Fig. 12, inducing less turbulent flow) leading to a lower transpiration. On the other hand, the introduction of NVPs, which have a higher stomatal conductance that could lead to an increase in transpiration, does not seem to have a major impact. However, if we focus on land surfaces North of 65°N (representing 11.2 millions km^2), the inclusion of the new PFTs slightly changes the components of the water budget. The inputs are identical between both simulations and the snowfall represents 53% of the total annual precipitation. The outputs represent respectively for ORC16 and ORC13 0.22 and 0.21 $mm.d^{-1}.m^{-2}$ for the runoff, 0.11 and 0.08 $mm.d^{-1}.m^{-2}$ for the drainage, 0.54 and 0.58 $mm.d^{-1}.m^{-2}$ for the evaporation, and 0.17 and 0.19 $mm.d^{-1}.m^{-2}$ for the sublimation. There is thus a slight decrease of evaporation (-6%) and sublimation (-11%) with the new boreal vegetation description, compensated for by an increase of the runoff (+4%) and drainage (+27%). The lower transpiration in summer simulated by ORC16 (up to $5mm.d^{-1}$, see Fig. 12) is less substantial during other seasons, and it could be partly compensated by bare soil evapotranspiration. Finally, the global water balance leads to an increase of runoff and drainage to 135 $km^3.y^{-1}$ (+10%) north of 65°N.

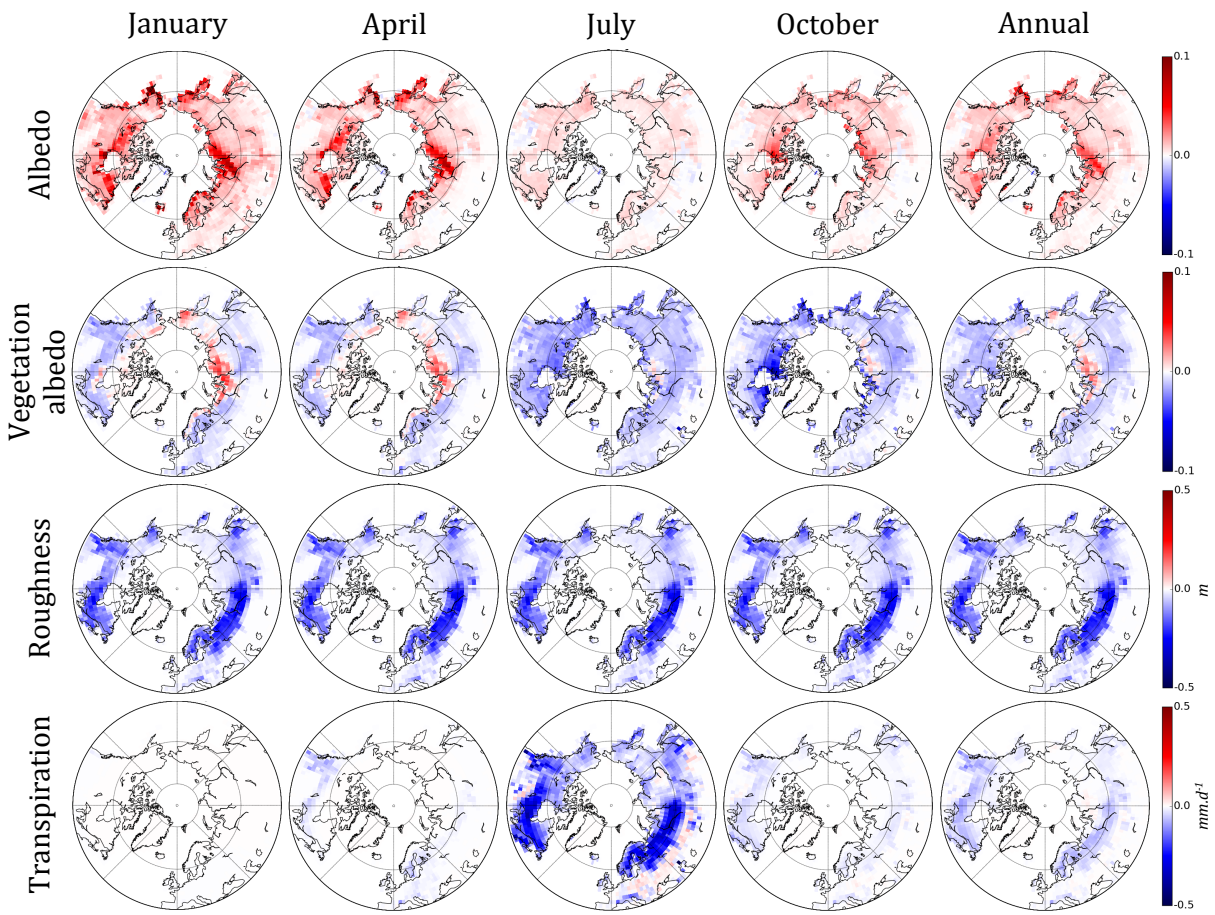


Figure 12: Maps of the differences between the simulation with 16 PFTs (ORC16 with new boreal PFTs) and the simulation with the 13 PFTs (ORC13 standard version), for albedo (total albedo and vegetation only without snow and bare soil contribution), roughness and transpiration for January, April, July, October, and the annual mean (mean over the period 2004 to 2013).

We finally investigate the impact of the new PFT description on the soil energy budget and more specifically the potential impact on the future reduction of the permafrost areas. Figure 13.a represents the thickness of the active layer, which corresponds to the maximum depth of the 0°C isotherm. The model represents the permanent frozen soil North of 50°N in North America and East Asia and North of 60°N elsewhere. Figure 13.b displays the change in active layer thickness with the new PFTs (ORC16). At its southern limit, the active layer thickness seems to increase on average and by up to 1 m in ORC16 compared to ORC13. To determine the role of each vegetation type, differences in the profiles of the annual soil temperature (mean over 2004-2013) are displayed in Fig. 13.c for three locations with different vegetation coverage. The profile at 169°E 63°N, selected for its high NVP coverage (40%), shows colder soil temperatures in the ORC16 simulation (-0,15 °C on average from the surface to 16 m), with warmest surface (0 to 1 m) temperature in winter (up to +0,25°C) and coldest surface temperature in summer (up to -0.7°C). This result indicates a lower surface conductivity, due to the insulation of the first centimeters of soil by NVPs (see Sect. 2.2.5). The 45°E 63°N profile was selected because of large differences between the ORC16 and ORC13 active layer thicknesses. It shows a higher soil temperature in the ORC16 simulation (+0.18 °C on average, with low seasonal variation) and corresponds to a low coverage by NVPs (3%). This higher temperature can be explained by a large fraction of the new shrubs and C3 cold climate grasses (> 50%) inducing a lower transpiration (Fig. 12). The reduction of transpiration in ORC16 leads in turn to a higher soil humidity and thus a higher thermal conductivity (see $\boldsymbol{C_{wet}}$ and $\boldsymbol{C_{dry}}$ values in Table 2). Finally, the 65°E 61°N profile was selected in some point where no active layer differences was noted. It includes 75% of new boreal PFTs from which 14% of NVPs and displays colder soil temperature in ORC16 up to 5 meters (although varying with depth), but similar temperature between ORC16 and OCR13 deeper into the soil (differences below 0.05°C on average).

Overall, the impact of the thermal insulation by NVPs seems to be compensated by an increase of soil humidity brought by the boreal PFTs. The active layer becomes deeper with the new boreal vascular plants (boreal C3 grasses and shrubs) due to higher soil conductivity, while the presence of NVPs decreases the active layer thickness with higher soil insulation. The coverage differences between NVPs and new vascular plant explains the global positive difference values in Fig 13.b.

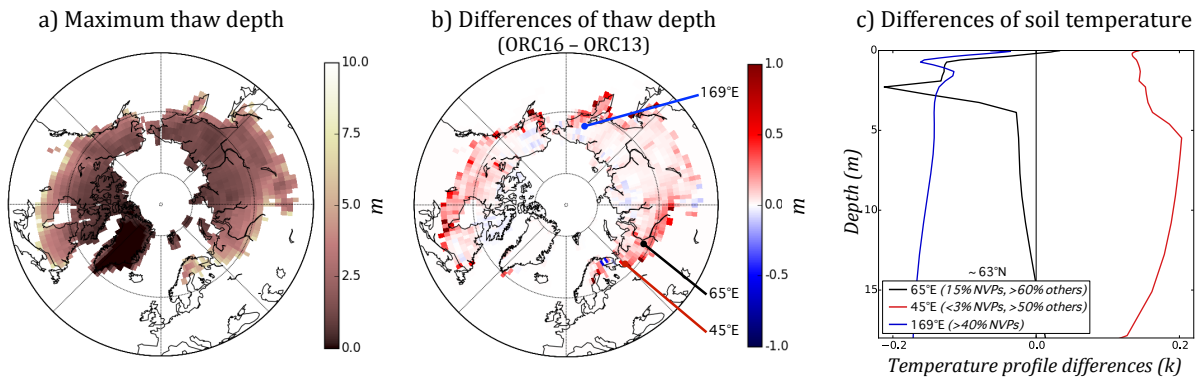


Figure 13: Map of a) the maximum thaw depth (i.e., the active layer thickness) for the simulation with 16 PFTs (ORC16); b) differences between ORC16 and the simulation with the 13 PFTs (ORC13) and c) soil temperature profile differences at three selected points (63°N and 45°E, 65°E and 169°E) between ORC16 and ORC13.

4 Summary and conclusions

4.1 Challenges associated to the description of new boreal vegetation

In this study we added non-vascular plants, boreal shrubs and boreal C3 grasses in the land surface scheme ORCHIDEE. While the implementation of boreal C3 grasses boils down to parameter changes (see Table 5), new key processes have been introduced for the other two PFTs:

- For shrubs, a new allometry was defined (compared to trees) in order to simulate a realistic vegetation height, which is further used to describe shrubs interactions with snow (Sect. 2.3).
- For NVPs, we opted for an "indirect" representation of their physiological functioning using the same process-representation as for vascular plants but with specific modifications (parameters and equations). A shallow root profile was chosen to represent the access to surface water. A large leaf water and CO_2 conductance was introduced to represent the lack of stomata. Additionally, a specific plant resistance to water stress, the impact of a NVPs on soil thermal properties and a modification of litter decomposition were implemented (Sect. 2.2).

In order to calibrate the main parameters of these new boreal PFTs, observations of net primary productivity and living biomass from Siberia were used (Sect. 2.5.1) with a standard Bayesian optimization procedure (see Sect. 2.6.1). Note that the large data spread (Figs. 6-7) due to large spatial variability at the scale of a few meters could not be represented by the model with a 2° climate forcing and no explicit representation of the underground vegetation (and competition) and edaphic conditions. Note that the better adequacy between the observations and the simulation for NVPs is partly due to more homogenous data.

Given the limitations discussed in the sections above, we suggest new developments to improve the realism of the simulated water, carbon and energy fluxes for the arctic region. First, it would be important to better represent the spatial heterogeneity of edaphic conditions, possibly with the use of topography information (i.e., to improve the water stress computation), and the vertical structure of the vegetation in coherence with light penetration and intra-canopy gradients of climate variables, as in Ryder et al. (2016). A more accurate vertical representation of the vegetation structure implies to introduce vegetation strata with the possibility to have under-storey vegetation, such as shrubs, grasses or NVPs under a tree canopy (e.g., in Frolking et al., 1996). Furthermore, it could be important to take into account the impact of other chemical components and processes, such as the availably of oxygen in the upper soil to represent anoxic conditions and of nitrogen to account for

possible limitation on plant productivity (Epstein et al., 2000; Bond-Lamberty and Gower, 2007; Goll et al., 2012; Koven et al., 2013), especially for NVPs. Thereby, extreme conditions would be more realistically simulated (such as for peatlands) avoiding the use of proxies for key environmental drivers (such as soil humidity for anoxic conditions). Concerning shrubs, we selected a boreal broad-leaved summergreen phenology, although in reality there is a mix of summergreen and evergreen needled-leaved shrubs. Given that the main changes introduced for the shrub PFT are linked to the allometry and the interaction with snow (Sect. 2.3), it should be straightforward to split this PFT into different types, as already done for trees (Table 1), with only a few varying parameters (such as phenology type, minimal critical temperature or $Vc_{max(25)}$). For other climatic regions than the Arctic, new processes may need to be added, such as root development for shrubs in savannahs. In a similar way we can split NVPs between lichens and mosses. Furthermore, to improve the dynamic of shrubs-snow interactions, it would be important to implement an energy balance and a snow mass balance for each PFT, separately. Thereby, the interactions between wind, snow deposition and compaction and vegetation structure could be integrated (McFadden et al., 2001). Finally, the implementation of other processes such as soil flooding (due to permafrost thawing for example) should be also considered as a crucial additional step.

4.2 Biogeochemical impacts of the new boreal vegetation

The overall biogeochemical behaviour of the new boreal PFTs is significantly different than that of the original PFTs. Cold climate grasses exhibit a lower productivity than the original C3 grasses because of their lower maximum rate of carboxylation ($\boldsymbol{Vc_{max(25)}}$, in Table 5), but a comparable biomass. NVPs globally have a lower productivity and biomass than temperate and boreal C3 grasses (Figs. 8-9), which is also explained by the low $\boldsymbol{Vc_{max(25)}}$ (respectively 70, 40 and 28 $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$). However, these lower mean values mask a better adaptation of NVPs to the northern latitudes, with higher productivity in spring and at the end of autumn (Fig. 10) and a decline in summer due to a water stress. Such adaptation arises from few specific processes implemented for the NVPs such as the resistance to desiccation or the adapted turnover, stomatal conductance and photosynthesis capacity. Shrubs also have a lower productivity and a much lower biomass than trees (Figs. 8-9) because of their lower LAI, new plant allometry and adapted mortality and respiration. Shrubs have an increased mortality induced by cold temperatures, but they are on the same time protected by snow (thermal protection; Eq. (15)). On the other hand, trees do not have this increased mortality with extreme temperature and it could be beneficial to include this effect when the vegetation is fixed, using for instance Eq. (14) that is only applied in ORCHIDEE when the vegetation cover is dynamicaly calculated (Krinner et al., 2005; Zhu et al., 2015).

Spatially, the northern limit of shrubs is situated further south than the northern limit of NVPs and cold climate grasses, as described in CAVM Mapping Team et al. (2003) and Loveland et al. (2000). Moreover, there are differences between the three boreal regions (North America, North Asia and Europe) due to climatic conditions: productivity and total living biomass decrease rapidly with latitude in Northern America, more slowly in Asia, while in Europe they remain at a high level far north (Fig. 8). Overall for the arctic regions, the total carbon flux is dominated by the prescribed vegetation distribution and more specifically by the fractions of trees and temperate grasses (Fig. 5). The inclusion of new boreal vegetation types decreases considerably the productivity, the total living biomass, and thus the LAI, which becomes more closer to satellite observations (GLASS product, Fig. 11) (Liang et al., 2013; Xiao et al., 2014). This implies that in previous simulations (and in particular those for the last IPCC report), considering vegetation without boreal shrubs and grasses might have induced a significant overestimation of biomass and productivity in northern latitudes.

As expected, the global increase of NPP, GPP and biomass over the last 60 years (Fig. 9) reveals the vegetation response to global warming and increased CO_2. This response is substantial, especially for NVPs and boreal shrubs and particularly for the accumulation of biomass. Thus in boreal regions the new PFTs are more sensitive to climate change than the original ones, implying that the standard ORCHIDEE version under-estimates the potential changes of vegetation biomass and productivity. In addition, shifts of vegetation are already observed (Frost and Epstein, 2014; Zhu et al., 2016) and must be taken into account in dynamical vegetation modelling.

Based on this study, we foresee several applications for the biogeochemical cycles. First, it is crucial to update the dynamic vegetation module of ORCHIDEE in order to account for and to calibrate the competition between all PFTs. This requires defining for instance the drivers of the competition between grasses and NVPs and

between shrubs and trees. Such developments will open the road for new studies of boreal vegetation changes, in the future or in the past, in liaison with climate changes. Second, the simulation of more realistic NPP and biomass in boreal landscapes could help to better simulate the dynamic of past boreal vegetation cover and boreal carbon stocks. For example, for the Last Glacial Period, it would enable a better estimation of carbon accumulation in the soil and thus of carbon stocks present in today's permafrost.

4.3 Biophysical impacts of the new boreal vegetation

As illustrated in the results section (Figs. 12-13), multiple impacts on the energy and water balance of boreal ecosystem occur with implementation of new PFTs in the ORCHIDEE model.
The changes in vegetation albedo result directly from changes in vegetation cover: in this study the vegetation map is prescribed and PFT-dependent albedo parameters are identical for cold climate grasses and NVPs / Shrubs and the corresponding standard PFTs (grasses / trees). Therefore, with its lower LAI, the new boreal vegetation induces a lower vegetation albedo (without snow cover), except in winter for areas where newly introduced evergreen NVPs are present. In contrast, the overall albedo increase (Fig. 12) does not seem directly impacted by the vegetation distribution. This depends on a combination of the local high vegetation albedo due to NVPs, and the decrease of roughness length, due to the substitution of a fraction of trees by shrubs (Sect. 2.5.2), which implies an increase of snow cover fraction (Eq. (18)).
The substitution of a fraction of trees by shrubs largely contributes to the summer transpiration decrease. The active layer thickness (Fig. 13) and permafrost extension are impacted by the NVPs through two competing effects. NVPs insulate the soil but also increase the soil thermal conductivity through an increase of soil humidity due to a global decrease of transpiration. Overall, we obtain a weak or negative impact of the new boreal vegetation implementation on the permafrost extent. This is at odds with results reported elsewhere (Soudzilovskaia et al., 2013; Chadburn et al., 2015). Further investigations are required to determine whether this is an artefact of our choice to replace the standard soil thermal capacity and conductivity by intermediate values between those from NVPs and mineral soil. One option would be to treat the NVPs as a layer with its own energy budget and thermal characteristic above the soil. Also note that, while the NVP heat conductivity and heat capacity used in this study are in accordance with other experiments (Soudzilovskaia et al., 2013; Chadburn et al., 2015), the average thickness of mosses in our simulation is lower than the one used in Chadburn et al. (2015), where it was fixed. Moreover, NVPs have an impact on the soil water dynamic, not well represented in ORCHIDEE. For example, in JULES Chadburn et al. (2015) chose to use a suction equation from Brooks and Corey (1964) to compute the plant water uptake and represent the "spongy" effect of NVPs. In ORC-HL-VEGveg1.0, three options were therefore considered: (1) increase the leaf interception and infiltrate part of this water into the soil, (2) limit the runoff in order to hold more water on the upper soil layers, or (3) increase the water retention by changing soil parameters controlling diffusion and drainage. However, given that in the current version of ORCHIDEE a unique soil water budget is performed for the entire herbaceous layer (no distinction between NVPs and grasses), it was not possible to represent the suction effect of NVPs more precisely. The water content of surface layers is thus probably underestimated and can impact the soil conductivity.
Overall, the total runoff and drainage above 65°N with the new vegetation increases by 11% with respect to the 13-PFT case, and reach around $140 km^{-3}.y^{-1}$ (see Sect. 3.4). Future replacement of NVPs and grasses by shrubs and trees could therefore counteract the direct effect of atmospheric CO_2 increase (i.e. decrease of transpiration) on Arctic river runoff (e.g. Gedney et al., 2006).

In this study we improved the description of boreal biophysical processes, but we did not consider the feedbacks between vegetation and climate. For example, the simulated increase of albedo, with the new boreal PFTs and new albedo formulation (Sect. 2.3.4), could reduce locally the surface air temperature and potentially impact the snow dynamic for instance. Moreover, the decrease of roughness length, due to the replacement of trees by shrubs (Sect. 2.3.1), will impact the exchange of momentum between the surface and the atmosphere and thus likely impact regional to large scale circulation patterns (e.g., Vautard et al., 2010). It is thus necessary to

evaluate all potential feedbacks between vegetation and climate with such improved description of boreal vegetation in the IPSL-CM earth system model (ORCHIDEE being the surface component).

Code availability

The code and the run environment of ORCHIDEE are open source (http://forge.ipsl.jussieu.fr/orchidee). Nevertheless readers interested in running the ORC-HL-VEGv1.0 version described in this paper can have access to the code (available at https://github.com/ArseneD/ORC-HL-VEG commit b74ae16) and are encouraged to contact the corresponding author for full details and practicality.

References:

Aiba, S.-I. and Kohyama, T.: Tree Species Stratification in Relation to Allometry and Demography in a Warm-Temperate Rain Forest, J. Ecol., 84(2), 207, doi:10.2307/2261356, 1996.

Ball, J. T., Woodrow, I. E. and Berry, J. A.: A Model Predicting Stomatal Conductance and its Contribution to the Control of Photosynthesis under Different Environmental Conditions, in Progress in Photosynthesis Research, edited by J. Biggins, pp. 221–224, Springer Netherlands, Dordrecht. [online] Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-94-017-0519-6_48 (Accessed 28 April 2016), 1987.

Bastrikov, V., MacBean, N., Peylin, P., Bacour, C., Santaren, D. and Kuppel, S.: Land surface model parameter optimisation using in-situ flux data: comparison of gradient-based versus random search algorithms, in preparation.

Baudena, M., Dekker, S. C., van Bodegom, P. M., Cuesta, B., Higgins, S. I., Lehsten, V., Reick, C. H., Rietkerk, M., Scheiter, S., Yin, Z., Zavala, M. A. and Brovkin, V.: Forests, savannas, and grasslands: bridging the knowledge gap between ecology and Dynamic Global Vegetation Models, Biogeosciences, 12(6), 1833–1848, doi:10.5194/bg-12-1833-2015, 2015.

Bentley, J. R., Seegrist, D. and Blakeman, D. A.: A technique for sampling low shrub vegetation, by cromwn volume classes, Res Note PSW-RN-215 Berkeley CA US Dep. Agric. For. Serv. Pac. Southwest For. Range Exp. Stn., 12, 1970.

Beringer, J., Lynch, A. H., Chapin, F. S., Mack, M. and Bonan, G. B.: The Representation of Arctic Soils in the Land Surface Model: The Importance of Mosses, J. Clim., 14(15), 3324–3335, doi:10.1175/1520-0442(2001)014<3324:TROASI>2.0.CO;2, 2001.

Best, M. J., Pryor, M., Clark, D. B., Rooney, G. G., Essery, R. . L. H., Ménard, C. B., Edwards, J. M., Hendry, M. A., Porson, A., Gedney, N., Mercado, L. M., Sitch, S., Blyth, E., Boucher, O., Cox, P. M., Grimmond, C. S. B. and Harding, R. J.: The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 1: Energy and water fluxes, Geosci. Model Dev., 4(3), 677–699, doi:10.5194/gmd-4-677-2011, 2011.

Blok, D., Heijmans, M. M. P. D., Schaepman-Strub, G., van Ruijven, J., Parmentier, F. J. W., Maximov, T. C. and Berendse, F.: The Cooling Capacity of Mosses: Controls on Water and Energy Fluxes in a Siberian Tundra Site, Ecosystems, 14(7), 1055–1065, doi:10.1007/s10021-011-9463-5, 2011a.

Blok, D., Schaepman-Strub, G., Bartholomeus, H., Heijmans, M. M. P. D., Maximov, T. C. and Berendse, F.: The response of Arctic vegetation to the summer climate: relation between shrub cover, NDVI, surface albedo and temperature, Environ. Res. Lett., 6(3), 35502, doi:10.1088/1748-9326/6/3/035502, 2011b.

Bonan, G. B.: Land-atmosphere CO_2 exchange simulated by a land surface process model coupled to an atmospheric general circulation model, J. Geophys. Res., 100(D2), 2817, doi:10.1029/94JD02961, 1995.

Bonan, G. B., Levis, S., Sitch, S., Vertenstein, M. and Oleson, K. W.: A dynamic global vegetation model for use with climate models: concepts and description of simulated vegetation dynamics, Glob. Change Biol., 9(11), 1543–1566, doi:10.1046/j.1365-2486.2003.00681.x, 2003.

Bond-Lamberty, B. and Gower, S. T.: Estimation of stand-level leaf area for boreal bryophytes, Oecologia, 151(4), 584–592, doi:10.1007/s00442-006-0619-5, 2007.

Bonfils, C. J. W., Phillips, T. J., Lawrence, D. M., Cameron-Smith, P., Riley, W. J. and Subin, Z. M.: On the influence of shrub height and expansion on northern high latitude climate, Environ. Res. Lett., 7(1), 15503, doi:10.1088/1748-9326/7/1/015503, 2012.

Boone, A.: Description du schema de neige ISBA-ES (Explicit Snow), Note Cent. Meteo-FranceCNRM, (70), 53, 2002.

Brooks, R. H. and Corey, A. T.: Hydraulic Properties of Porous Media, Colorado State University Hydrology Papers, Fort Collins, Colorado., 1964.

CAVM Mapping Team, Walker, D. A., Raynolds, M. K., Maier, H. A., Trahan, N. G. and U.S. Fish and Wildlife Service: Circumpolar Arctic vegetation, 2003.

Chadburn, S., Burke, E., Essery, R., Boike, J., Langer, M., Heikenfeld, M., Cox, P. and Friedlingstein, P.: An improved representation of physical permafrost dynamics in the JULES land-surface model, Geosci. Model Dev., 8(5), 1493–1508, doi:10.5194/gmd-8-1493-2015, 2015.

Chalita, S. and Le Treut, H.: The albedo of temperate and boreal forest and the Northern Hemisphere climate: a sensitivity experiment using the LMD GCM, Clim. Dyn., 10(4–5), 231–240, doi:10.1007/BF00208990, 1994.

Chapin, F. S., Mcguire, A. D., Randerson, J., Pielke, R., Baldocchi, D., Hobbie, S. E., Roulet, N., Eugster, W., Kasischke, E., Rastetter, E. B., Zimov, S. A. and Running, S. W.: Arctic and boreal ecosystems of western North America as components of the climate system, Glob. Change Biol., 6(S1), 211–223, doi:10.1046/j.1365-2486.2000.06022.x, 2000.

Chater, C., Gray, J. E. and Beerling, D. J.: Early evolutionary acquisition of stomatal control and development gene signalling networks, Curr. Opin. Plant Biol., 16(5), 638–646, doi:10.1016/j.pbi.2013.06.013, 2013.

Christensen, T. ., Jonasson, S., Callaghan, T. . and Havström, M.: On the potential CO2 release from tundra soils in a changing climate, Appl. Soil Ecol., 11(2–3), 127–134, doi:10.1016/S0929-1393(98)00146-2, 1999.

Clark, D. B., Mercado, L. M., Sitch, S., Jones, C. D., Gedney, N., Best, M. J., Pryor, M., Rooney, G. G., Essery, R. L. H., Blyth, E., Boucher, O., Harding, R. J., Huntingford, C. and Cox, P. M.: The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 2: Carbon fluxes and vegetation dynamics, Geosci. Model Dev., 4(3), 701–722, doi:10.5194/gmd-4-701-2011, 2011.

Clark, P. U., Dyke, A. S., Shakun, J. D., Carlson, A. E., Clark, J., Wohlfarth, B., Mitrovica, J. X., Hostetler, S. W. and McCabe, A. M.: The Last Glacial Maximum, Science, 325(5941), 710–714, doi:10.1126/science.1172873, 2009.

Colleoni, F., Krinner, G., Jakobsson, M., Peyaud, V. and Ritz, C.: Influence of regional parameters on the surface mass balance of the Eurasian ice sheet during the peak Saalian (140 kya), Glob. Planet. Change, 68(1–2), 132–148, doi:10.1016/j.gloplacha.2009.03.021, 2009.

Dimitrov, D. D., Grant, R. F., Lafleur, P. M. and Humphreys, E. R.: Modeling the effects of hydrology on gross primary productivity and net ecosystem productivity at Mer Bleue bog, J. Geophys. Res., 116(G4), doi:10.1029/2010JG001586, 2011.

Douville, H., Royer, J.-F. and Mahfouf, J.-F.: A new snow parameterization for the Météo-France climate model: Part I: validation in stand-alone experiments, Clim. Dyn., 12(1), 21–35, doi:10.1007/BF00208760, 1995.

Dyrness, C. T.: Control of depth to permafrost and soil temperature by the forest floor in black spruce/feathermoss communities, U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Portland, Or. [online] Available from: http://catalog.hathitrust.org/Record/007408209, 1982.

Epstein, H. E., Walker, M. D., Chapin, F. S. and Starfield, A. M.: A transient, nutrient-based model of artic plant community response to climatic warming, Ecol. Appl., 10(3), 824–841, doi:10.1890/1051-0761(2000)010[0824:ATNBMO]2.0.CO;2, 2000.

Farquhar, G. D. and Sharkey, T. D.: Stomatal Conductance and Photosynthesis, Annu. Rev. Plant Physiol., 33(1), 317–345, doi:10.1146/annurev.pp.33.060182.001533, 1982.

Farquhar, G. D., von Caemmerer, S. and Berry, J. A.: A biochemical model of photosynthetic CO2 assimilation in leaves of C3 species, Planta, 149(1), 78–90, doi:10.1007/BF00386231, 1980.

Frolking, S., Goulden, M. L., Wofsy, S. C., Fan, S.-M., Sutton, D. J., Munger, J. W., Bazzaz, A. M., Daube, B. C., Crill, P. M., Aber, J. D., Band, L. E., Wang, X., Savage, K., Moore, T. and Harriss, R. C.: Modelling temporal variability in the carbon balance of a spruce/moss boreal forest, Glob. Change Biol., 2(4), 343–366, doi:10.1111/j.1365-2486.1996.tb00086.x, 1996.

Frolking, S., Roulet, N. T., Moore, T. R., Richard, P. J. H., Lavoie, M. and Muller, S. D.: Modeling Northern Peatland Decomposition and Peat Accumulation, Ecosystems, 4(5), 479–498, doi:10.1007/s10021-001-0105-1, 2001.

Frost, G. V. and Epstein, H. E.: Tall shrub and tree expansion in Siberian tundra ecotones since the 1960s, Glob. Change Biol., 20(4), 1264–1277, doi:10.1111/gcb.12406, 2014.

Gallimore, R. G. and Kutzbach, J. E.: Role of orbitally induced changes in tundra area in the onset of glaciation, Nature, 381(6582), 503–505, doi:10.1038/381503a0, 1996.

Gedney, N., Cox, P. M., Betts, R. A., Boucher, O., Huntingford, C. and Stott, P. A.: Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records, Nature, 439(7078), 835–838, doi:10.1038/nature04504, 2006.

van Genuchten, M. T.: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils1, Soil Sci. Soc. Am. J., 44(5), 892, doi:10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x, 1980.

Goll, D. S., Brovkin, V., Parida, B. R., Reick, C. H., Kattge, J., Reich, P. B., van Bodegom, P. M. and Niinemets, ü.: Nutrient limitation reduces land carbon uptake in simulations with a model of combined carbon, nitrogen and phosphorus cycling, Biogeosciences, 9(9), 3547–3569, doi:10.5194/bg-9-3547-2012, 2012.

Gornall, J. L., Jónsdóttir, I. S., Woodin, S. J. and Van der Wal, R.: Arctic mosses govern below-ground environment and ecosystem processes, Oecologia, 153(4), 931–941, doi:10.1007/s00442-007-0785-0, 2007.

Gouttevin, I., Krinner, G., Ciais, P., Polcher, J. and Legout, C.: Multi-scale validation of a new soil freezing scheme for a land-surface model with physically-based hydrology, The Cryosphere, 6(2), 407–430, doi:10.5194/tc-6-407-2012, 2012.

Haig, D.: Filial mistletoes: the functional morphology of moss sporophytes, Ann. Bot., 111(3), 337–345, doi:10.1093/aob/mcs295, 2013.

Henderson-Sellers, A., McGuffie, K. and Pitman, A. J.: The Project for Intercomparison of Land-surface Parametrization Schemes (PILPS): 1992 to 1995:, Clim. Dyn., 12(12), 849–859, doi:10.1007/s003820050147, 1996.

Hugelius, G., Virtanen, T., Kaverin, D., Pastukhov, A., Rivkin, F., Marchenko, S., Romanovsky, V. and Kuhry, P.: High-resolution mapping of ecosystem carbon storage and potential effects of permafrost thaw in periglacial terrain, European Russian Arctic, J. Geophys. Res., 116(G3), doi:10.1029/2010JG001606, 2011.

Ito, A.: A historical meta-analysis of global terrestrial net primary productivity: are estimates converging?: A HISTORICAL META-ANALYSIS OF GLOBAL LAND NPP, Glob. Change Biol., 17(10), 3161–3175, doi:10.1111/j.1365-2486.2011.02450.x, 2011.

Iversen, C. M., Sloan, V. L., Sullivan, P. F., Euskirchen, E. S., McGuire, A. D., Norby, R. J., Walker, A. P., Warren, J. M. and Wullschleger, S. D.: The unseen iceberg: plant roots in arctic tundra, New Phytol., 205(1), 34–58, doi:10.1111/nph.13003, 2015.

Kaplan, J. O., Bigelow, N. H., Prentice, I. C., Harrison, S. P., Bartlein, P. J., Christensen, T. R., Cramer, W., Matveyeva, N. V., McGuire, A. D., Murray, D. F., Razzhivin, V. Y., Smith, B., Walker, D. A., Anderson, P. M., Andreev, A. A., Brubaker, L. B., Edwards, M. E. and Lozhkin, A. V.: Climate change and Arctic ecosystems: 2. Modeling, paleodata-model comparisons, and future projections, J. Geophys. Res., 108(D19), doi:10.1029/2002JD002559, 2003.

Kattge, J. and Knorr, W.: Temperature acclimation in a biochemical model of photosynthesis: a reanalysis of data from 36 species, Plant Cell Environ., 30(9), 1176–1190, doi:10.1111/j.1365-3040.2007.01690.x, 2007.

Kirkham, M. B.: Principles of soil and plant water relations., Ann. Bot., 96(3), 499–500, doi:10.1093/aob/mci202, 2005.

Koven, C. D., Ringeval, B., Friedlingstein, P., Ciais, P., Cadule, P., Khvorostyanov, D., Krinner, G. and Tarnocai, C.: Permafrost carbon-climate feedbacks accelerate global warming, Proc. Natl. Acad. Sci., 108(36), 14769–14774, doi:10.1073/pnas.1103910108, 2011.

Koven, C. D., Riley, W. J., Subin, Z. M., Tang, J. Y., Torn, M. S., Collins, W. D., Bonan, G. B., Lawrence, D. M. and Swenson, S. C.: The effect of vertically-resolved soil biogeochemistry and alternate soil C and N models on C dynamics of CLM4, Biogeosciences Discuss., 10(4), 7201–7256, doi:10.5194/bgd-10-7201-2013, 2013.

Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S. and Prentice, I. C.: A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system: DVGM FOR COUPLED CLIMATE STUDIES, Glob. Biogeochem. Cycles, 19(1), n/a-n/a, doi:10.1029/2003GB002199, 2005.

Kuppel, S., Chevallier, F. and Peylin, P.: Quantifying the model structural error in carbon cycle data assimilation systems, Geosci. Model Dev., 6(1), 45–55, doi:10.5194/gmd-6-45-2013, 2013.

Lawrence, D. M. and Slater, A. G.: A projection of severe near-surface permafrost degradation during the 21st century, Geophys. Res. Lett., 32(24), doi:10.1029/2005GL025080, 2005.

Liang, S., Zhao, X., Liu, S., Yuan, W., Cheng, X., Xiao, Z., Zhang, X., Liu, Q., Cheng, J., Tang, H., Qu, Y., Bo, Y., Qu, Y., Ren, H., Yu, K. and Townshend, J.: A long-term Global LAnd Surface Satellite (GLASS) data-set for environmental studies, Int. J. Digit. Earth, 6(sup1), 5–33, doi:10.1080/17538947.2013.805262, 2013.

Loveland, T. R., Reed, B. C., Brown, J. F., Ohlen, D. O., Zhu, Z., Yang, L. and Merchant, J. W.: Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data, Int. J. Remote Sens., 21(6–7), 1303–1330, doi:10.1080/014311600210191, 2000.

Lufafa, A., Diédhiou, I., Ndiaye, N. A. S., Séné, M., Kizito, F., Dick, R. P. and Noller, J. S.: Allometric relationships and peak-season community biomass stocks of native shrubs in Senegal's Peanut Basin, J. Arid Environ., 73(3), 260–266, doi:10.1016/j.jaridenv.2008.09.020, 2009.

Martínez, A. J. and López-Portillo, J.: Allometry of *Prosopis glandulosa* var. *torreyana* along a topographic gradient in the Chihuahuan desert, J. Veg. Sci., 14(1), 111–120, doi:10.1111/j.1654-1103.2003.tb02133.x, 2003.

McFadden, J. P., Liston, G. E., Sturm, M., Pielke, R. A. and Chapin, F. S.: Interactions of shrubs and snow in arctic tundra: measurements and models, IAHS Publ, (270), 317–325, 2001.

Meissner, K. J., Weaver, A. J., Matthews, H. D. and Cox, P. M.: The role of land surface dynamics in glacial inception: a study with the UVic Earth System Model, Clim. Dyn., 21(7–8), 515–537, doi:10.1007/s00382-003-0352-2, 2003.

Miller, P. A. and Smith, B.: Modelling Tundra Vegetation Response to Recent Arctic Warming, AMBIO, 41(S3), 281–291, doi:10.1007/s13280-012-0306-1, 2012.

Moyano, F. E., Vasilyeva, N., Bouckaert, L., Cook, F., Craine, J., Curiel Yuste, J., Don, A., Epron, D., Formanek, P., Franzluebbers, A., Ilstedt, U., Kätterer, T., Orchard, V., Reichstein, M., Rey, A., Ruamps, L., Subke, J.-A., Thomsen, I. K. and Chenu, C.: The moisture response of soil heterotrophic respiration: interaction with soil properties, Biogeosciences, 9(3), 1173–1182, doi:10.5194/bg-9-1173-2012, 2012.

de Noblet, N. I., Prentice, I. C., Joussaume, S., Texier, D., Botta, A. and Haxeltine, A.: Possible role of atmosphere-biosphere interactions in triggering the Last Glaciation, Geophys. Res. Lett., 23(22), 3191–3194, doi:10.1029/96GL03004, 1996.

O'Donnell, J. A., Romanovsky, V. E., Harden, J. W. and McGuire, A. D.: The Effect of Moisture Content on the Thermal Conductivity of Moss and Organic Soil Horizons From Black Spruce Ecosystems in Interior Alaska:, Soil Sci., 174(12), 646–651, doi:10.1097/SS.0b013e3181c4a7f8, 2009.

Oleson, K., Lawrence, D., Bonan, G., Drewniak, B., Huang, M., Koven, C., Levis, S., Li, F., Riley, W., Subin, Z., Swenson, S., Thornton, P., Bozbiyik, A., Fisher, R., Heald, C., Kluzek, E., Lamarque, J.-F., Lawrence, P., Leung, L., Lipscomb, W., Muszala, S., Ricciuto, D., Sacks, W., Sun, Y., Tang, J. and Yang, Z.-L.: Technical description of version 4.5 of the Community Land Model (CLM), , doi:10.5065/D6RR1W7M, 2013.

Parton, W. J., Stewart, J. W. B. and Cole, C. V.: Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model, Biogeochemistry, 5(1), 109–131, doi:10.1007/BF02180320, 1988.

Peel, M. C., Finlayson, B. L. and McMahon, T. A.: Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, Hydrol. Earth Syst. Sci., 11(5), 1633–1644, doi:10.5194/hess-11-1633-2007, 2007.

Peregon, A., Maksyutov, S., Kosykh, N. P. and Mironycheva-Tokareva, N. P.: Map-based inventory of wetland biomass and net primary production in western Siberia: WETLAND BIOMASS AND NPP INVENTORIES, J. Geophys. Res. Biogeosciences, 113(G1), n/a-n/a, doi:10.1029/2007JG000441, 2008.

Peregon, A., Kosykh, N. P., Mironycheva-Tokareva, N. P., Ciais, P. and Yamagata, Y.: Estimation of Biomass and Net Primary Production (NPP) in West Siberian Boreal Ecosystems: In Situ and Remote Sensing Methods, in Novel Methods for Monitoring and Managing Land and Water Resources in Siberia, edited by L. Mueller, A. K. Sheudshen, and F. Eulenstein, pp. 233–252, Springer International Publishing, Cham. [online] Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-24409-9_8 (Accessed 28 June 2016), 2016.

Porada, P., Weber, B., Elbert, W., Pöschl, U. and Kleidon, A.: Estimating global carbon uptake by lichens and bryophytes with a process-based model, Biogeosciences, 10(11), 6989–7033, doi:10.5194/bg-10-6989-2013, 2013.

Poulter, B., MacBean, N., Hartley, A., Khlystova, I., Arino, O., Betts, R., Bontemps, S., Boettcher, M., Brockmann, C., Defourny, P., Hagemann, S., Herold, M., Kirches, G., Lamarche, C., Lederer, D., Ottlé, C., Peters, M. and Peylin, P.: Plant functional type classification for earth system models: results from the European Space Agency's Land Cover Climate Change Initiative, Geosci. Model Dev., 8(7), 2315–2328, doi:10.5194/gmd-8-2315-2015, 2015.

de Rosnay, P.: Représentation de l'interaction sol-végétation-atmosphère dans le Modèle de Circulation Générale du Laboratoire de Météorologie Dynamique., Physique, Université Paris 6., Paris., 1999.

de Rosnay, P., Polcher, J., Bruen, M. and Laval, K.: Impact of a physically based soil water flow and soil-plant interaction representation for modeling large-scale land surface processes: PHYSICALLY BASED SOIL HYDROLOGY IN GCM, J. Geophys. Res. Atmospheres, 107(D11), ACL 3-1-ACL 3-19, doi:10.1029/2001JD000634, 2002.

Ruszala, E. M., Beerling, D. J., Franks, P. J., Chater, C., Casson, S. A., Gray, J. E. and Hetherington, A. M.: Land Plants Acquired Active Stomatal Control Early in Their Evolutionary History, Curr. Biol., 21(12), 1030–1035, doi:10.1016/j.cub.2011.04.044, 2011.

Ryder, J., Polcher, J., Peylin, P., Ottlé, C., Chen, Y., van Gorsel, E., Haverd, V., McGrath, M. J., Naudts, K., Otto, J., Valade, A. and Luyssaert, S.: A multi-layer land surface energy budget model for implicit coupling with global atmospheric simulations, Geosci. Model Dev., 9(1), 223–245, doi:10.5194/gmd-9-223-2016, 2016.

Santaren, D., Peylin, P., Bacour, C., Ciais, P. and Longdoz, B.: Ecosystem model optimization using in situ flux observations: benefit of Monte Carlo versus variational schemes and analyses of the year-to-year model performances, Biogeosciences, 11(24), 7137–7158, doi:10.5194/bg-11-7137-2014, 2014.

Schuur, E. A. G., McGuire, A. D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J. W., Hayes, D. J., Hugelius, G., Koven, C. D., Kuhry, P., Lawrence, D. M., Natali, S. M., Olefeldt, D., Romanovsky, V. E., Schaefer, K., Turetsky, M. R., Treat, C. C. and Vonk, J. E.: Climate change and the permafrost carbon feedback, Nature, 520(7546), 171–179, doi:10.1038/nature14338, 2015.

Sitch, S., Smith, B., Prentice, I. C., Arneth, A., Bondeau, A., Cramer, W., Kaplan, J. O., Levis, S., Lucht, W., Sykes, M. T., Thonicke, K. and Venevsky, S.: Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model, Glob. Change Biol., 9(2), 161–185, doi:10.1046/j.1365-2486.2003.00569.x, 2003.

Smith, B., Prentice, I. C. and Sykes, M. T.: Representation of vegetation dynamics in the modelling of terrestrial ecosystems: comparing two contrasting approaches within European climate space: Vegetation dynamics in ecosystem models, Glob. Ecol. Biogeogr., 10(6), 621–637, doi:10.1046/j.1466-822X.2001.t01-1-00256.x, 2001.

Soudzilovskaia, N. A., van Bodegom, P. M. and Cornelissen, J. H. C.: Dominant bryophyte control over high-latitude soil temperature fluctuations predicted by heat transfer traits, field moisture regime and laws of thermal insulation, edited by J. Schweitzer, Funct. Ecol., 27(6), 1442–1454, doi:10.1111/1365-2435.12127, 2013.

Sturm, M., Holmgren, J., McFadden, J. P., Liston, G. E., Chapin, F. S. and Racine, C. H.: Snow–Shrub Interactions in Arctic Tundra: A Hypothesis with Climatic Implications, J. Clim., 14(3), 336–344, doi:10.1175/1520-0442(2001)014<0336:SSIIAT>2.0.CO;2, 2001.

Tarantola, A.: Inverse problem theory: methods for data fitting and model parameter estimation, Elsevier ; Distributors for the United States and Canada, Elsevier Science Pub. Co, Amsterdam ; New York : New York, NY, U.S.A., 1987.

Tarnocai, C., Canadell, J. G., Schuur, E. A. G., Kuhry, P., Mazhitova, G. and Zimov, S.: Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region: SOIL ORGANIC CARBON POOLS, Glob. Biogeochem. Cycles, 23(2), n/a-n/a, doi:10.1029/2008GB003327, 2009.

Vautard, R., Cattiaux, J., Yiou, P., Thépaut, J.-N. and Ciais, P.: Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness, Nat. Geosci., 3(11), 756–761, doi:10.1038/ngeo979, 2010.

Vavrus, S., Ruddiman, W. F. and Kutzbach, J. E.: Climate model tests of the anthropogenic influence on greenhouse-induced climate change: the role of early human agriculture, industrialization, and vegetation feedbacks, Quat. Sci. Rev., 27(13–14), 1410–1425, doi:10.1016/j.quascirev.2008.04.011, 2008.

Viereck, L. A., Van Cleve, K. and Dyrness, C. T.: Forest Ecosystem Distribution in the Taiga Environment, in Forest Ecosystems in the Alaskan Taiga, vol. 57, edited by K. Van Cleve, F. S. Chapin, P. W. Flanagan, L. A. Viereck, and C. T. Dyrness, pp. 22–43, Springer New York, New York, NY. [online] Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-1-4612-4902-3_3 (Accessed 25 February 2016), 1986.

Viovy, N.: Forcing ORCHIDEE: 1.1 CRU-NCEP, Forching OCRCHIDEE [online] Available from: http://forge.ipsl.jussieu.fr/orchidee/wiki/Documentation/Forcings#a1.1CRU-NCEP (Accessed 9 June 2016), 2015.

Wang, F., Cheruy, F. and Dufresne, J.-L.: The improvement of soil thermodynamics and its effects on land surface meteorology in the IPSL climate model, Geosci. Model Dev., 9(1), 363–381, doi:10.5194/gmd-9-363-2016, 2016.

Wang, T., Ottlé, C., Boone, A., Ciais, P., Brun, E., Morin, S., Krinner, G., Piao, S. and Peng, S.: Evaluation of an improved intermediate complexity snow scheme in the ORCHIDEE land surface model: ORCHIDEE

SNOW MODEL EVALUATION, J. Geophys. Res. Atmospheres, 118(12), 6064–6079, doi:10.1002/jgrd.50395, 2013.

Wania, R., Ross, I. and Prentice, I. C.: Integrating peatlands and permafrost into a dynamic global vegetation model: 2. Evaluation and sensitivity of vegetation and carbon cycle processes: PEATLANDS AND PERMAFROST IN LPJ, 2, Glob. Biogeochem. Cycles, 23(3), n/a-n/a, doi:10.1029/2008GB003413, 2009.

Wei, Y., Liu, S., Huntzinger, D. N., Michalak, A. M., Viovy, N., Post, W. M., Schwalm, C. R., Schaefer, K., Jacobson, A. R., Lu, C., Tian, H., Ricciuto, D. M., Cook, R. B., Mao, J. and Shi, X.: The North American Carbon Program Multi-scale Synthesis and Terrestrial Model Intercomparison Project – Part 2: Environmental driver data, Geosci. Model Dev., 7(6), 2875–2893, doi:10.5194/gmd-7-2875-2014, 2014.

Williams, T. G. and Flanagan, L. B.: Effect of changes in water content on photosynthesis, transpiration and discrimination against 13CO2 and C18O16O in Pleurozium and Sphagnum, Oecologia, 108(1), 38–46, doi:10.1007/BF00333212, 1996.

Xiao, Z., Liang, S., Wang, J., Chen, P., Yin, X., Zhang, L. and Song, J.: Use of General Regression Neural Networks for Generating the GLASS Leaf Area Index Product From Time-Series MODIS Surface Reflectance, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 52(1), 209–223, doi:10.1109/TGRS.2013.2237780, 2014.

Yin, X. and Struik, P. C.: C3 and C4 photosynthesis models: An overview from the perspective of crop modelling, NJAS - Wagening. J. Life Sci., 57(1), 27–38, doi:10.1016/j.njas.2009.07.001, 2009.

Yoshikawa, K., Bolton, W. R., Romanovsky, V. E., Fukuda, M. and Hinzman, L. D.: Impacts of wildfire on the permafrost in the boreal forests of Interior Alaska, J. Geophys. Res., 108(D1), doi:10.1029/2001JD000438, 2002.

Zhu, D., Peng, S. S., Ciais, P., Viovy, N., Druel, A., Kageyama, M., Krinner, G., Peylin, P., Ottlé, C., Piao, S. L., Poulter, B., Schepaschenko, D. and Shvidenko, A.: Improving the dynamics of Northern Hemisphere high-latitude vegetation in the ORCHIDEE ecosystem model, Geosci. Model Dev., 8(7), 2263–2283, doi:10.5194/gmd-8-2263-2015, 2015.

Zhu, Z., Piao, S., Myneni, R. B., Huang, M., Zeng, Z., Canadell, J. G., Ciais, P., Sitch, S., Friedlingstein, P., Arneth, A., Cao, C., Cheng, L., Kato, E., Koven, C., Li, Y., Lian, X., Liu, Y., Liu, R., Mao, J., Pan, Y., Peng, S., Peñuelas, J., Poulter, B., Pugh, T. A. M., Stocker, B. D., Viovy, N., Wang, X., Wang, Y., Xiao, Z., Yang, H., Zaehle, S. and Zeng, N.: Greening of the Earth and its drivers, Nat. Clim. Change, 6(8), 791–795, doi:10.1038/nclimate3004, 2016.

Table S1: Conversion table use to obtained vegetation coverage map from the ESA CCI LCC map.

ID	CCI ESA Land Cover Class Description	Trees				Shrub				Herbaceous		NVPs	Non-vegetated				
		BE	BD	NE	ND	BE	BD	NE	ND	Natural	Crops		Bare soil	Water	Snow/Ice	Urban	No data
0	No data																100
10	Cropland, rainfed										100						
11	Herbaceous cover										100						
12	Tree or shrub cover						50				50						
20	Cropland, irrigated or post-flooding										100						
30	Mosaic cropland (>50%) / natural vegetation (<50%)	5	5			5	5	5		15	60						
40	Mosaic natural vegetation (>50%) / cropland (<50%)	5	5			7.5	10	7.5		25	40						
50	Tree cover, broadleaved, evergreen, closed to open (>15%)	90				5	5										
60	Tree cover, broadleaved, deciduous, closed to open (>15%)		50				20			30							
61	Tree cover, broadleaved, deciduous, closed (>40%)		70				15			15							
62	Tree cover, broadleaved, deciduous, open (15-40%)		30				25			45							
70	Tree cover, needleleaved, evergreen, closed to open (>15%)			50		2.5	2.5	15		30							
71	Tree cover, needleleaved, evergreen, closed (>40%)			70		5	5	5		15							
72	Tree cover, needleleaved, evergreen, open (15-40%)			30				25		45							

80	Tree cover, needleleaved, deciduous, closed to open (>15%)				50	2.5	2.5	2.5	12.5	30		
81	Tree cover, needleleaved, deciduous, closed (>40%)				70	5	5	5		15		
82	Tree cover, needleleaved, deciduous, open (15-40%)				30				25	45		
90	Tree cover, mixed leaf type (broadleaved and needleleaved)		30	20	10	5	5	5		25		
100	Mosaic tree and shrub (>50%) / herbaceous cover (<50%)	**7**	**15**	**4**	**5**	**8**	**15**	**6**		40		
110	Mosaic herbaceous cover (>50%) / tree and shrub (<50%)	**4**	**7**	**4**		**6**	**13**	**6**		60		
120	Shrubland					15	30	15		40		
121	Shrubland evergreen					30		30		40		
122	Shrubland deciduous						60			40		
130	Grassland									100		
140	Lichens and mosses									**10**	**70**	**20**
150	Sparse vegetation (tree, shrub, herbaceous cover) (<15%)		4.7	4.7	3.1		4.7	4.7	3.1	**10.0**	**45.0**	**20.0**
151	Sparse tree (<15%)		9.4	9.4	6.2					**10.0**	**45.0**	**20.0**
152	Sparse shrub (<15%)						7.5	7.5	5.0	**15.0**	**45.0**	**20.0**
153	Sparse herbaceous cover (<15%)									**35.0**	**45.0**	**20.0**
160	Tree cover, flooded, fresh or brakish water	37.5	37.5							25		
170	Tree cover, flooded, saline water	75				25						

180	Shrub or herbaceous cover, flooded, fresh/saline/brakish water		25 15	**30**	**30**	
190	Urban areas					100
200	Bare areas					100
201	Consolidated bare areas					100
202	Unconsolidated bare areas					100
210	Water bodies					100
220	Permanent snow and ice					100

BE : Broadleaf Evergreen, BD : Broadleaf Deciduous, NE : Needleleaf Evergreen and ND : Needleleaf Deciduous.
Bold: modified values for the introduction of new boreal vegetation (i.e., shrubs, NVPs and cold climate grass PFTs)

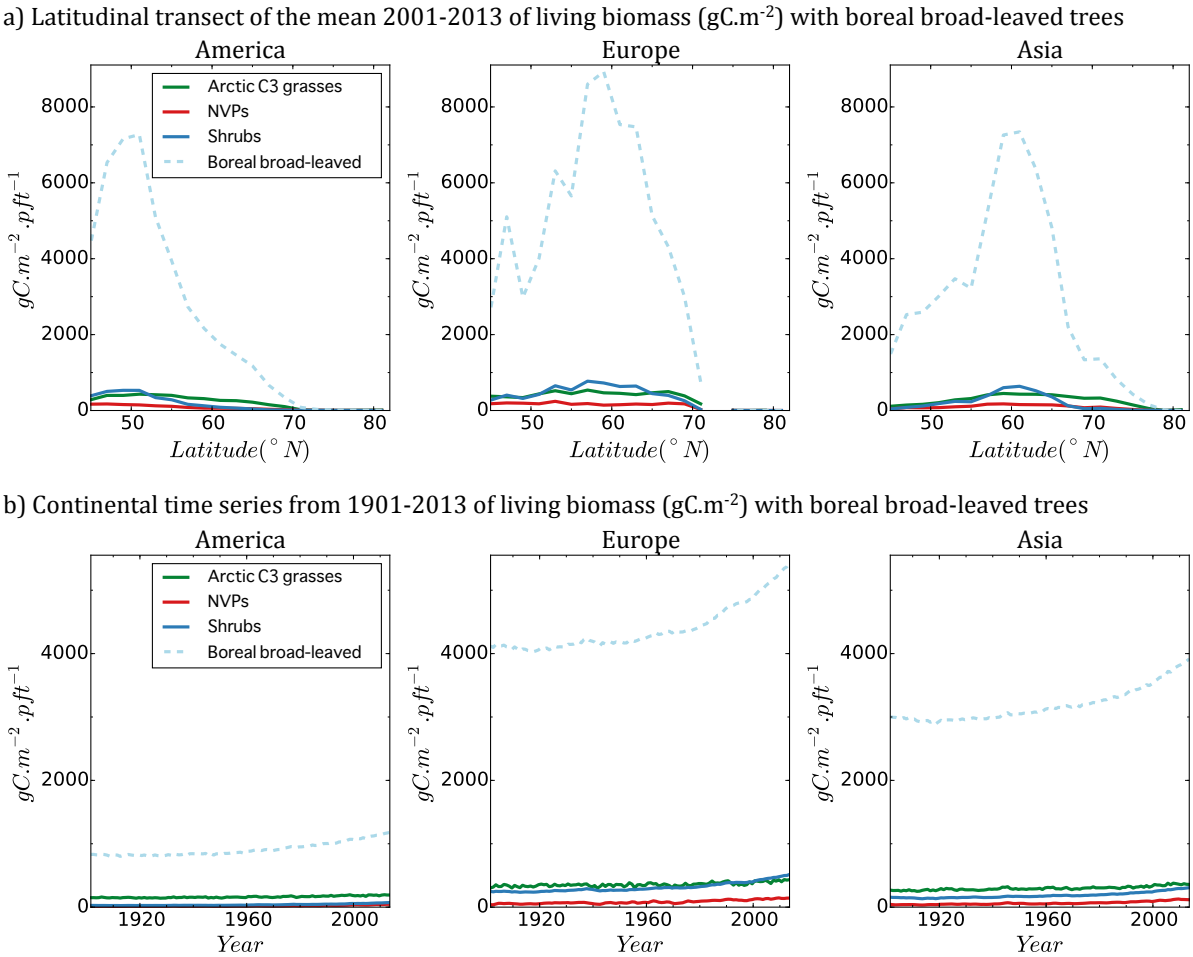


Figure S1: Latitudinal transects of the mean 2001-2013 (from 45°N) and time series from 1901 to 2013 (from 55°N) of total summer live biomass of new PFTs (cold climate C3 grasses, NVPs and boreal shrubs) and boreal broad-leaved tree (dashed).

3.4. Conséquences de l'ajout d'une nouvelle végétation boréale

Le principal défi de cette thèse était de produire une nouvelle description de la végétation boréale. Pour cela trois PFTs boréaux, les herbacées C3, les buissons et les plantes non-vasculaires (NVPs), ont été rajoutés, ainsi que de nombreux processus associés. Si pour les herbacées C3 boréales, cela se résume à l'attribution de nouveaux paramètres, pour les autres PFTs les changements ont été plus fondamentaux. Pour les buissons, une nouvelle allométrie (par rapport à celle des arbres) et de nouvelles interactions avec la neige ont été implémentées, permettant d'obtenir des « petits arbres ». Pour les NVPs, c'est une refonte importante de certains processus comme la photosynthèse, la mortalité, le stress hydrique ou la résistance aux conditions difficiles qui a permis d'obtenir un PFT très différent des PFTs originaux présents dans ORCHIDEE. Les paramètres de ces nouveaux PFTs ont ensuite été optimisés à l'aide d'une méthode d'optimisation Bayésienne permettant d'obtenir un comportement moyen proche d'un ensemble d'observations pour des sites en Sibérie, notamment en ce qui concerne les aspects liés aux flux et stock de carbone dans les plantes.

Comme on pouvait s'y attendre, les PFTs boréaux sont moins productifs que les PFTs standards dont ils sont issus, notamment dû à leurs capacités photosynthétiques plus faibles. Après avoir réalisé une carte de la répartition de la végétation comprenant les nouveaux PFTs (section 2.2.3), il a été possible de simuler sur une région boréale étendue (>40°N) le comportement de la végétation. Les sorties de l'indice de surface foliaire ou LAI (pour Leaf Area Index) des simulations « ORC » (Tableau 7), intégrant une partie du fonctionnement biogéochimique de la plante (i.e., proxy de l'état de la végétation), ont pu être comparées avec différents produits issus d'observations GLASS (Global Land Surface Satellite, Liang et al., 2013; Xiao et al., 2014) et GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies, Zhu et al., 2013), cf. section 3.3 et ANNEXE E. Il apparaît qu'au-dessus de 50°N le LAI était très souvent surestimé avec la végétation standard (13 PFTs) et que l'intégration des nouveaux PFTs permet de réduire considérablement cette différence.

Ces modifications ont des impacts substantiels sur d'autres variables importantes pour les simulations climatiques telles que l'albédo, la rugosité de surface, les flux d'eau ou la température du sol. Nous avons ainsi mis en avant des impacts significatifs de l'implémentation de nouveaux PFTs, notamment avec une diminution de la rugosité et une l'augmentation de l'albédo en hiver dues au remplacement des arbres par des buissons (dans la version standard d'ORCHIDEE les buissons sont considérés comme des arbres), ou également une diminution de la transpiration due à une réduction du LAI des nouveaux PFTs boréaux. Par contre, malgré l'intégration de l'isolation du sol induite par la présence des NVPs, nous n'avons pas observé de modification substantielle de l'extension du pergélisol. Soit l'impact des NVPs sur l'isolation du sol est sous-évalué, soit il a été complétement « compensé » par une augmentation de la

conductivité du sol due à l'augmentation de l'humidité du sol qui semble accompagner l'ajout des nouveaux PFTs présents.

Globalement, l'implémentation des nouveaux PFTs semble améliorer la description de la végétation boréale. Toutefois, l'ensemble des développements présenté n'a été testé qu'en mode *forcé* avec le modèle ORCHIDEE. Néanmoins les différences obtenues avec l'ajout des nouveaux PFTs, tant pour les flux de carbone, que d'eau et d'énergie, pourront être amplifiées ou atténuées dans une simulation prenant en compte les rétroactions surface – atmosphère.

Par contre, bien que les modifications apportées constituent une mise à jour et une amélioration de la description du fonctionnement de la végétation boréale, l'ensemble des paramétrisations (calibrées initialement pour être réalistes avec la version standard d'ORCHIDEE) doivent potentiellement être re-calibrées, dans l'optique d'intégrer toutes les modifications à la version standard d'ORCHIDEE (« trunk »). Par exemple, la correction de l'expression de la rugosité ainsi que l'introduction des buissons ont toutes deux entrainé une diminution de la rugosité en région boréale, ce qui peut impacter significativement la circulation atmosphérique dans le modèle LMDz. De manière similaire, la mise à jour de l'équation de fraction de neige sur la végétation est à l'origine d'une importante diminution de l'albédo en hiver, alors que l'introduction des buissons a induit son augmentation globale.

Plusieurs enjeux découlent de l'évolution parallèle et continuelle des modèles de surface et notamment du modèle ORCHIDEE. Par exemple l'introduction du cycle de l'azote (en cours dans une version d'ORCHIDEE) ou de l'oxygène pourrait notamment permettre d'améliorer la description du fonctionnement des végétaux boréaux (et des NVPs en particulier), mais il faudrait alors adapter les liens entre les différents processus. Par ailleurs, des améliorations sont également envisageables dans la version actuelle développée dans cette thèse. Pour les buissons boréaux, qui sont pour le moment des feuillus décidus, il serait intéressant d'intégrer une diversité similaire aux PFTs arborés boréaux (feuillus vs résineux, caduques vs sempervirents) en transposant les processus actuels pour les buissons. Pour cela je conseille une approche de type « sous-PFT » : cela consiste à partir de chacun des PFTs arborés de créer un PFT utilisant les mêmes processus et paramètres, excepté pour un nombre fixé de paramètres qu'il suffit de préciser avant une simulation (sans modification du modèle). On pourrait ainsi étendre, moyennant l'intégration de quelques processus, l'implémentation des buissons à d'autres régions du globe, telles que les savanes avec un profil racinaire adapté. Un procédé similaire peut être mis en place pour séparer bryophytes et lichens. Les PFTs standards boréaux peuvent également être adaptés, par exemple en incluant une mortalité en conditions extrêmes, comme pour les buissons.

L'intégration des PFTs boréaux peut également servir à réévaluer le fonctionnement carboné, hydrique et énergétique des régions boréales. Un exemple évident serait l'étude de l'évolution du pergélisol depuis la dernière période interglaciaire, en évaluant plus spécifiquement la quantité de carbone

ayant pu être accumulée depuis, et qui serait susceptible d'être rejetée lors d'un réchauffement climatique. Mais cela nécessite de pouvoir déterminer auparavant la végétation et son évolution depuis plusieurs milliers d'années. Pour cela, une solution est d'être capable de simuler l'évolution de la végétation suivant les contraintes climatiques. Ceci sera abordé dans le chapitre suivant.

Chapitre 4
UNE NOUVELLE DYNAMIQUE

4.1. Motivation et description succincte de la dynamique de végétation associée aux nouveaux PFTs

Les simulations effectuées dans le Chapitre 3 ont montré que l'implémentation de la végétation boréale dans ORCHIDEE pouvait avoir un impact important sur la végétation (biomasse, productivité) mais également sur des variables physiques telles que la température du sol, l'albédo, l'humidité du sol,… Or ces résultats sont fortement dépendants des cartes de végétation utilisées : entre une simulation avec la végétation standard (13 PFTs) et incluant la végétation boréale (16 PFTs), la fraction de buissons est issue de la fraction initiale d'arbres présents dans les cartes et la fraction de plantes non vasculaires principalement de celle des herbacées. Ceci provoque des artéfacts: par exemple l'ajout des buissons se traduit par une diminution importante de la biomasse. L'implémentation de la dynamique de végétation (notée DGVM) est une des alternatives nous permettant de nous soustraire à ce problème. Cela permet d'observer les modifications d'aires de répartition de la végétation et donc la colonisation de nouveaux milieux. Si l'implémentation des PFTs boréaux est conforme aux attentes, les plantes non vasculaires devraient être présentes au niveau des très hautes latitudes (comme dans la Figure 25 et la Figure 26). De même, les buissons devraient probablement se développer au nord de la limite des arbres (Blok et al., 2011; Elmendorf et al., 2012; Jiang et al., 2012; Frost and Epstein, 2014), alors que dans la carte de végétation les arbres et les buissons se superposent (cf. section 2.2.3 et ANNEXE D). Le fait de s'affranchir de la carte de végétation nous permet également de nouvelles ambitions : reproduire la distribution actuelle de la végétation et pouvoir projeter sa distribution future.

Afin de pouvoir simuler la dynamique de la végétation, le principe est d'implémenter dans le modèle des compétitions entre les différents PFTs pour représenter les interactions présentes dans les écosystèmes. Si ces processus sont déjà présents pour les PFTs standards, il s'agit d'adapter les nouveaux PFTs. Pour les PFTs standards la dynamique de végétation est principalement déterminée par trois types d'interactions : le stress hydrique dû à une compétition indirecte pour l'eau contenue dans le sol, la compétition pour la lumière et une compétition basée sur la NPP. J'ai donc inclus la végétation boréale dans cette dynamique de végétation. Les herbacées et les plantes non vasculaires (NVPs) partagent le même réservoir d'eau dans le sol, comme les arbres et les buissons. La compétition pour la lumière a été maintenue (les arbres sont toujours meilleurs compétiteurs que les herbacées), en ajoutant les NVPs avec les herbacées, et les buissons entre la strate herbacée et

arborescente : ils dominent les herbacées mais sont dominés par les arbres. Enfin au sein de chaque strate (herbacée, arbustive et arborescente) il y a une compétition basée sur la productivité. Comme la NPP des nouveaux PFTs implémentés est plus faible que celle des PFTs dont ils sont issus (Chapitre 3), en conditions optimales ils ne seront pas ou peu présents. Ce n'est donc qu'en conditions difficiles (stress important, présence de neige, de faibles températures, etc.) qu'ils pourront se développer. Il est important de noter que le principe était de modifier au minimum la végétation standard et de se concentrer sur les nouveaux PFTs implémentés. Il est donc possible que la distribution spatiale des PFTs standards soit imparfaite et que cela ait un impact direct sur la distribution boréale.

Nous avons donc effectué des simulations pour les conditions actuelles avec le DGVM (simulation dénotée « DGVM » dans le Tableau 7), mais également pour de possibles conditions futures (simulations « DGVM4.5 » et « DGVM8.5 » dans le Tableau 7) afin de pouvoir observer les impacts induits par un changement de végétation. Dans chacun des cas, plusieurs simulations ont été effectuées avec la végétation standard (13 PFTs), avec la nouvelle végétation boréale (16 PFTs), mais aussi dans certains cas avec seulement un nouveau PFT boréal (14 PFTs) afin de pouvoir distinguer l'impact de chacun des PFTs tant dans la dynamique de végétation que dans les variables de sorties (seul le résultat avec simplement les NVPs ajoutées sera présenté).

Ce travail fait l'objet d'un article en cours de préparation présenté ci-dessous (section 4.2) et résumé dans la section 4.4. Il explicite les nouvelles compétitions implémentées du fait de la présence de nouveaux PFTs et présente les résultats de simulations présentes et futurs, avec 13 ou 16 PFTs. Pour aller plus loin, la section 4.3 propose quelques points d'analyse plus spécifiques sur des sorties simulées ou d'autres simulations effectuées.

4.2. Implémentation et impacts de l'actualisation de la dynamique de végétation (Article in prep.)

Incorporating bryophytes and Arctic shrubs in a global land surface model with dynamical vegetation

Arsène Druel[1,2], G. Krinner[1], P. Peylin [2,] P. Ciais[5] and N. Viovy[1]

[1]CNRS, Univ. Grenoble Alpes, Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), F-38000 Grenoble, France
[2]Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, CEA-CNRS-UVSQ CE Orme des Merisiers, 91 190 Gif sur Yvette, France

Abstract. We introduce new parameterizations representing plant competition processes involving Arctic shrubs and bryophytes (mosses and lichens) in the ORCHIDEE land surface model in order to improve the representation of high latitude vegetation dynamics. Specific competition and survival conditions are defined for these three plant functional types. Competition between herbaceous vegetation, shrubs and trees is based on available light. Survival conditions of shrubs include their protection from cold temperatures by snow, and the competition between C3 grasses and bryophytes depends especially on soil water-saturation conditions. The equilibrium fractional coverage of the three competing plant functional types is based on the net primary production.

The original ORCHIDEE version (including three different boreal tree types and one grassland type) and the modified version including the new boreal vegetation types are then evaluated, with dynamic vegetation simulated by the model. The simulations are run for the historical period, and for the 21st century following the RCP 4.5 and 8.5 climate scenarios. We evaluate the simulated vegetation distribution and its consequences for energy, water and carbon fluxes. Globally, new boreal vegetation is less productive and contains less biomass than original model vegetation, but with climate change and vegetation adaptation these differences tend to be reduced. Non vascular plants protect the permafrost, but this is compensated for by the increase of soil humidity due to boreal shrubs and grasses. The introduction of shrubs increases the roughness and decreases the albedo in winter.

Substantial Arctic greening occurs in our RCP4.5 and RCP8.5 simulations, with important shifts of vegetation in northern latitudes, in particular an increase of tree and non vascular plant coverage. However, the model does not reproduce the generally observed boreal shrubification. Finally, possible climate feedbacks expected by coupling ORCHIDEE with a climate model are discussed.

1 Introduction

Coupled climate models such as those used in CMIP6 (Eyring et al., 2016) contain land surface models that describe the energy, water and carbon exchanges between the vegetation and the atmosphere. The importance of these coupled models was demonstrated many times (e.g., Oki and Kanae, 2006; Schimel, 1995; Trenberth et al., 2009), especially for representing climate changes (Cox et al., 2000; Piao et al., 2006). During large climate shifts, the effect of changes in vegetation distribution can be very important. This was the case, for example, during the Last Glacial Inception (approx. 115000 years BP), which was correctly reproduced in climate models only when shifts in vegetation distribution were either simulated by the models or at least prescribed (Crucifix and Loutre, 2002; Gallimore and Kutzbach, 1996; Meissner et al., 2003; de Noblet et al., 1996). The high-latitude vegetation changes at play during this transition (a the substitution of 80 % of trees by shrubs and of shrubs by grasses, Meissner et al., 2003) affect surface albedo, in particular in the presence on trof snow, which in turn impacts energy fluxes (Crucifix and Loutre, 2002; Gallimore and Kutzbach, 1996; Meissner et al., 2003; de Noblet et al., 1996; Quillet et al., 2010; Yoshimori et al., 2002). Thus, it appears that high-latitude ecosystems have a significant impact on the climate (Bonan, 1995; Chapin et al., 2000; Christensen et al., 1999). Today observations show that the colonisation of shrubs in northern latitude is important and is attributed to the current climate change (Frost and Epstein, 2014). The vegetation distribution change could lead to an increase of global

leaf area and to a decrease of albedo, which can increase regional warming. This process is called Artic greening (Blok et al., 2011; Bonfils et al., 2012; Elmendorf et al., 2012; Jiang et al., 2012). It is therefore clear that ESMs must represent how the composition and distribution of ecosystems respond to climate changes if they are to correctly simulate past, present and future changes. This is why since the 90s several global land schemes started to include a Dynamic Global Vegetation Model (DGVM).

DGVMs are an evolution of land surface models. As in traditional land surface schemes the exchanges with the atmosphere are simulated at different time scales. Physical processes including photosynthesis and heat and moisture exchanges are usually computed at a sub-daily time step, while vegetation-related processes such as carbon allocation, turnover and decomposition and plant phenology are typically calculated on a daily basis. In DGVMs, additional vegetation competition and disturbance are implemented at a daily to yearly time step (Krinner et al., 2005; Sitch et al., 2003). In many dynamical land surface schemes, vegetation description is based on plant functional types (PFTs). The representation of competition between PFTs usually includes competition for light, and the extension of the different PFT on free space often depends on their relative primary productivity, the most productive PFT colonizing free space at the greatest rate (Krinner et al., 2005; Prentice and Leemans, 1990; Sitch et al., 2003). Disturbances and bioclimatic factors also drive vegetation distribution (Haxeltine and Prentice, 1996; Prentice et al., 1992). Vegetation can be disturbed by climate-related factors such as the occurrence of fires or late frost (Pachzelt et al., 2015; Sinclair et al., 2007; Thonicke et al., 2008), and ecosystemic factors such as herbivory or trampling (Gill, 2014; Olofsson et al., 2009; Zimov et al., 1995). Bioclimatic factors include direct limits influencing plant mortality (e.g. minimum temperature for survival) and indirect ones modifying productivity (e.g. optimal temperature, water and nutrients accessibility). Depending on the land surface model, the choices of PFT and competition parameterization vary greatly, resulting in very different DGVMs.

In northern latitudes the vegetation is particularly sensitive to temperature, because an increase of temperature can directly lengthen the growing season. Its interaction with the environment can have impacts on physical processes such as albedo (Brovkin et al., 2003; Cook et al., 2008; Foley et al., 1994; Meissner et al., 2003), which can change significantly if vegetation is above or below the snow, soil thermal properties, i.e. through the insulation brought by mosses (Chadburn et al., 2015; Porada et al., 2016), or permafrost dynamics (Koven et al., 2011), leading to greenhouse gas emissions (Chadburn et al., 2015; Porada et al., 2016). Thus, vegetation shifts can initiate feedbacks involving carbon sinks (organic C accumulation) or sources (with permafrost loss) (Betts, 2000; Cox et al., 2000; Zhang et al., 2013), potentially amplifying temperature changes or on the contrary mitigating them (Foley et al., 1994).

In this study, we use ORCHIDEE (Organizing Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems), the land surface scheme coupled with the general atmospheric circulation model LMDZ (Laboratoire de Météorologie Dynamique Zoom), components of the ESM IPSL-CM (Institute Pierre Simon Laplace Climate Model). ORCHIDEE is fully described in Krinner et al. (2005), with the vegetation dynamic module directly introduced from the LPJ model (Lund–Potsdam–Jena ; Sitch et al., 2003). Tree mortality and various tree-related parameters in ORCHIDEE have recently been upgraded (Zhu et al., 2015) in order to correct the previous misrepresentation of boreal forest composition (Woillez et al., 2011). Outside of the DGVM, since Krinner et al. (2005), the description of standard processes and vegetation description has been updated, especially in northern latitudes. Gouttevin et al. (2012) developed a new soil-freezing scheme and its effect on root water availability and soil thermodynamics in order to represent permafrost. A 3-layer snow scheme based on ISBA-ES (Boone, 2002) was introduced by Wang et al. (2013). Recently, a new description of boreal vegetation was implemented, taking into account PFTs (non-vascular plants, boreal shrubs and boreal C3 grasses) important for northern latitudes ecosystems and their associated processes (Druel et al., 2017). The aim of this study is to develop updated dynamical vegetation with these new PFTs and evaluate its impact on water, energy and carbon fluxes in a changing climate. In Section 2, the implementation of this updated dynamical vegetation will be described. Section 3 will focus on results for the recent period (1901-2013) and future projections (2014-2100) using RCPs 4.5 and 8.5 will be presented in Section 4.

2 Methods

2.1 General methodology

The version of the land surface model ORCHIDEE used in this study includes specific processes developed for high latitudes, such as the implementation of permafrost (Gouttevin et al., 2012), an improved snow scheme describing three explicit snow layers (Boone, 2002; Wang et al., 2013) and new specific Arctic vegetation types described, for a static vegetation context, by Druel et al. (2017). Here we describe the parameterization of processes relevant for dynamic vegetation for these new Arctic vegetation types. We aimed at modifying as little as possible the parameterizations of standard plant functional types (PFTs) present in ORCHIDEE in order to facilitate traceability and convergence between model versions. Another goal was to introduce competition of boreal shrubs against trees and grasses, and the competition of non-vascular plants (NVPs) against grasses, boreal shrubs and trees. Table 1 presents the PFTs used in this study.
In ORCHIDEE, the dynamical vegetation model (Krinner et al., 2005) is based on Sitch et al. (2003), with individual fitness (survival capacity) and on competition between all PFTs, based on light access and net primary productivity (NPP). This implies three possibilities to implement the dynamical behaviour of each new PFT: i. Intervene on light competition, ii. Intervene on physiological factors, which determine ultimately the NPP, iii. Change the survival capacity (to drought, cold, etc.). The changes described in the following use all of these possibilities because they are relevant for the PFTs treated here.

Bare soil			
Trees	Tropical	Broadleaf	Evergreen
		Broadleaf	Raingreen
	Temperate	Needleleaf	Evergreen
		Broadleaf	Evergreen
		Broadleaf	Summergreen
	Boreal	Needleleaf	Evergreen
		Broadleaf	Summergreen
		Needleleaf	Summergreen
Shrubs	*Boreal*	*Broadleaf*	*Summergreen*
Grasses	Natural	C3	Global
		C4	
	Crops	C3	
		C4	
Non-Vascular plants			

Table 1. Plant functional types (PFTs) used in this study. New boreal PFTs for which we describe competition processes are indicated with asterisks.

2.2 Dynamical vegetation processes

In ORCHIDEE, if space is available, PFTs that are not present are newly introduced if they are adapted to the climatic conditions. As long as there is available free space in a grid box, there is no explicit competition implemented in ORCHIDEE, although indirect competition for water exists within each vegetation stratum (through stress). Direct competition only occurs when the total vegetation coverage approaches 100%.
The summary of these processes is presented in Fig. 1.

2.2.1 Vegetation competition

For standard ORCHIDEE PFTs, vegetation competition is based on foliage-projected cover (FPC) on the soil, which cannot exceed 1 ($m^2.m^{-2}$) in total. Light competition is activated when the vegetation cover is closed. The principle is that higher vegetation receives more light and projects shadows on smaller PFTs. Trees are always

considered higher than grasses, so they outcompete grasses for light. In order to include boreal PFTs in the vegetation dynamics, we simply added an intermediate layer (shrubs) and considered NVPs in the grass layer. Therefore, if the maximum vegetation cover (1 $m^2.m^{-2}$) is reached, we first increase mortality in the grass layer, then for woody vegetation a maximum FPC (0.95 $m^2.m^{-2}$) is applied as in Krinner et al. (2005). If this second limit is reached, shrubs are considered below the tree layer and their spatial coverage is reduced such that the total woody FPC does not exceed 0.95. If this is insufficient, i.e. if tree FPC already exceeds 0.95, then tree FPC is reduced accordingly (see Fig. 1)

Light competition among PFTs pertaining to the same vegetation layer (grasses, shrubs or trees) is indirectly based on NPP. For this, the principle of the original version of ORCHIDEE was maintained: the same relative reduction of spatial coverage is applied to all PFTs. As a consequence, the most productive PFTs, which grow faster than others, fill up most of the newly available space. As a consequence, the most productive PFTs gradually outcompete the others within a given vegetation stratum if the vegetation cover is closed.

2.2.2 Productivity control

The control of NPP enables us to influence the competition between PFTs. This control depends mainly on the maximum potential photosynthesis capacity, driven in ORCHIDEE by the maximum rate of carboxylation at 25°C ($Vc_{max(25)}$). Yet, boreal vegetation has a lower productivity than standard PFTs, i.e. 28 $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$ for NVPs compared to 70 $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$ for C3 grasses (Druel et al., 2017), which are part of the same vegetation layer: in optimum conditions, standard PFTs are better competitors than boreal PFTs. However, at high latitudes, other processes compensate for this disadvantage.

For the competition between NVPs and grasses, three different processes are taken into account to influence NPP in specific environmental conditions. Firstly, with their more restricted access to deep water (99% of roots at 11cm for NVPs versus at 50 cm for C3 grasses) and strong sensitivity to the lack of water on weekly to monthly time scales (Druel et al., 2017), NVPs are, on one hand, very sensitive to superficial water stress. On the other hand, NVPs are more resistant to a long term water stress or any other disturbance due to the reversibility of the desiccation process (Druel et al., 2017). Finally, to take into account the low adaptation of C3 grasses in anoxic conditions, we decrease the potential $Vc_{max(25)}$ when the soil is water saturated. For desiccation, we chose to use a monthly mean hydric stress factor (w_s) computed according to the root profile of NVPs and the water availability in each soil layer (convolution of the root fraction in each layer with the relative soil water content of the layers). When there is no water stress ($1 \geq w_s > w_{s\_max}$), an anoxic factor (a_f) is applied, defined by the linear function Eq. 1.

Eq. 1 **If** $\mathbf{w_s > w_{s\_max}}$, $\boldsymbol{a_f = a_o + \frac{1 - a_o}{w_{s\_max}} \times w_s}$

Else $\mathbf{w_s \leq w_{s\_max}}$, $\boldsymbol{a_f = 1}$

With a_f the anoxic factor, w_{s_max} the lower limit of water saturated soil (0.97) and a_0 the minimum a_f value (0.2).

The grasses thus have a higher productivity in optimum conditions except with water-saturated soils, while NVPs are less productive and limited by a lack of water, but more stress resistant on the long term.

2.2.3 Mortality control

Because shrubs constitute a different vegetation stratum than trees, we introduce no direct NPP-based competition for light between trees and shrubs. In northern latitudes, the most important bioclimatic limitation for trees is due to the sensitivity to cold temperatures (T_{min}), initially presented in the first ORCHIDEE description (Krinner et al., 2005) and updated (Eq. 2) by Zhu et al. (2015). In this study, for boreal woody PFTs the minimum critical temperature was maintained at -45°C for needleleaf evergreen trees; broadleaf summergreen trees and needleleaf summergreen trees (while there was no limit in Zhu et al., 2015), and set to -

45° C for boreal shrubs. This process allows the boreal shrubs to extend further polewards than boreal trees, which allows simulating a shrub tundra north of the taiga belt.

Eq. 2 **If $T_{min} < T_{min,crit}$,** $M_{ce} = k_{ce} \times (T_{min,crit} - T_{min})$

with M_{ce} the mortality due to cold extremes, $T_{min,crit}$ the minimum critical temperature (defined by PFT), T_{min} the minimum temperature and k_{ce} a prescribed coefficient (0.04).

The main difference between shrubs and trees is that for trees the relevant minimum temperature (T_{min}) is the atmospheric 2 meter temperature while the situation for shrubs is different because these can be covered, at least in part, by snow. Therefore the vertical temperature level that is used to decide whether a tree can survive depends on the shrub and snow height. More details on this implementation are described by Druel et al. (2017). For dynamical vegetation, the height of shrubs is computed differently than in Druel et al. (2017). This modified height calculation is described in Appendix A.

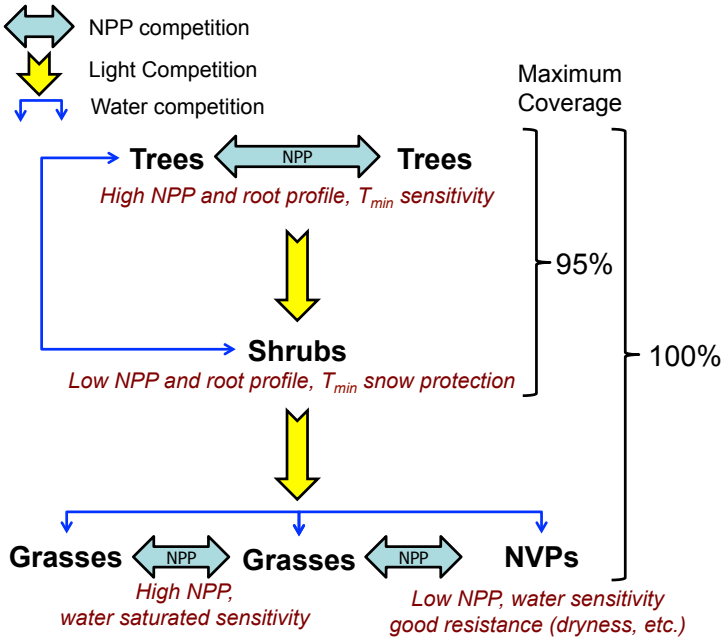


Fig. 1. Summary of the main dynamical processes involving boreal vegetation. The main PFTs characteristics are indicated in red. For light competition the direction of the arrow indicates the dominated vegetation.

2.3 Configuration of simulations

Present and future vegetation distributions from three sets of simulations are presented in this study: one for the recent period and two for the next century with different RCP scenarios (Moss et al., 2010). Each set includes one simulation with standard PFTs (13 PFTs) and one simulation with the new boreal vegetation type (16 PFTs, see Table 1). Some results of additional simulations with standard PFTs plus selected boreal vegetation types (i.e. NVPs) are shown to clarify specific issues.

Simulations for the recent period use CRUNCEP meteorological forcing (Viovy, 2015; Wei et al., 2014), at 2° resolution and from 40°N to 90°N, available from 1901 to 2013. The model is spun up for 1000 years using random forcing years from 1901 to 1950. A long spinup is required to obtain equilibrated tree vegetation distributions (attained around 250 years) and thus, on longer timescales, equilibrated biomasses.

The future simulations are based on RCP 4.5 and 8.5 scenarios, corresponding to an additional radiative forcing of approximately +4.5 $W.m^{-2}$ and +8.5 $W.m^{-2}$ in 2100 (Moss et al., 2010). Meteorological forcing is constructed using an anomaly method following Koven et al. (2015), applied to the present-day CRUNCEP forcing and climate anomalies from the IPSL-CM5 simulations (Dufresne et al., 2013). The meteorological forcing is provided at a horizontal resolution of 2°, from 2014 to 2100 and with the initial state from the final results of the recent simulation.

2.4 Evaluation protocol

In order to quantify the differences between the various model versions and simulations, several methods were applied following the type of variables.

2.4.1 Vegetation coverage

Vegetation maps are difficult to compare because of the high number of vegetation types. In addition, we use present and future simulations, and two model configurations for each, which differ by the number of PFTs (13 and 16). Among the various possibilities, we chose first to regroup PFTs by layer to create a composite colour map associated with a diversity metric, and secondly to convert the simulated PFT fractions into different biomes.

Composite colour map and Euclidian fuzzy distance

We group the PFTs by vegetation layer (herbaceous, shrubs and trees) and present a composite colour map in which hue indicates fraction of coverage and transparency indicates the fraction of bare soil. To facilitate the interpretation of these maps and to highlight the differences between simulation configurations, we calculate for all PFTs the disagreement between two different PFT maps through a diversity metric (D_c) defined as the Euclidian distance of PFTs (Legendre et al., 2005; Ottlé et al., 2013; Poulter et al., 2011; Zhu et al., 2015). It is computed for every grid cell (c) between two simulations (noted a and b) and normalised to the interval [0,1], see Eq. 3. Higher values represent larger discrepancies between the two vegetation distributions.

Eq. 3. $$\boldsymbol{D_{cc}} = \sqrt[2]{\frac{\sum_{k=1}^{n}\left(v_{c,a,k}-v_{c,b,k}\right)^2}{2}}$$

With $v_{c,a,k}$ and $v_{c,b,k}$ the maximal fraction of PFT k on cell c and for simulation a and b respectively, and n the number of PFTs.

To take into account the vegetation in the adjacent grid cells, we use a method based on "fuzziness of location" in a two way comparison (see Hagen, 2003). This means that we do not compare strictly one cell in map a with the corresponding collocated cell in map b, but one cell in map a with the collocated same cell and its neighbours in map b, and vice versa. Finally, to take into account the spatial distance between the central cell and its neighbours, a distance function d_{c*} (Eq. 4) is applied in order to determine the "Euclidian fuzzy distance" (like in Hagen, 2003), which is the minimum of d_{c*} and D_{cc*} (D_{Fuzzy} in Eq. 5). Taking into account the nearest vegetation distribution, this method allows highlighting the appearance of new PFTs more than a spatial vegetation shift.

Eq. 4. $$\boldsymbol{d_{c*}} = \frac{1}{1+\left(d/d_{ref}\right)^2}$$

with d the distance between the central cell c and the neighbour c*, and d_{ref} a constant fix here at 1.5 (grid scale).

Eq. 5. $$\boldsymbol{D_{Fuzzy}} = \min\left(\boldsymbol{D_{cc}}, \boldsymbol{D^*_{cc*}}, \boldsymbol{D^*_{c*c}}\right) \text{ for all neighbours c*}$$
$$\textbf{with } \boldsymbol{D^*_{cc*}} = \left(1 - \boldsymbol{d_{c^*}}.\left(1 - \boldsymbol{D_{cc*}}\right)\right.$$

with D_{cc} the Euclidian distance for the central cells and $\boldsymbol{D^*_{c*c}}$ **or** $\boldsymbol{D^*_{cc*}}$ the Euclidian distance for the central cell in one map to the reference grid cells in the vicinity of the collocated grid cell in the other map. Here we define the "vicinity" as a circle with a radius of d=3 (grid scale), i.e. 28 "neighbour" cells.

Biomization

In order to obtain a better vision of the global ecosystem evolution, we to transform the distribution of numerous PFTs present in each grid cell into a unique macro ecosystem, called biome. For that, we used a biomization method adapted from Prentice et al. (2011), which was already used in ORCHIDEE (Kageyama et al., 2013). The algorithm is applied to each grid cell and depends on different model outputs, i.e. the foliage projective cover (FPC), the average height of woody PFTs, the annual mean growing degree days above 5°C (GDD_5 in K days) and the climate type of the dominant tree PFTs (e.g. boreal or temperate). However, the FPC and GDD_5 limit values were adapted to be representative of present and future boreal biomes, and not Holocene biomes on a global scale (as in Joos et al., 2004; Kageyama et al., 2013; Prentice et al., 2011). Moreover, the woody height limit was chosen to correspond to the theoretical maximum height of shrubs in the ORCHIDEE version used is this study. Except for the biomes not present in boreal regions (such as the tropical ones), the biomes used in Prentice et al. (2011) were maintained. Glaciated regions were masked (such as the center of Greenland). Fig. 2 shows the biomization algorithm employed in this study.

This method allows converting modelled vegetation properties (PFTs) to very broadly defined vegetation types (biomes). This classification of global vegetation is appropriate to compare the evolution of vegetation; it is more concise than a comparison of a suite of maps of abundance of the different PFTs.

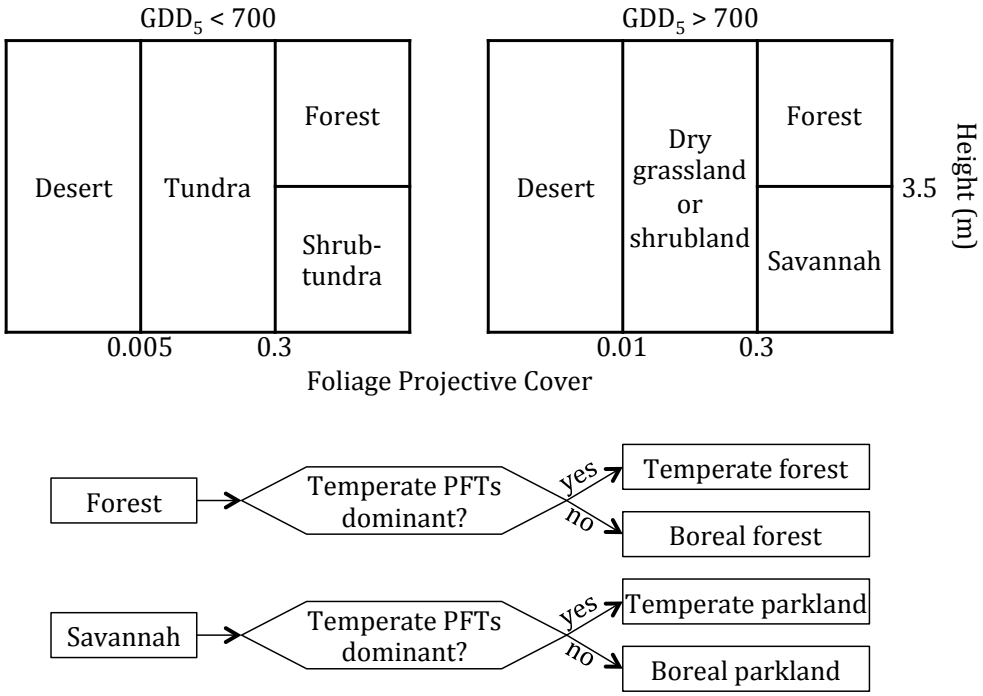


Fig. 2. Biomization algorithm to convert the PFT fraction simulated by ORCHIDEE to biomes, as a function of the annual mean degree-days above 5°C (GDD_5), the foliage projective cover, the mean woody height and the climate type of dominant tree PFTs.

2.4.2 Other variables

In addition to biogeography, we compare carbon, water or energy fluxes or reservoirs. Student's tests (with p_{value}=0.05) were carried out at each grid point in order to assess statistical significance of the signals. Only significant differences are shown in the maps presented in the following.

3 Results

In this study we try to provide answers to two questions. First, what is the impact of the introduction of new PFTs in ORCHIDEE on vegetation distribution and its expected evolution in the future? Second, what is the impact on carbon, water and energy fluxes?

3.1 Simulated vegetation distribution

Compared to the standard vegetation in the land surface model ORCHIDEE (with 13 PFTs), there are three additional PFTs in the new vegetation (16 PFTs): boreal C3 grasses, shrubs and non-vascular plants (NVPs). In the latter version, standard PFTs and associated vegetation dynamics were not modified in order to assess the consequences associated only to the introduction of the 3 new PFTs.

Fig. 3 shows the vegetation distribution in northern latitudes of the two different versions of ORCHIDEE (13 PFTs and 16 PFTs), for the recent period (mean over 2004-2013) and future projections (2091-2100) under two different RCP scenarios (RCP 4.5 and 8.5). Because inter-annual variability of vegetation distribution is much weaker than for typical climate variables, which are usually averaged over 30 years, the averaging period used here is 10 years. The most remarkable feature is the presence of shrubs in the 16-PFT version (in blue), which were not present in the 13-PFT version. There are dominant in areas previously devoid of trees in the 13-PFT simulation. This is due to the fact that trees are not directly affected by the presence of shrubs, while they outcompete shrubs through the competition for light. Trees are not impacted either by the presence of NVPs and boreal C3 grasses, so their coverage remained almost identical in the 13-PFT and 16-PFT simulations. The representation of the herbaceous layer does not allow differentiating standard C3 and C4 grasses, boreal grasses and NVPs. However, we note that the introduction of shrubs generally reduces the coverage of the herbaceous layer in the 16-PFT version of ORCHIDEE.

Concerning the differences between the present-day and the future modelled distributions, Fig. 3 indicates a global reduction of herbaceous and shrubs (in the 16-PFT version only) over time in favour of trees. This feature is even more striking in the RCP 8.5 scenario. It is important to note, however, that this evolution of vegetation cover fractions can hide possible contrasting changes in biomass.

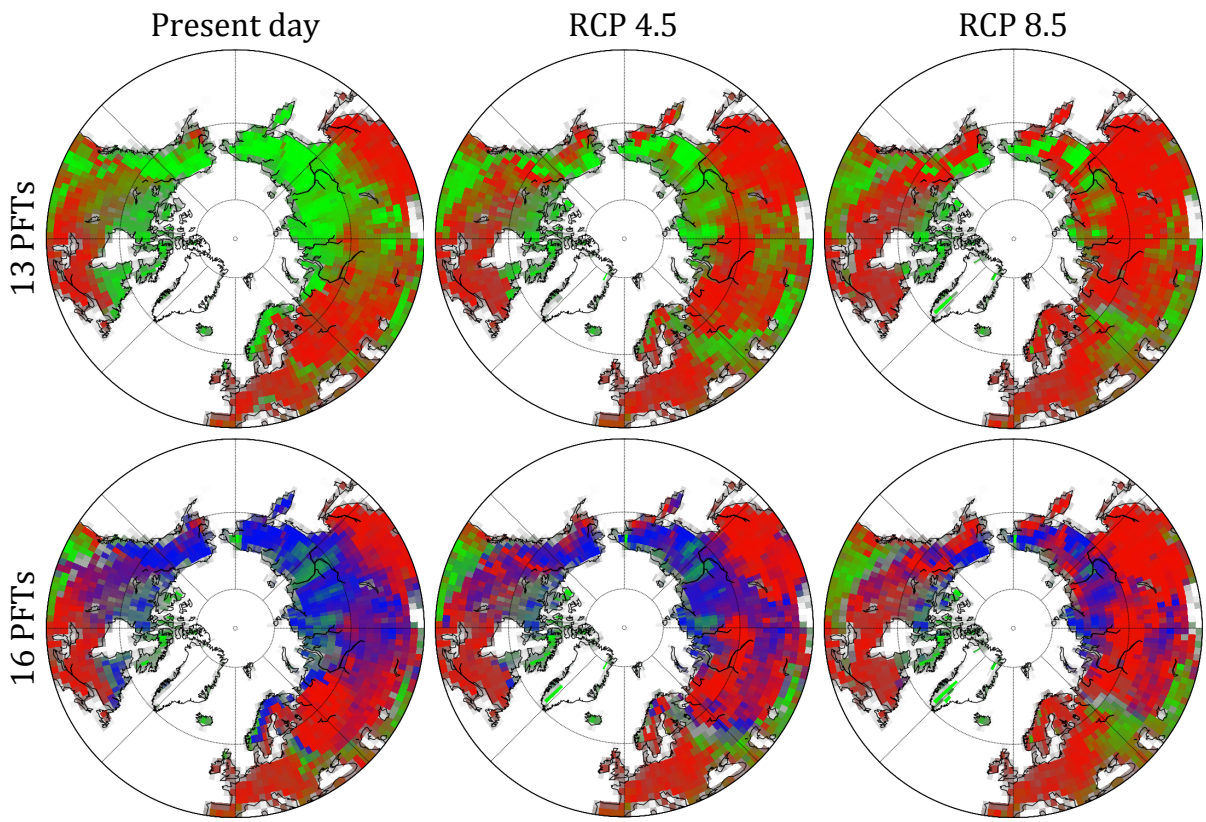


Fig. 3. Composite-colour maps of the simulated annual vegetation coverage with ORCHIDEE standard PFTs (13 PFTs) and with new boreal PFTs (16 PFTs) using three scenarios: present day (between 2004-2013) or with RCP 4.5 and 8.5 scenarios (between 2091 and 2100). Colour coding is such that saturation indicates total grid-scale coverage maximum (=1), while hue indicates the relative vegetation coverage following the three vegetation layers: trees (red), shrubs (blue) and herbaceous (green, including C3 and C4 standard grasses, boreal C3 grasses and NVPs) layers.

Fig. 4 displays a diversity metric, namely the Euclidian distance, which represents the disagreement between vegetation coverage in the present-day simulation and the future scenarios, for both model versions. Unlike Fig. 3, differences for PFTs inside each vegetation layer are discriminated. Thus, changes highlighted can be associated either to a change of vegetation layer between the present and the future, or to a change of PFTs inside a given layer. For example, in North America, changes concern both the transition from a layer to another layer (below 60°N), and transitions between different PFTs inside a given layer (above 60°N). Patterns of change are globally similar between the 13-PFT and 16-PFT simulations, even though changes seem to be more marked in the 13-PFT version. This indicates that future changes are located similarly between both versions, but are more substantial in the 13-PFT version. Areas of high Euclidian distance correspond to regions where trees appear or disappear (western Europe and Asia). This characteristic is probably due to a lack of intermediate layer between herbaceous and trees in the 13-PFT version, implying leaps from one layer to the other. Moreover, changes are clearly more important in the RCP 8.5 scenario than in the RCP 4.5 scenario in both model versions. The fuzzy Euclidian distance takes into account neighbouring grid cells, thus enabling a distinction between the appearance of a PFT (with values close to 1) and a shift in the PFT maximum coverage (with lower values). Qualitatively, when comparing Fig. 4 with Appendix B, we can note that RCP 8.5 displays more appearances of PFTs, while RCP 4.5 rather entails shifts in vegetation fractions.

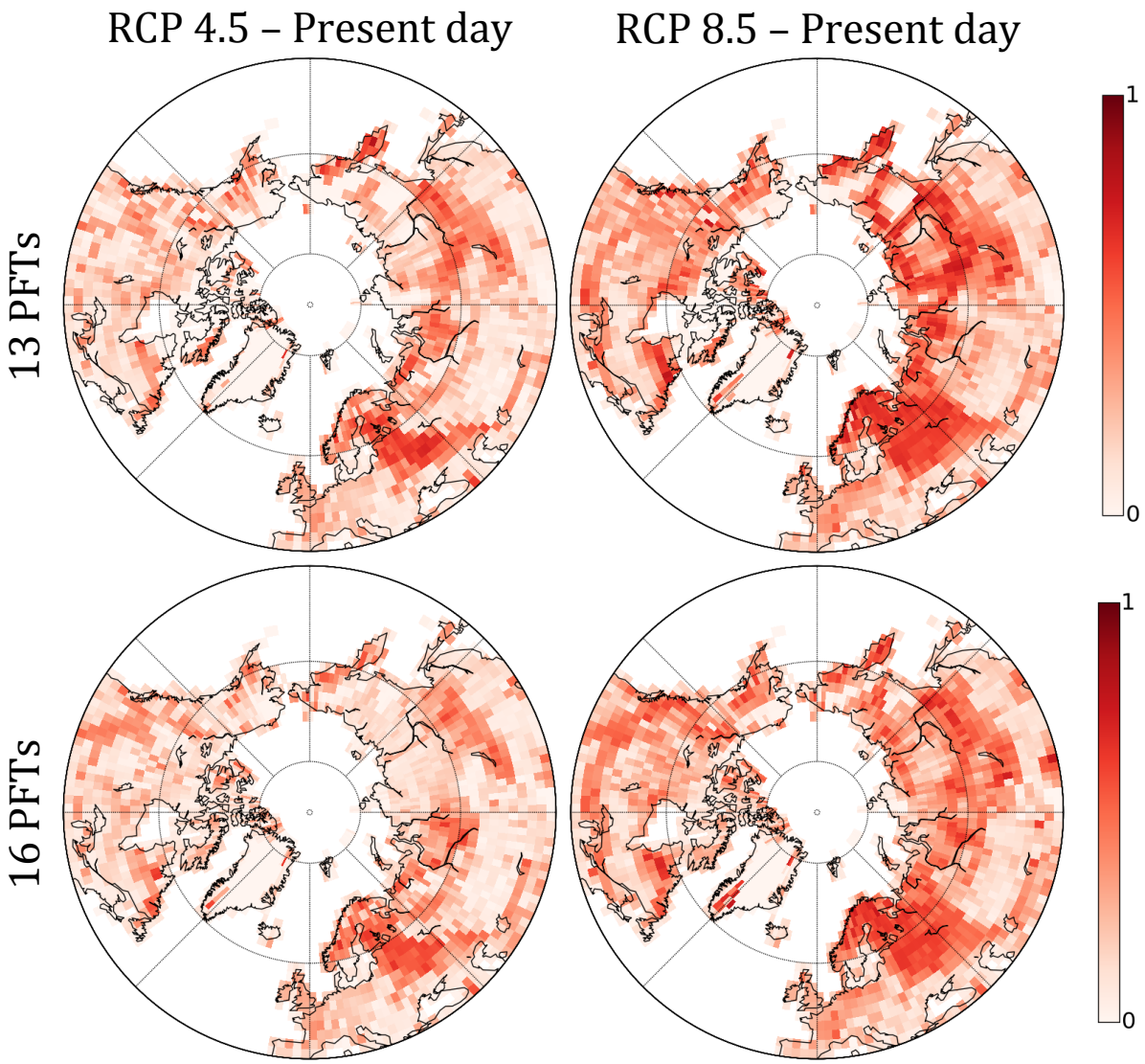


Fig. 4. Euclidian fuzzy distance of maximum vegetation coverage between future (RCP 4.5 and 8.5) and present simulations and with standard PFTs (13 PFTs) and new vegetation representation (16 PFTs).

To observe the regional changes of vegetation between current and future RCP 4.5 and RCP 8.5 simulations, we performed a biomization of the simulated 16 PFTs (Fig. 5). In the current day simulation the temperate forest biome is present mainly in Europe (except in Lapland) and temperate parklands are rarely present. The boreal forest biome is present in Asia and America and displays the same pattern as the one of trees in Fig. 3. Additionally, boreal parklands present a latitudinal continuity with boreal forests in both regions. Thus, the limit between forests and lower biomes is well respected between the composite colour map (Fig. 3) and the biomes. North, shrub tundra and ultimately tundra biomes are present in all Artic regions, following the GDD_5 limit of 700°Kdays. Further north, some areas with very low foliage projective cover (<0.005) are present, such as the desert biome in Svalbard or in coastal areas of Greenland. Dry grassland or shrubland biomes are mostly present south of 45°N. In future scenarios, we observe firstly an important reduction and a shift of tundra and shrub-tundra to the north, due to a global increase of GDD_5 with climate warming. In the RCP 8.5 scenario, these tundra biomes are only present north of 70°N and in areas around Greenland. The temperate parkland biome remains rare, but temperate forest occupies all Europe and a part of the 40-45°N latitudinal band in USA. Similarly, boreal forest and boreal parkland biomes develop further South and further North than their currently simulated distribution, but mainly boreal parklands in the RCP 4.5 simulation and boreal forest in the RCP 8.5 simulation. Dry grasslands/shrublands and deserts both display a weaker extension in future scenarios. Globally, the southern limit of tundra biomes shifts to the north by about 5° latitude in the RCP 4.5 scenario, and by about 10° latitude in the RCP 8.5 scenario. The location of actual forest biomes is maintained but their distribution increases drastically in future scenarios. Abrupt future northward retreat of the southern limit of the boreal forest belt, essentially due to drying, has been suggested as a possible tipping element in the climate system (e.g. Lenton et al., 2008). In our simulations, we do not see any sign of such abrupt changes.

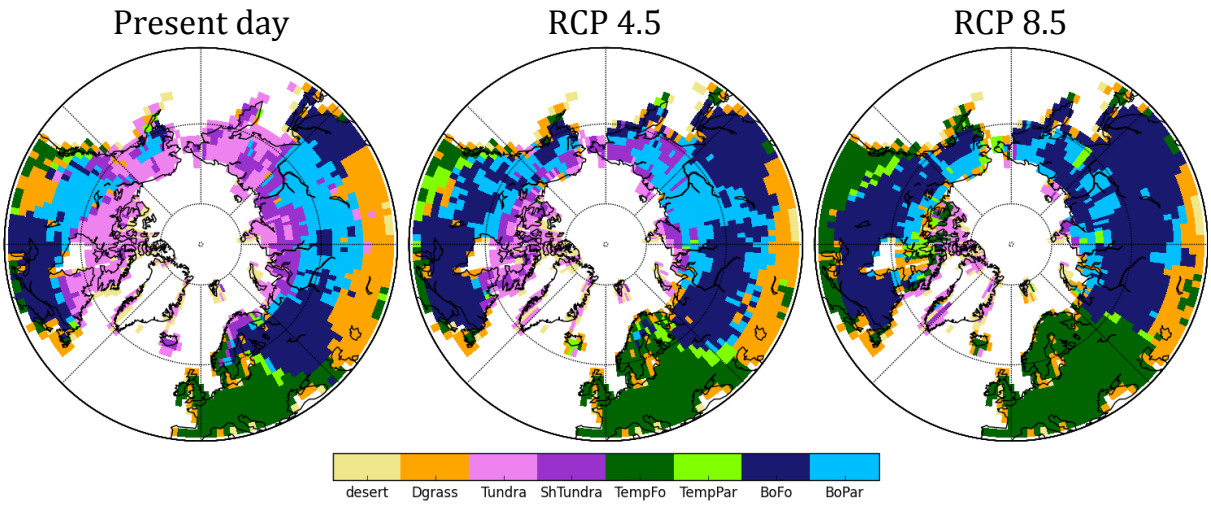


Fig. 5. Vegetation simulated by ORCHIDEE with the new boreal vegetation and using three scenarios: present day (between 2004-2013), with RCP 4.5 and 8.5 scenarios (between 2091 and 2100). Vegetation was converted to biomes following the method described in section 0. Eight biomes are represented: the *desert*, dry grassland or shrubland (*Dgrass*), *Tundra*, shrub-tundra (*ShTundra*), temperate forest (*TempFo*), temperate parkland (*TempPar*), boreal forest (*BoFo*) and boreal parkland (*BoPar*).

In order to compare and validate the current biomes simulated (Fig. 5), we extracted observed biomes from the Global Land Cover Characteristics (GLCC) database (version 2). This database (available on https://lta.cr.usgs.gov/glcc/globdoc2_0) is derived from 1km Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) and is described in Loveland et al. (2000). In order to use this biome data, we extract the dominant macro-ecosystems present at 0.5° resolution described using the "USGS Land Use/Land Cover System Legend (Modified Level 2)" biome discretisation (Fig. 6). Water, urban and glaciated regions were masked and biomes not represented at this resolution and at these latitudes were removed. There is a very good agreement between tundra and shrub tundra biomes simulated (Fig. 5) and observed (Fig. 6, in purple), with more observed woody tundra in the southern part. Dry grasses (orange) and desert (yellow) in simulated biomes (Fig. 5) well

correspond to grassland (chartreuse green) and barren or sparse vegetation (gold) in observations (Fig. 6). Boreal forests and parklands (blues) simulated correspond mainly to observed forests (in blue hues), except in Alaska. However, grasses are observed in a large part of Europe and at the southeast of North America, where tree biomes are simulated. This is due to human deforestation, which is observed, while the model simulates potential natural vegetation. Globally, the simulated biomes are in good agreement with observed biomes, especially north of 60°N, but without a distinction between forests and parklands in observations.

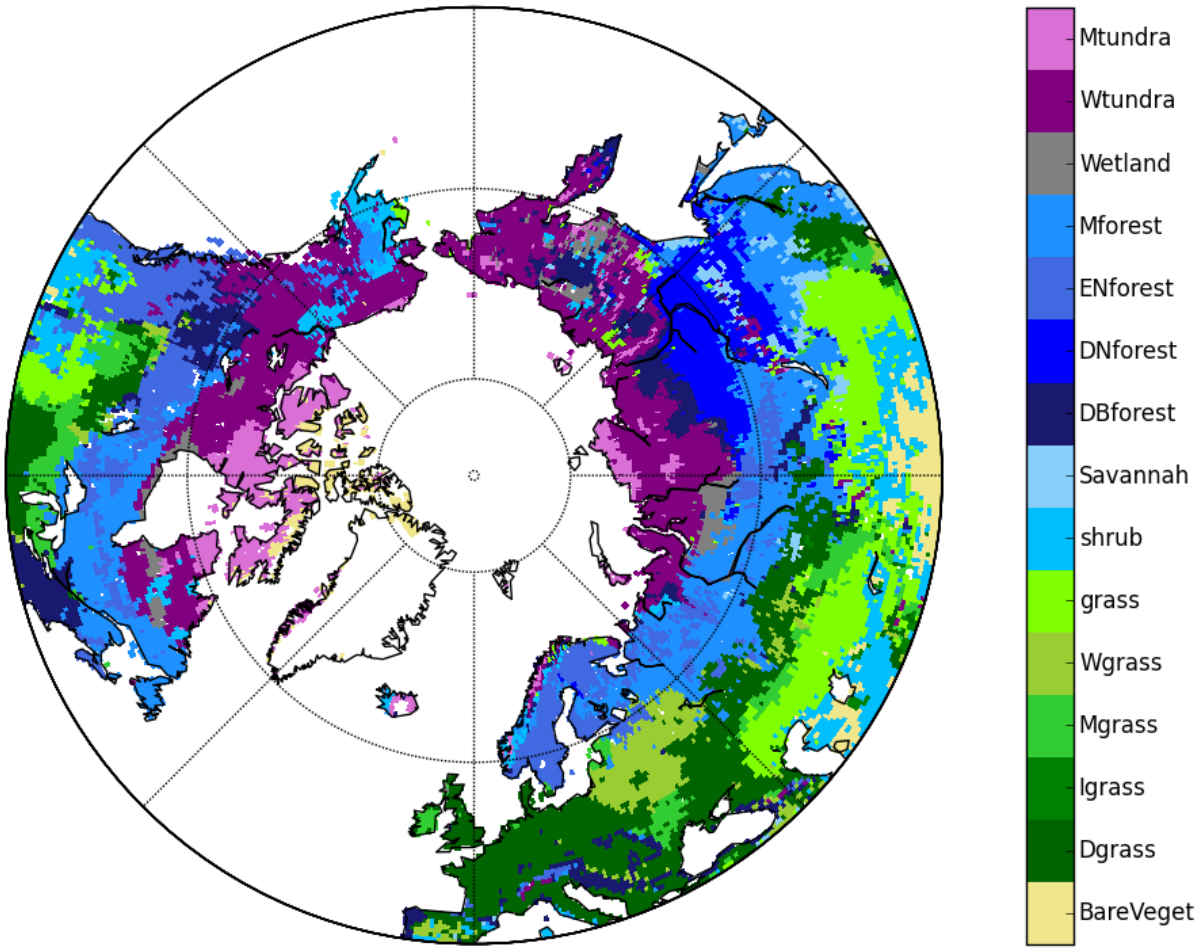


Fig. 6. Vegetation biome distribution adapted from GLCC (Loveland et al., 2000). The represented biomes are: barren or sparsely vegetated (*BareVeget*), dryland cropland and pasture (*Dgrass*), irrigated cropland and pasture (*Igrass*), cropland and grassland mosaic (*Mgrass*), cropland or woodland mosaic (*Wgrass*), grassland (*grass*), shrubland (*shrub*), *Savannah*, deciduous broadleaf forest (*DBforest*), deciduous needleleaf forest (*DNforest*), evergreen needleleaf forest (*ENforest*), mixed forest (*Mforest*), *Wetland*, wooded tundra (*Wtundra*) and mixed tundra (*Mtundra*).

Time series of 15-year smoothed maximum vegetation coverage for 3 latitudinal bands are presented in Fig. 7. Spinup starts without vegetation (100% bare soil) and gradually PFTs grow as a function of environmental conditions. While shrubs and vascular grasses need about 10 to 20 years to stabilise, NVPs require up to 50 years, and trees more than 100 years (around 250 years in most cases (not shown)). In regions where trees develop, we observe that once shrubs and grasses have reached their maximum development, trees progressively take over (Fig. 7 c). Locally, the same can be observed for shrubs over grasses, this behaviour being due to light competition (Section 2.2.1). Between 1901 and 1950, vegetation remains very stable, probably due to the fact that the spinup was computed using the forcing from this period. Then, from 1950 to 2000, changes progressively appear locally, but at the scale of whole latitudinal bands these local changes compensate for each other. After 2000, however, changes are more uniform in each latitudinal band, and thus clearer trends appear.
In the southernmost latitudinal band (55°N to 65°N), bare soil coverage decreases rapidly during spinup, accompanied by a rapid increase in shrubs and grasses cover. Trees progressively take over, while NVPs keep a

low coverage. In the simulation, NVP and grass coverage remains almost constant over time, while trees start to increase in the 2000s, around +80% for RCP 4.5 and +160% for RCP 8.5. Shrubs decrease accordingly at the same time. In the middle latitudinal band (65°N to 75°N), the equilibrium takes more time to take place. The maximum coverage reached by shrubs and trees is lower than for lower latitudes, while there are more grasses and NVPs. Generally, future modelled changes in coverage are lower than for 55°N to 65°N, except for trees, which were sparsely represented (5% coverage). For RCP 4.5, an increase of tree coverage of +200% can be observed, while for RCP 8.5, the increase is up to +400% (compensated for by a decrease of shrubs and grasses). For the northernmost band (polewards of 75°N), no tree can be observed, only few shrubs, less grasses than for other latitudes, and predominant coverage of NVPs (around 20%) until 1950. Almost no change with time can be noted for shrubs. However, grasses start to increase in the 2000s (+80% for RCP 4.5 and +110% for RCP 8.5), while NVPs increase slightly from 1950 (+15%), and more rapidly starting around 2020 until 2100 (+50%), with no difference between RCP scenarios. As a result, NVPs are dominant above 75°N, indicating a better adaptation to extreme climate, in spite of the very strong annual mean surface air temperature increase of about +9°C in high northern latitudes by 2100 in RCP 8.5 projected by IPSL-CM5 (+5°C in RCP 4.5). In southernmost latitudes, trees seem particularly sensitive to climate change, as they can become dominant in boreal latitudes (55°N to 65°N). Finally, shrubs can generally be found in more northern latitudes than trees.

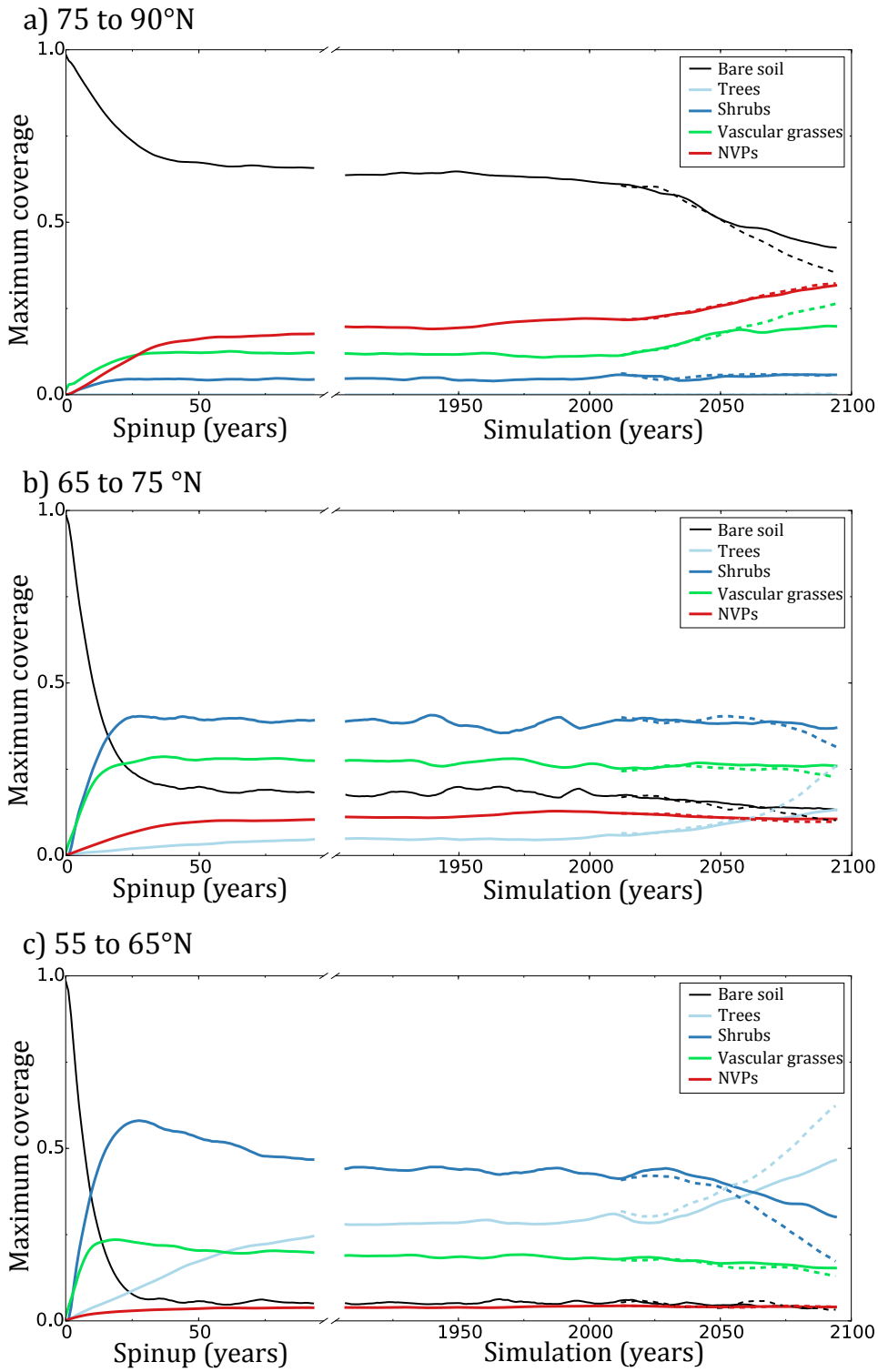


Fig. 7. Time series of 15 year-smoothed maximum vegetation coverage in three different latitudinal bands (55°N to 65°N, 65°N to 75°N and above 75°N), with the first 100 years of spinup (from 1k years), the present-day simulation (1901 to 2013), future (2014 to 2100) RCP 4.5 simulation (solid line) and future RCP 8.5 simulation (dotted line).

3.2 Flux changes

As expected and shown in the previous section, present and future simulations exhibit different vegetation distributions. In the following, we will first analyse the changes of fluxes and reservoirs of carbon, water and energy between present and scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5 simulations for the modified model version with 16 PFTs. Thereafter, these results are compared to outputs of the standard model version (13 PFTs).

Outputs of the three 16-PFT simulations (present, RCP4.5, RCP8.5) are displayed in Fig. 8. The figure shows total living biomasses, net primary productivity (NPP), transpiration, albedo and the active layer thickness for present day simulation (mean between 2004 and 2013), while difference of the same variables compared to the present day simulation are shown for the scenario runs. Present day living biomass, NPP and transpiration present similar patterns, with higher values in East America, Europe and Eastern Asia (although this is less marked for transpiration). These patterns match the geographic distribution of trees (Fig. 3), highlighting the direct link between high vegetation and these variables. Therefore the strong decrease of tree cover modelled in the future situated in Eastern Europe explains the decline of biomass, NPP and transpiration in both future scenarios, except for NPP in the RCP 8.5 scenario. However, on the global scale, we observe an increase of tree coverage and thus of biomass, NPP and transpiration. This is even more pronounced in the RCP 8.5 scenario. The increase is more substantial for NPP than for total living biomass and transpiration. For the latter, lower values can be seen in the future scenarios in central Europe. The fact that NPP increase is stronger than the increase of living biomass can be explained by the fact that biomass is essentially time-integrated productivity minus turnover, and thus reacts and equilibrates on longer time scales. For the annual albedo, the present day simulation shows an decrease of albedo in northern latitude with the new boreal vegetation, mainly driven by the decrease of snow cover in winter due to shrubs present above snow. With climate warming, the snow cover tends to decline, implying lower albedo in both future simulations, especially in the RCP 8.5 scenario.

Naturally, a strong decline in near-permafrost area (here defined as the regions where the active layer thickness, i.e. the maximum annual thaw depth, does not exceed 3 m) is simulated, in accordance with many previous studies (e.g. Koven et al., 2011; Slater and Lawrence, 2013). Areas with active layer thickening beyond 10 m (and thus effective permafrost disappearance at climatically relevant soil depths) within the next 100 years are approximately 2-3 times larger in RCP8.5 than in RCP4.5.

Showing the difference of these same variables between standard vegetation in ORCHIDEE (13 PFTs) and new vegetation description (16 PFTs), Fig. 9 allows assessing the impact of the new vegetation description on recent and future simulations (simulated map are available in Appendix C). In boreal areas (north of 50 to 60°N), the total living biomass is globally greater in the 13-PFT simulations than in those with 16 PFTs. Interestingly, the difference is rather small at the present and increases in the projections. The weak difference at present can be explained by the lower biomass of C3 boreal grasses compared to standard C3 grasses, which is partially compensated for the higher biomass of shrubs. In future scenarios, trees growth similarly between 13-PFT and 16-PFT versions, but in the first case they substitute grasses when in the second they substitute shrubs, increasing the differences and the impact of adding boreal C3 grasses. While the productivity follows the same trends of lower NPP in boreal regions, these differences decrease in the future simulation, especially with scenario 8.5. Therefore productivity in the 13-PFT and 16-PFT simulations seems to converge in the future. Similarly, transpiration is also supressed with 16 PFTs compared to the 13-PFT version, even if the difference appears less significant in the future scenario. Present-day albedo decreases towards the North in the 16-PFT version. This difference between the two model versions disappears in the future, particularly in RCP8.5. With the same snow depth and similar tree distribution, the differences are certainly due to the presence of shrubs (partially masking by snow) (see Druel et al., 2017), impacting the global albedo in winter. Combining the lower snow cover and the substitution of shrubs by trees in the future projection (Fig. 3 and Fig. 7), the reduction of albedo seems logical. Finally, the different vegetation versions do not really make a difference for the future permafrost reduction (considered here as an increase of active layer thickness beyond 10 m). Variations of active layer thickness do not have global trend, with a weak increase with 16-PFTs simulation in East of America, Europe and West of Asia and a weak decrease in West America and East Asia. Globally biomass, NPP and transpiration are lower in the new vegetation simulation, indicating a potential overestimation in the original model, which does not dispose of an adapted description of boreal vegetation types. While albedo is really impacted in the present day simulation due to shrubs, active layer thickness and permafrost extend are only weakly impacted. Moreover the differences caused by the different vegetation parameterization (Fig. 9) are weaker than differences due to future climate change (Fig. 8).

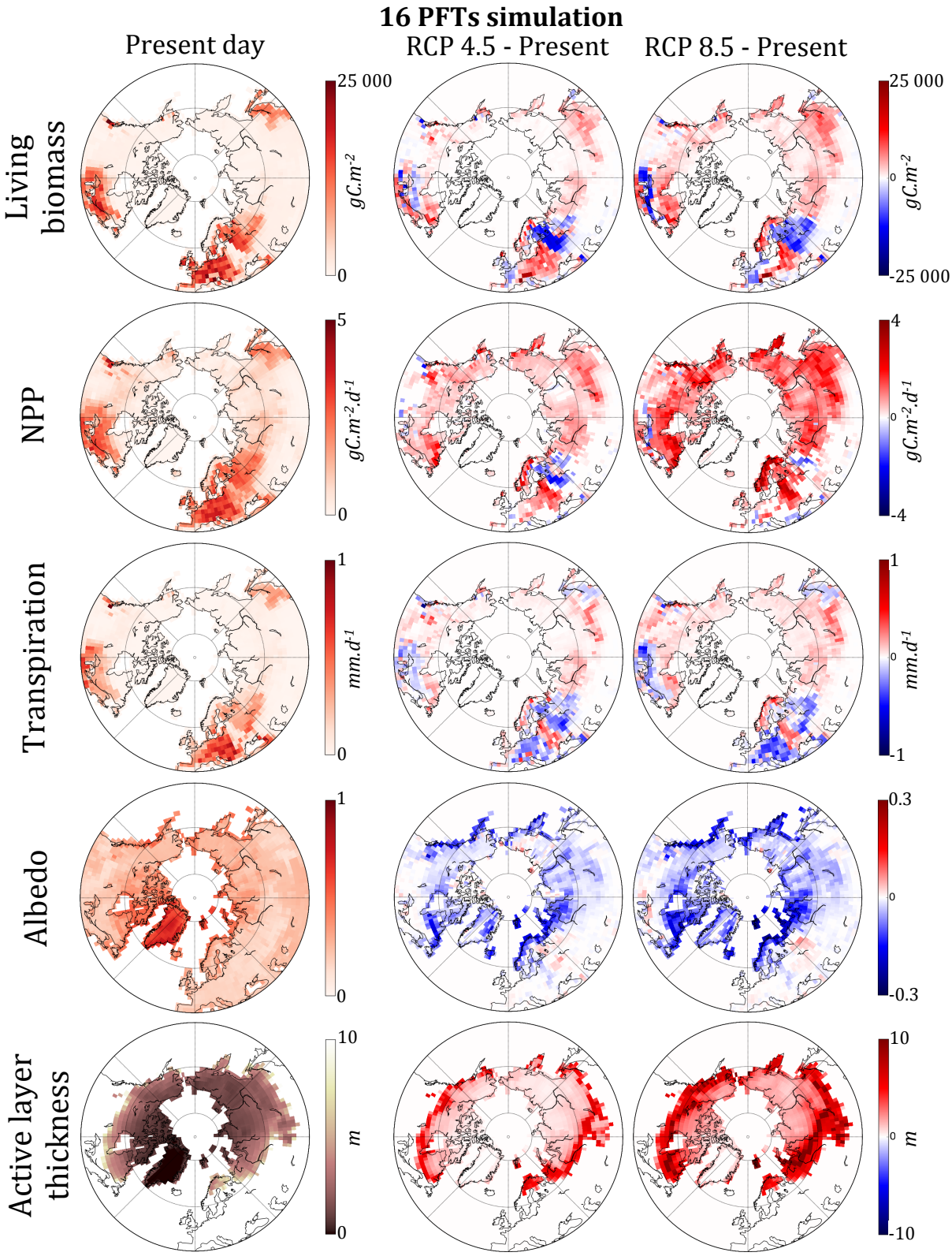


Fig. 8. Maps with new vegetation representation (16 PFTs) simulations of Living biomass, productivity (NPP), transpiration, albedo and active layers thickness. At left standard maps of this variables are presented, while in the middle and at right is the significant differences between future (scenario 4.5 and 8.5 respectively) and present simulations.

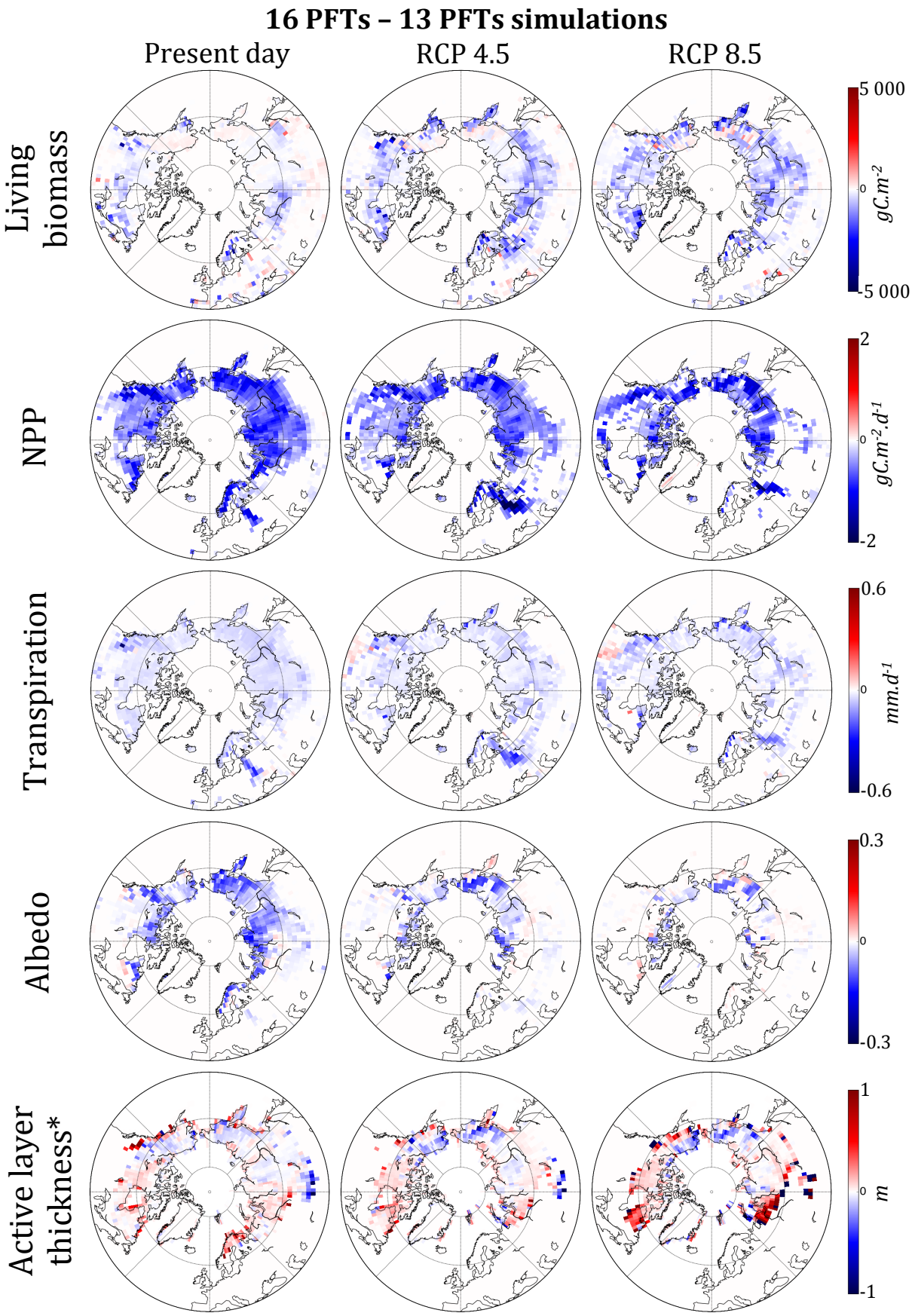


Fig. 9. Comparison maps between new vegetation representation (16 PFTs) and standard ORCHIDEE vegetation (13 PFTs) simulations of Living biomass, productivity (NPP), transpiration, albedo and active layers. From left to right, present and future (scenario 4.5 and 8.5) simulations are represented, with only significant difference (*except for the active layer thickness).

4 Discussion

4.1 Non modification of standard PFTs

The methodology employed in this work can explain an important part of the new vegetation distribution. Without changes for standard PFTs (trees and C3/C4 grasses) and because light competition plays an important role in the vegetation dynamics (section 2.2), the new boreal PFTs do not impact the distribution of trees (Fig. 3). Contrariwise and as expected, the introduction of shrubs, forming an intermediate stratum between herbaceous and trees, directly impacts the dispersion of grasses. Despite their same minimal critical temperature (section 2.2.3), shrubs are able to grow more polewards than trees because snow cover protects them against cold in winter. Shrubs therefore encroach on areas occupied by low vegetation in the 13-PFT version.

If the choice to modified at minimal the original PFTs present in ORCHIDEE is deliberate in order to highlight behaviour and impacts of the news boreal PFTs, this method can be questioned. On one hand, it allows to assess directly the impact of adding new PFTs relative to the standard version. But on the other hand, actually the standard 13-PFT version is meant to be able to represent roughly all major biome globally, even though specific boreal PFTs are not represented: in that sense, trees, in the original 13-PFT version, represent both shrubs and trees, and C3 grasses represent NVPs, C3 boreal grasses and C3 grasses. In that sense, one might argue that when the new vegetation description (PFTs) was introduced, the description of the original PFTs, and in particular of boreal trees, should have been adapted, potentially reducing their geographical extension. For example the northern limit of trees boreal is probably too high with the new boreal vegetation (particularly shrubs) and may require a decrease of the prescribed critical minimal temperatures, an important parameter determining the northward extension of many PFTs in ORCHIDEE (e.g., Zhu et al., 2015). Similarly, standard C3 grasses (original C3 grasses in ORCHIDEE) can be found at too high latitudes (above 75° N), where only boreal grasses should be found. Thus, their distribution should be differentiated, for example by limiting the development of standard grasses in northerly conditions. Finally, it should be noted that the latter problem does not seem to affect the distribution of NVPs, which are dominant in boreal regions because of adaptation to an extreme climate that is inhospitable to all other PFTs.

4.2 Arctic greening

The Arctic greening corresponds to the current increased vegetation development towards high latitudes (e.g., Bonfils et al., 2012; Elmendorf et al., 2012; Frost and Epstein, 2014; Zhu et al., 2016), mainly attributed to climate change through temperature and precipitation. Recent studies have shown that this Arctic greening will probably continue in the future (Jiang et al., 2012; Zhang et al., 2013).

In Section 3.1, we have shown a clear decrease of bare soil above 75° N, accompanied by an increase in the cover of NVPs and grasses, especially after the 2000s (Fig. 7). Between 55° N and 75° N, the tree cover rather increases at the expense of shrubs, while NVPs and grasses remain constant. The current simulation biomization results (Fig. 5) seem in accordance with observations (Fig. 6), especially in northern latitudes. Furthermore, the projected biomes changes suggest a very important shift of temperate and boreal vegetation, with an increase of 5 by 10° of the northern limit of forests and parklands. A shift of tundra is also simulated, but with globally a surface decrease in favour of more productive vegetation. These results highlight the occurrence of Arctic greening, demonstrating the ability of the new version to simulate vegetation shifts. In addition, the importance of newly introduced PFTs, especially NVPs, in the northernmost Arctic greening is emphasized.

However, no expansion of shrubs is simulated in this study (Fig. 7), which is at odds with recent observations (Blok et al., 2011; Bonfils et al., 2012; Frost and Epstein, 2014; Myers-Smith et al., 2015; Zhang et al., 2013). This discrepancy is certainly due to a combination of two factors. The first is that the northern limit of shrubs (and trees) was already too high in simulations of the recent period (Fig. 3 and Section 4.1), so that they cannot expand further north. Additional simulations including lower minimal critical temperatures (Section 2.2.3) were tested (not shown). However, while this improves the vegetation distribution (the northern limit of shrubs increase), no substantial shrubification is simulated. The second factor is linked to the protection of shrubs by

snow (Druel et al., 2017): with the decrease in snow cover (Fig. 8 and Section 3.2), the protection of shrubs diminishes, thereby reducing the main advantage of shrubs against trees in boreal regions. Note that other studies project an increase of snow cover further north, such as Brutel-Vuilmet et al. (2013). This lower insulation due to snow can be enhanced by the increase of the snow density due to higher temperature, i.e. more altered snow making the snow more conductive, even if in specific conditions this characteristic can be questioned (Domine et al., 2016).

Finally, it should be emphasized that Arctic greening mainly appears after the 2000s in the model, somewhat late compared to observations (e.g., Bonfils et al., 2012; Jia et al., 2003; Zhu et al., 2016). However, the 1,000 years spinup used in this study uses random meteorological forcing and CO_2 concentration from the years 1901 to 1950, during which a boreal temperature maximum was observed (Bengtsson et al., 2004). Temperature and CO_2 are the main driver of vegetation development in northern latitudes (Zhu et al., 2016). So after the spinup the vegetation was probably already in equilibrium with actual vegetation, with comparatively high temperatures (similar to temperatures in the late 1990s) and CO_2 mean equivalent to the late 1920 at the beginning of the simulations. As a result, no expansion of vegetation can be observed from 1950 to 2000, whereas the evolution of vegetation is important from 2000 to 2100 in future scenarios (with around +5°C in RCP 4.5 and +9°C in RCP 8.5, in boreal latitudes).

4.3 Impact of the introduction of new PFTs

Unequivocally, differences between future (4.5 and 8.5) scenarios and present day simulations are higher than differences between standard and new vegetation versions of the model (for the same period). However, significant quantitative differences are simulated between the 13-PFT and the 16-PFT versions (Fig. 9). The recent small negative biomass difference increases in future scenarios with the substitution of shrubs by trees when boreal grasses remain stable. The considerable negative productivity difference during the recent period, due to the introduction of boreal grasses and shrubs, which are less productive than standard grasses, tends to drop in future scenarios when boreal grasses and shrubs are gradually replaced by trees. Thus for carbon fluxes and reservoirs, the lower productivity and biomass of new boreal grasses and shrubs compared to standard PFTs can have an important impact. Similarly, the introduction of shrubs induces an important modification of albedo, often up to -0.1 in the present day simulation, which is reduced in future scenario simulations. It is thus the addition of boreal C3 grasses and shrubs that changes quantitatively most strongly the different fluxes. Transpiration seems to be less strongly impacted by new vegetation simulations, as well as the active layer thickness. It is surprising that permafrost is not significantly impacted by the presence of new boreal vegetation, even though the potential impact of NVPs on soil properties (thermal capacity and conductivity) is taken into account (following Soudzilovskaia et al., 2013, and described in Druel et al., 2017). In a simulation with standard PFTs plus NVPs only (14 PFTs, Appendix D) we observe a lower active layer depth than in the simulation with standard PFTs (13 PFTs). Two reasons could explain the lack of impact of NVPs on permafrost in the new boreal vegetation simulation: an insufficient moss thickness (through incorrect fixed density or simulated biomass), inducing a weak thermal insulation, or an increase in soil humidity (expected with the lower transpiration visible in Fig. 9), increasing the soil conductivity and thus the impact of high temperatures in summer.

It should be noted, however, that these comments do not take into account the probable over-representation of trees in current day simulations (Section 4.1). This implies that instead of northernmost boreal trees, shrubs will be simulated and a transitional zone will appear (with lower biomass, height, transpiration expected). In addition, we use in this study the original albedo and water balance present in the standard ORCHIDEE (in 2015). Their description in the model includes too low a surface albedo in winter and slightly too high a surface albedo in summer, and a water cycle that is not very well balanced. Future work will address these shortcomings.

5 Conclusion

In this work, we introduced the competition between different plant functional types including a new boreal vegetation description, namely non-vascular plants, boreal C3 grasses and shrubs, implemented recently in ORCHIDEE (Druel et al., 2017). The general approach was to modify as little as possible the standard PFTs represented in the model, in order to facilitate traceability and convergence between model versions. That also allows better isolating differences due to newly introduced PFTs. The current-day simulation with new boreal PFTs enables a better representation of observed LAI than with the standard vegetation, and, after a biomization, corresponds well to the actual biome map. As expected, in future scenario simulations an impressive Arctic greening is simulated, with a higher impact of NVPs in northern latitudes and of trees at intermediate latitudes. However, the model was not able to reproduce current Artic shrub expansion. The impacts of the introduction of new boreal PFTs are important, reducing globally the biomass, productivity, transpiration and albedo, but with different amplitudes and trends. They result mainly from an overestimation of C3 grass productivity in northern latitudes. Contrariwise, future projection shown fewer differences with standard PFTs simulation, involving that without new PFTs the vegetation changes are probably underrepresented.
To avoid to simulated standard C3 grasses in Arctic, boreal standard C3 grasses and boreal C3 grasses requires have to be separate, adding new competition between both PFTs. Considering that these two grass PFTs only differ by a few different parameter values (Druel et al., 2017), it could be more appropriate to use only one unique C3 grass PFT but with a few latitude-dependent parameters, as already considered (current other ORCHIDEE version). Other important results come from the introduction of shrubs (such as the impact on albedo or on roughness), providing a better representation of boreal processes. Nevertheless, an adaptation of tree parameters appears necessary to yield a better representation of the dispersion of shrubs and trees. In this study we only introduced one (boreal) shrub type. To provide simulations at a global scale including shrubs, it could be necessary to differentiate between different types of shrubs according to climate (boreal, temperate or tropical), with new kinds of competition (i.e. competition for water in savannahs). It would also be possible, as for trees, to distinguish between different types such as needleleaf and summergreen shrubs. Finally, the simulated NVPs distribution is satisfactory, but with a lower impact on permafrost than expected. A detailed evaluation of the impact of NVPs using simulations at selected sites would probably shed light on this specific issue. On the other hand, while NVPs do not have a substantial impact on carbon fluxes on a decadal scale, it would be interesting to assess on a centennial or millennial time scale if the introduction of NVPs can impact carbon fluxes and stocks, especially into the soil (in the permafrost), as suggested by (Koven et al., 2009).

This work on improving the description of boreal vegetation dynamics in a global land surface model reveals the importance of recalibrating a few key parameters of standard PFTs to distinguish between new boreal vegetation and standard PFTs occurring in these landscapes. Other processes potentially playing a role in dynamical vegetation, such as the impact of fire or herbivory, could be adapted from trees to shrubs with a differential effect. For example, trees are more resistant to fire, but with better regeneration shrubs will be advantaged by successive fires. Currently, the impact of these processes is unchanged from the original description. Moreover, this version of ORCHIDEE does not contain all processes that may occur in boreal dynamics, such as the nutrient availability and requirement, or the root profile depending on biomass. Another dynamical approach would be to consider the competition between PFTs not based on the grid cell fraction but on the individuals (e.g. in Smith et al., 2011). Some of these developments are currently carried out in ORCHIDEE and in other models.

References

Aiba, S.-I. and Kohyama, T.: Tree Species Stratification in Relation to Allometry and Demography in a Warm-Temperate Rain Forest, J. Ecol., 84(2), 207, doi:10.2307/2261356, 1996.

Bengtsson, L., Semenov, V. A. and Johannessen, O. M.: The Early Twentieth-Century Warming in the Arctic—A Possible Mechanism, J. Clim., 17(20), 4045–4057, doi:10.1175/1520-0442(2004)017<4045:TETWIT>2.0.CO;2, 2004.

Bentley, J. R., Seegrist, D. and Blakeman, D. A.: A technique for sampling low shrub vegetation, by cromwn volume classes, Res Note PSW-RN-215 Berkeley CA US Dep. Agric. For. Serv. Pac. Southwest For. Range Exp. Stn., 12, 1970.

Betts, R. A.: Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo, Nature, 408(6809), 187–190, doi:10.1038/35041545, 2000.

Blok, D., Schaepman-Strub, G., Bartholomeus, H., Heijmans, M. M. P. D., Maximov, T. C. and Berendse, F.: The response of Arctic vegetation to the summer climate: relation between shrub cover, NDVI, surface albedo and temperature, Environ. Res. Lett., 6(3), 35502, doi:10.1088/1748-9326/6/3/035502, 2011.

Bonan, G. B.: Land-atmosphere CO_2 exchange simulated by a land surface process model coupled to an atmospheric general circulation model, J. Geophys. Res., 100(D2), 2817, doi:10.1029/94JD02961, 1995.

Bonfils, C. J. W., Phillips, T. J., Lawrence, D. M., Cameron-Smith, P., Riley, W. J. and Subin, Z. M.: On the influence of shrub height and expansion on northern high latitude climate, Environ. Res. Lett., 7(1), 15503, doi:10.1088/1748-9326/7/1/015503, 2012.

Boone, A.: Description du schema de neige ISBA-ES (Explicit Snow), Note Cent. Meteo-FranceCNRM, (70), 53, 2002.

Brovkin, V., Levis, S., Loutre, M.-F., Crucifix, M., Claussen, M., Ganopolski, A., Kubatzki, C. and Petoukhov, V.: Stability Analysis of the Climate-Vegetation System in the Northern High Latitudes, Clim. Change, 57(1/2), 119–138, doi:10.1023/A:1022168609525, 2003.

Brutel-Vuilmet, C., Ménégoz, M. and Krinner, G.: An analysis of present and future seasonal Northern Hemisphere land snow cover simulated by CMIP5 coupled climate models, The Cryosphere, 7(1), 67–80, doi:10.5194/tc-7-67-2013, 2013.

Chadburn, S. E., Burke, E. J., Essery, R. L. H., Boike, J., Langer, M., Heikenfeld, M., Cox, P. M. and Friedlingstein, P.: Impact of model developments on present and future simulations of permafrost in a global land-surface model, The Cryosphere, 9(4), 1505–1521, doi:10.5194/tc-9-1505-2015, 2015.

Chapin, F. S., Mcguire, A. D., Randerson, J., Pielke, R., Baldocchi, D., Hobbie, S. E., Roulet, N., Eugster, W., Kasischke, E., Rastetter, E. B., Zimov, S. A. and Running, S. W.: Arctic and boreal ecosystems of western North America as components of the climate system, Glob. Change Biol., 6(S1), 211–223, doi:10.1046/j.1365-2486.2000.06022.x, 2000.

Christensen, T. ., Jonasson, S., Callaghan, T. . and Havström, M.: On the potential CO2 release from tundra soils in a changing climate, Appl. Soil Ecol., 11(2–3), 127–134, doi:10.1016/S0929-1393(98)00146-2, 1999.

Cook, B. I., Bonan, G. B., Levis, S. and Epstein, H. E.: Rapid vegetation responses and feedbacks amplify climate model response to snow cover changes, Clim. Dyn., 30(4), 391–406, doi:10.1007/s00382-007-0296-z, 2008.

Cox, P. M., Betts, R. A., Jones, C. D., Spall, S. A. and Totterdell, I. J.: Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model, Nature, 408(6809), 184–187, doi:10.1038/35041539, 2000.

Crucifix, M. and Loutre, F.: Transient simulations over the last interglacial period (126-115 kyr BP): feedback

and forcing analysis, Clim. Dyn., 19(5–6), 417–433, doi:10.1007/s00382-002-0234-z, 2002.

Domine, F., Barrere, M. and Sarrazin, D.: Seasonal evolution of the effective thermal conductivity of the snow and the soil in high Arctic herb tundra at Bylot Island, Canada, The Cryosphere, 10(6), 2573–2588, doi:10.5194/tc-10-2573-2016, 2016.

Druel, A., Peylin, P., Krinner, G., Ciais, P., Viovy, N., Peregon, A., Bastrikov, V., Kosykh, N. P. and Mironycheva-Tokareva, N. P.: Towards a more detailed representation of high-latitude vegetation in the global land surface model ORCHIDEE (ORC-HL-VEGv1.0), Geosci. Model Dev. Discuss., in review, doi:10.5194/gmd-2017-65, 2017.

Dufresne, J.-L., Foujols, M.-A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., Balkanski, Y., Bekki, S., Bellenger, H., Benshila, R., Bony, S., Bopp, L., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Cheruy, F., Codron, F., Cozic, A., Cugnet, D., de Noblet, N., Duvel, J.-P., Ethé, C., Fairhead, L., Fichefet, T., Flavoni, S., Friedlingstein, P., Grandpeix, J.-Y., Guez, L., Guilyardi, E., Hauglustaine, D., Hourdin, F., Idelkadi, A., Ghattas, J., Joussaume, S., Kageyama, M., Krinner, G., Labetoulle, S., Lahellec, A., Lefebvre, M.-P., Lefevre, F., Levy, C., Li, Z. X., Lloyd, J., Lott, F., Madec, G., Mancip, M., Marchand, M., Masson, S., Meurdesoif, Y., Mignot, J., Musat, I., Parouty, S., Polcher, J., Rio, C., Schulz, M., Swingedouw, D., Szopa, S., Talandier, C., Terray, P., Viovy, N. and Vuichard, N.: Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5, Clim. Dyn., 40(9–10), 2123–2165, doi:10.1007/s00382-012-1636-1, 2013.

Elmendorf, S. C., Henry, G. H. R., Hollister, R. D., Björk, R. G., Boulanger-Lapointe, N., Cooper, E. J., Cornelissen, J. H. C., Day, T. A., Dorrepaal, E., Elumeeva, T. G., Gill, M., Gould, W. A., Harte, J., Hik, D. S., Hofgaard, A., Johnson, D. R., Johnstone, J. F., Jónsdóttir, I. S., Jorgenson, J. C., Klanderud, K., Klein, J. A., Koh, S., Kudo, G., Lara, M., Lévesque, E., Magnússon, B., May, J. L., Mercado-Dı´az, J. A., Michelsen, A., Molau, U., Myers-Smith, I. H., Oberbauer, S. F., Onipchenko, V. G., Rixen, C., Martin Schmidt, N., Shaver, G. R., Spasojevic, M. J., Þórhallsdóttir, Þ. E., Tolvanen, A., Troxler, T., Tweedie, C. E., Villareal, S., Wahren, C.-H., Walker, X., Webber, P. J., Welker, J. M. and Wipf, S.: Plot-scale evidence of tundra vegetation change and links to recent summer warming, Nat. Clim. Change, 2(6), 453–457, doi:10.1038/nclimate1465, 2012.

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J. and Taylor, K. E.: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, Geosci. Model Dev., 9(5), 1937–1958, doi:10.5194/gmd-9-1937-2016, 2016.

Foley, J. A., Kutzbach, J. E., Coe, M. T. and Levis, S.: Feedbacks between climate and boreal forests during the Holocene epoch, Nature, 371(6492), 52–54, doi:10.1038/371052a0, 1994.

Frost, G. V. and Epstein, H. E.: Tall shrub and tree expansion in Siberian tundra ecotones since the 1960s, Glob. Change Biol., 20(4), 1264–1277, doi:10.1111/gcb.12406, 2014.

Gallimore, R. G. and Kutzbach, J. E.: Role of orbitally induced changes in tundra area in the onset of glaciation, Nature, 381(6582), 503–505, doi:10.1038/381503a0, 1996.

Gill, J. L.: Ecological impacts of the late Quaternary megaherbivore extinctions, New Phytol., 201(4), 1163–1169, doi:10.1111/nph.12576, 2014.

Gouttevin, I., Krinner, G., Ciais, P., Polcher, J. and Legout, C.: Multi-scale validation of a new soil freezing scheme for a land-surface model with physically-based hydrology, The Cryosphere, 6(2), 407–430, doi:10.5194/tc-6-407-2012, 2012.

Hagen, A.: Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps, Int. J. Geogr. Inf. Sci., 17(3), 235–249, doi:10.1080/13658810210157822, 2003.

Haxeltine, A. and Prentice, I. C.: BIOME3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types, Glob.

Biogeochem. Cycles, 10(4), 693–709, doi:10.1029/96GB02344, 1996.

Jia, G. J., Epstein, H. E. and Walker, D. A.: Greening of arctic Alaska, 1981-2001: GREENING OF ARCTIC ALASKA, 1981-2001, Geophys. Res. Lett., 30(20), n/a-n/a, doi:10.1029/2003GL018268, 2003.

Jiang, Y., Zhuang, Q., Schaphoff, S., Sitch, S., Sokolov, A., Kicklighter, D. and Melillo, J.: Uncertainty analysis of vegetation distribution in the northern high latitudes during the 21st century with a dynamic vegetation model: Uncertainty Analysis of Vegetation Distribution, Ecol. Evol., 2(3), 593–614, doi:10.1002/ece3.85, 2012.

Joos, F., Gerber, S., Prentice, I. C., Otto-Bliesner, B. L. and Valdes, P. J.: Transient simulations of Holocene atmospheric carbon dioxide and terrestrial carbon since the Last Glacial Maximum: HOLOCENE ATMOSPHERIC CO_2, Glob. Biogeochem. Cycles, 18(2), n/a-n/a, doi:10.1029/2003GB002156, 2004.

Kageyama, M., Braconnot, P., Bopp, L., Mariotti, V., Roy, T., Woillez, M.-N., Caubel, A., Foujols, M.-A., Guilyardi, E., Khodri, M., Lloyd, J., Lombard, F. and Marti, O.: Mid-Holocene and last glacial maximum climate simulations with the IPSL model: part II: model-data comparisons, Clim. Dyn., 40(9–10), 2469–2495, doi:10.1007/s00382-012-1499-5, 2013.

Koven, C., Friedlingstein, P., Ciais, P., Khvorostyanov, D., Krinner, G. and Tarnocai, C.: On the formation of high-latitude soil carbon stocks: Effects of cryoturbation and insulation by organic matter in a land surface model, Geophys. Res. Lett., 36(21), doi:10.1029/2009GL040150, 2009.

Koven, C. D., Ringeval, B., Friedlingstein, P., Ciais, P., Cadule, P., Khvorostyanov, D., Krinner, G. and Tarnocai, C.: Permafrost carbon-climate feedbacks accelerate global warming, Proc. Natl. Acad. Sci., 108(36), 14769–14774, doi:10.1073/pnas.1103910108, 2011.

Koven, C. D., Lawrence, D. M. and Riley, W. J.: Permafrost carbon−climate feedback is sensitive to deep soil carbon decomposability but not deep soil nitrogen dynamics, Proc. Natl. Acad. Sci., 201415123, doi:10.1073/pnas.1415123112, 2015.

Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S. and Prentice, I. C.: A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system: DVGM FOR COUPLED CLIMATE STUDIES, Glob. Biogeochem. Cycles, 19(1), n/a-n/a, doi:10.1029/2003GB002199, 2005.

Legendre, P., Borcard, D. and Peres-Neto, P. R.: Analysing beta diversity: Partitioning the spacial variation of community composition data, Ecol. Monogr., 75(4), 435–450, doi:10.1890/05-0549, 2005.

Lenton, T. M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S. and Schellnhuber, H. J.: Tipping elements in the Earth's climate system, Proc. Natl. Acad. Sci., 105(6), 1786–1793, doi:10.1073/pnas.0705414105, 2008.

Loveland, T. R., Reed, B. C., Brown, J. F., Ohlen, D. O., Zhu, Z., Yang, L. and Merchant, J. W.: Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data, Int. J. Remote Sens., 21(6–7), 1303–1330, doi:10.1080/014311600210191, 2000.

Lufafa, A., Diédhiou, I., Ndiaye, N. A. S., Séné, M., Kizito, F., Dick, R. P. and Noller, J. S.: Allometric relationships and peak-season community biomass stocks of native shrubs in Senegal's Peanut Basin, J. Arid Environ., 73(3), 260–266, doi:10.1016/j.jaridenv.2008.09.020, 2009.

Martínez, A. J. and López-Portillo, J.: Allometry of *Prosopis glandulosa* var. *torreyana* along a topographic gradient in the Chihuahuan desert, J. Veg. Sci., 14(1), 111–120, doi:10.1111/j.1654-1103.2003.tb02133.x, 2003.

Meissner, K. J., Weaver, A. J., Matthews, H. D. and Cox, P. M.: The role of land surface dynamics in glacial inception: a study with the UVic Earth System Model, Clim. Dyn., 21(7–8), 515–537, doi:10.1007/s00382-003-0352-2, 2003.

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P. and Wilbanks, T. J.: The next generation of scenarios for climate change research and assessment, Nature, 463(7282), 747–756, doi:10.1038/nature08823, 2010.

Myers-Smith, I. H., Elmendorf, S. C., Beck, P. S. A., Wilmking, M., Hallinger, M., Blok, D., Tape, K. D., Rayback, S. A., Macias-Fauria, M., Forbes, B. C., Speed, J. D. M., Boulanger-Lapointe, N., Rixen, C., Lévesque, E., Schmidt, N. M., Baittinger, C., Trant, A. J., Hermanutz, L., Collier, L. S., Dawes, M. A., Lantz, T. C., Weijers, S., Jørgensen, R. H., Buchwal, A., Buras, A., Naito, A. T., Ravolainen, V., Schaepman-Strub, G., Wheeler, J. A., Wipf, S., Guay, K. C., Hik, D. S. and Vellend, M.: Climate sensitivity of shrub growth across the tundra biome, Nat. Clim. Change, 5(9), 887–891, doi:10.1038/nclimate2697, 2015.

de Noblet, N. I., Prentice, I. C., Joussaume, S., Texier, D., Botta, A. and Haxeltine, A.: Possible role of atmosphere-biosphere interactions in triggering the Last Glaciation, Geophys. Res. Lett., 23(22), 3191–3194, doi:10.1029/96GL03004, 1996.

Oki, T. and Kanae, S.: Global Hydrological Cycles and World Water Resources, Science, 313(5790), 1068–1072, doi:10.1126/science.1128845, 2006.

Olofsson, J., Oksanen, L., Callaghan, T., Hulme, P. E., Oksanen, T. and Suominen, O.: Herbivores inhibit climate-driven shrub expansion on the tundra: herbivores inhibit shrub expansion, Glob. Change Biol., 15(11), 2681–2693, doi:10.1111/j.1365-2486.2009.01935.x, 2009.

Ottlé, C., Lescure, J., Maignan, F., Poulter, B., Wang, T. and Delbart, N.: Use of various remote sensing land cover products for plant functional type mapping over Siberia, Earth Syst. Sci. Data, 5(2), 331–348, doi:10.5194/essd-5-331-2013, 2013.

Pachzelt, A., Forrest, M., Rammig, A., Higgins, S. I. and Hickler, T.: Potential impact of large ungulate grazers on African vegetation, carbon storage and fire regimes: Grazer impacts on African savannas, Glob. Ecol. Biogeogr., 24(9), 991–1002, doi:10.1111/geb.12313, 2015.

Piao, S., Friedlingstein, P., Ciais, P., Zhou, L. and Chen, A.: Effect of climate and CO_2 changes on the greening of the Northern Hemisphere over the past two decades, Geophys. Res. Lett., 33(23), doi:10.1029/2006GL028205, 2006.

Porada, P., Ekici, A. and Beer, C.: Effects of bryophyte and lichen cover on permafrost soil temperature at large scale, Cryosphere Discuss., 1–31, doi:10.5194/tc-2015-223, 2016.

Poulter, B., Ciais, P., Hodson, E., Lischke, H., Maignan, F., Plummer, S. and Zimmermann, N. E.: Plant functional type mapping for earth system models, Geosci. Model Dev., 4(4), 993–1010, doi:10.5194/gmd-4-993-2011, 2011.

Prentice, I. C. and Leemans, R.: Pattern and Process and the Dynamics of Forest Structure: A Simulation Approach, J. Ecol., 78(2), 340, doi:10.2307/2261116, 1990.

Prentice, I. C., Cramer, W., Harrison, S. P., Leemans, R., Monserud, R. A. and Solomon, A. M.: Special Paper: A Global Biome Model Based on Plant Physiology and Dominance, Soil Properties and Climate, J. Biogeogr., 19(2), 117, doi:10.2307/2845499, 1992.

Prentice, I. C., Harrison, S. P. and Bartlein, P. J.: Global vegetation and terrestrial carbon cycle changes after the last ice age, New Phytol., 189(4), 988–998, doi:10.1111/j.1469-8137.2010.03620.x, 2011.

Quillet, A., Peng, C. and Garneau, M.: Toward dynamic global vegetation models for simulating vegetation–climate interactions and feedbacks: recent developments, limitations, and future challenges, Environ. Rev., 18(NA), 333–353, doi:10.1139/A10-016, 2010.

Schimel, D. S.: Terrestrial ecosystems and the carbon cycle, Glob. Change Biol., 1(1), 77–91,

doi:10.1111/j.1365-2486.1995.tb00008.x, 1995.

Sinclair, A. R. E., Mduma, S. A. R., Hopcraft, J. G. C., Fryxell, J. M., Hilborn, R. and Thirgood, S.: Long-Term Ecosystem Dynamics in the Serengeti: Lessons for Conservation, Conserv. Biol., 21(3), 580–590, doi:10.1111/j.1523-1739.2007.00699.x, 2007.

Sitch, S., Smith, B., Prentice, I. C., Arneth, A., Bondeau, A., Cramer, W., Kaplan, J. O., Levis, S., Lucht, W., Sykes, M. T., Thonicke, K. and Venevsky, S.: Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model, Glob. Change Biol., 9(2), 161–185, doi:10.1046/j.1365-2486.2003.00569.x, 2003.

Slater, A. G. and Lawrence, D. M.: Diagnosing Present and Future Permafrost from Climate Models, J. Clim., 26(15), 5608–5623, doi:10.1175/JCLI-D-12-00341.1, 2013.

Smith, B., Prentice, I. C. and Sykes, M. T.: Representation of vegetation dynamics in the modelling of terrestrial ecosystems: comparing two contrasting approaches within European climate space: Vegetation dynamics in ecosystem models, Glob. Ecol. Biogeogr., 10(6), 621–637, doi:10.1046/j.1466-822X.2001.t01-1-00256.x, 2001.

Smith, B., Samuelsson, P., Wramneby, A. and Rummukainen, M.: A model of the coupled dynamics of climate, vegetation and terrestrial ecosystem biogeochemistry for regional applications: REGIONAL CLIMATE-VEGETATION-BIOGEOCHEMISTRY MODEL, Tellus A, 63(1), 87–106, doi:10.1111/j.1600-0870.2010.00477.x, 2011.

Soudzilovskaia, N. A., van Bodegom, P. M. and Cornelissen, J. H. C.: Dominant bryophyte control over high-latitude soil temperature fluctuations predicted by heat transfer traits, field moisture regime and laws of thermal insulation, edited by J. Schweitzer, Funct. Ecol., 27(6), 1442–1454, doi:10.1111/1365-2435.12127, 2013.

Thonicke, K., Venevsky, S., Sitch, S. and Cramer, W.: The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into a Dynamic Global Vegetation Model: Fire disturbance and global vegetation dynamics, Glob. Ecol. Biogeogr., 10(6), 661–677, doi:10.1046/j.1466-822X.2001.00175.x, 2008.

Trenberth, K. E., Fasullo, J. T. and Kiehl, J.: Earth's Global Energy Budget, Bull. Am. Meteorol. Soc., 90(3), 311–323, doi:10.1175/2008BAMS2634.1, 2009.

Viovy, N.: Forcing ORCHIDEE: 1.1 CRU-NCEP, Forching OCRCHIDEE [online] Available from: http://forge.ipsl.jussieu.fr/orchidee/wiki/Documentation/Forcings#a1.1CRU-NCEP (Accessed 9 June 2016), 2015.

Wang, T., Ottlé, C., Boone, A., Ciais, P., Brun, E., Morin, S., Krinner, G., Piao, S. and Peng, S.: Evaluation of an improved intermediate complexity snow scheme in the ORCHIDEE land surface model: ORCHIDEE SNOW MODEL EVALUATION, J. Geophys. Res. Atmospheres, 118(12), 6064–6079, doi:10.1002/jgrd.50395, 2013.

Wei, Y., Liu, S., Huntzinger, D. N., Michalak, A. M., Viovy, N., Post, W. M., Schwalm, C. R., Schaefer, K., Jacobson, A. R., Lu, C., Tian, H., Ricciuto, D. M., Cook, R. B., Mao, J. and Shi, X.: The North American Carbon Program Multi-scale Synthesis and Terrestrial Model Intercomparison Project – Part 2: Environmental driver data, Geosci. Model Dev., 7(6), 2875–2893, doi:10.5194/gmd-7-2875-2014, 2014.

Woillez, M.-N., Kageyama, M., Krinner, G., de Noblet-Ducoudré, N., Viovy, N. and Mancip, M.: Impact of CO2 and climate on the Last Glacial Maximum vegetation: results from the ORCHIDEE/IPSL models, Clim. Past, 7(2), 557–577, doi:10.5194/cp-7-557-2011, 2011.

Yoshimori, M., Reader, M. C., Weaver, A. J. and McFarlane, N. A.: On the causes of glacial inception at 116 kaBP, Clim. Dyn., 18(5), 383–402, doi:10.1007/s00382-001-0186-8, 2002.

Zhang, W., Miller, P. A., Smith, B., Wania, R., Koenigk, T. and Döscher, R.: Tundra shrubification and tree-line

advance amplify arctic climate warming: results from an individual-based dynamic vegetation model, Environ. Res. Lett., 8(3), 34023, doi:10.1088/1748-9326/8/3/034023, 2013.

Zhu, D., Peng, S. S., Ciais, P., Viovy, N., Druel, A., Kageyama, M., Krinner, G., Peylin, P., Ottlé, C., Piao, S. L., Poulter, B., Schepaschenko, D. and Shvidenko, A.: Improving the dynamics of Northern Hemisphere high-latitude vegetation in the ORCHIDEE ecosystem model, Geosci. Model Dev., 8(7), 2263–2283, doi:10.5194/gmd-8-2263-2015, 2015.

Zhu, Z., Piao, S., Myneni, R. B., Huang, M., Zeng, Z., Canadell, J. G., Ciais, P., Sitch, S., Friedlingstein, P., Arneth, A., Cao, C., Cheng, L., Kato, E., Koven, C., Li, Y., Lian, X., Liu, Y., Liu, R., Mao, J., Pan, Y., Peng, S., Peñuelas, J., Poulter, B., Pugh, T. A. M., Stocker, B. D., Viovy, N., Wang, X., Wang, Y., Xiao, Z., Yang, H., Zaehle, S. and Zeng, N.: Greening of the Earth and its drivers, Nat. Clim. Change, 6(8), 791–795, doi:10.1038/nclimate3004, 2016.

Zimov, S. A., Chuprynin, V. I., Oreshko, A. P., Chapin, F. S., Reynolds, J. F. and Chapin, M. C.: Steppe-Tundra Transition: A Herbivore-Driven Biome Shift at the End of the Pleistocene, Am. Nat., 146(5), 765–794, doi:10.1086/285824, 1995.

Appendix A. Shrubs allometry with DGVM

The tree allometry in ORCHIDEE is based on a pipe tune model (Smith et al., 2001), and can be relatively adapted for shrubs (Druel et al., 2017). But in order to represent the particular shrubs allometry, more horizontal than vertical (Bentley et al., 1970; Lufafa et al., 2009), we chose to use an other allometry presented by Aiba and Kohyama (1996), with values specific for shrubs adapted from Martínez and López-Portillo (2003), and implemented in ORCHIDEE (Druel et al., 2017). These equations are solved in Equation App. 1 e with non-dynamical vegetation (because the total crown area C_a is fixed).

Equation App. 1.

a) $$\frac{1}{H} = \frac{1}{(A \times D^{\gamma})} + \frac{1}{H_{max}}$$

b) $$V = \frac{\pi}{4} \times \frac{H_{max} \times A \times D^{2+\gamma}}{H_{max} + A \times D^2}$$

c) $$C_a = \beta \times T^{\alpha} = \beta \times \left(n_i \times \frac{\pi}{4} \times D^2\right)^{\alpha}$$

d) $$m_w = n_i \times V \times \rho_w \text{ and } H = \frac{n_i \times V}{T}$$

e) $$H = \frac{m_w}{\rho_w \times \left(\frac{C_a}{\beta}\right)^{1/\alpha}}$$ **with fix vegetation**

with H the individual height (m), D the individual diameter (m), V the individual volume (m^3), n_i the number of individuals, C_a the total crown area (m^2), T the total stem basal areal (m^2), m_w the total wooden biomass of shrubs ($gC.m^{-2}$), ρ_w the density of the wood (0-1) and A, β, γ, α and H_{max} constants adapted from Martínez and López-Portillo (2003). (A=0.75, log(β)=2.42, γ=1.15, α=0.8 and H_{max}=3.5).

When the dynamical vegetation is activated, the height has to be directly deduced from the individual volume. If for trees the height can directly be extracted with the pipe tune model, for shrubs Equation App. 1 b does not have an analytical solution to extract the height (H=fn(V)), even if we are able to know that there is a unique solution H ($0 < H < H_{max}$).

To solve this mathematical limit we chose to build a look-up table (LUT) of the height versus the volume (H=fn(V)), from a minimum height (H_{min} = 1cm) to a maximum height (H_{max} x 0.90), the associated volume from Equation App. 1 a) and b (V_{min} and V_{max}) and with N (=200) lines. The main characteristic of this LUT is its discretisation: because of the logarithmic function between height and diameter, the step could not increase linearly with height. We chose to use a volume discretisation based on geometric progression (Equation App. 2). To obtain the associated height (H_i) we used a second but reversed LUT (V=fn(H)) (with identical discretisation as Equation App. 2 but with height), in which we associated the volume values to each height value (from Equation App. 1 a and b). Then a basic extrapolation between the two LUTs was made, to obtain an approached value of shrubs height (H=fn(V)).

Equation App. 2

$$V_i = V_{min} \times \left(\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)^{1/N-1}\right)^{i-1}$$

with i the row of the look-up table.

Appendix B. Standard Euclidian distance (without fuzzing)

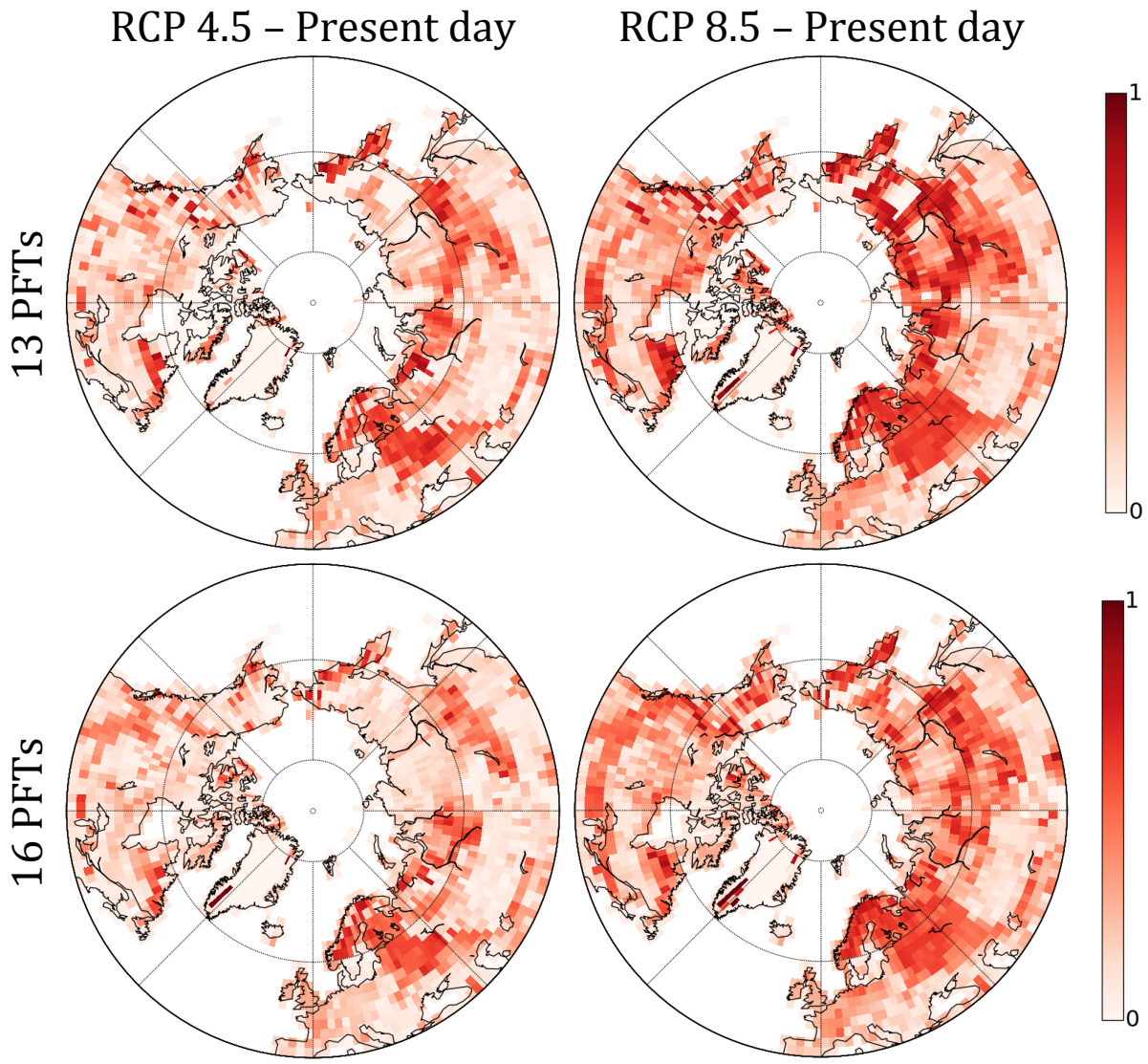


Figure App. 1. Euclidian distance of maximum vegetation coverage between future (RCP 4.5 and 8.5) and present simulations and with standard PFTs (13 PFTs) and new vegetation representation (16 PFTs).

Appendix C. Maps of new vegetation simulation

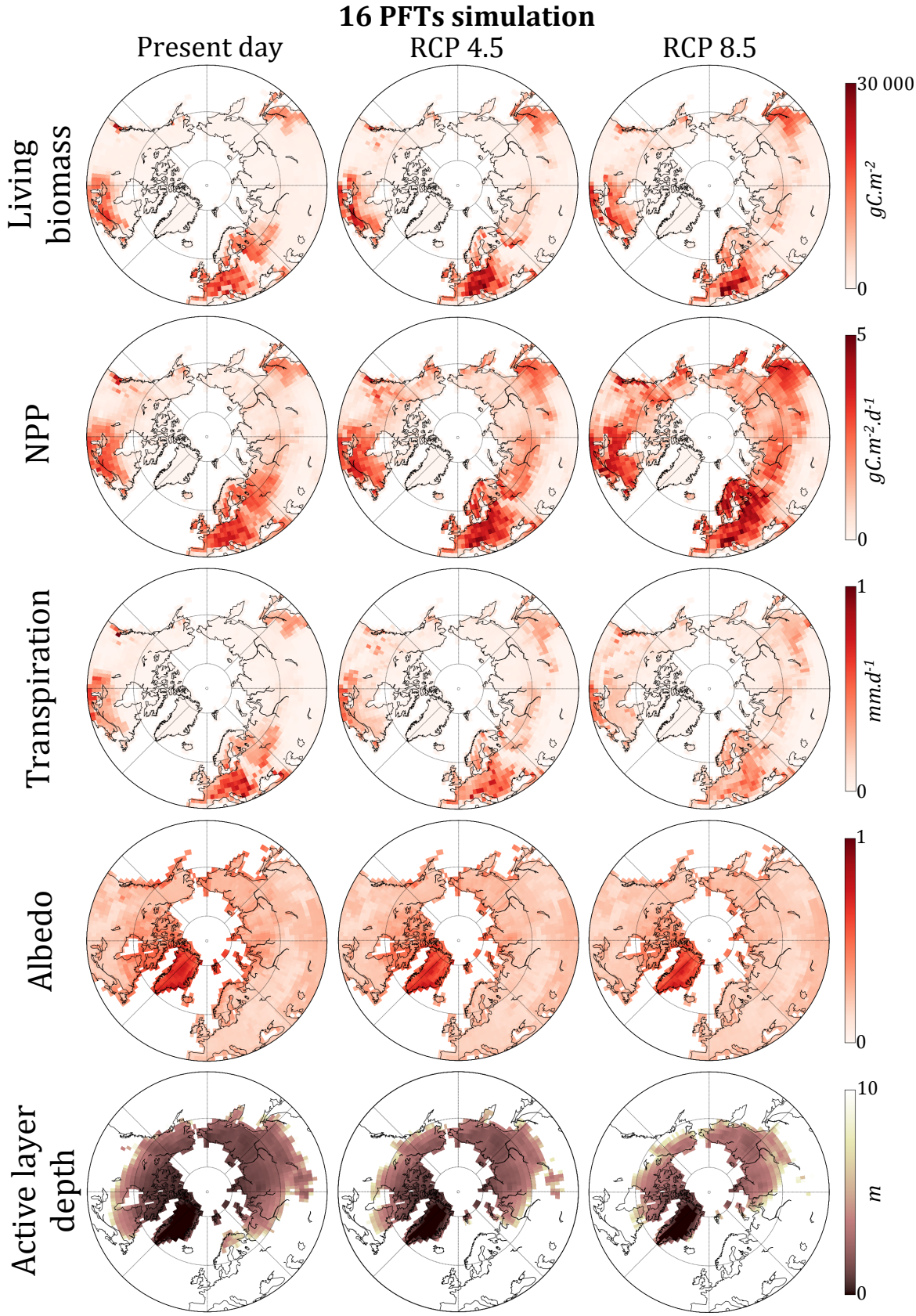


Figure App. 2. Standard maps with new vegetation representation (16 PFTs) simulations of Living biomass, productivity (NPP), transpiration, albedo and active layers thickness. Left to right, present day simulation, future simulations (scenario 4.5 and 8.5).

Appendix D. Simulation with standard ORCHIDEE PFTs and NVPs: Impact on soil temperatures.

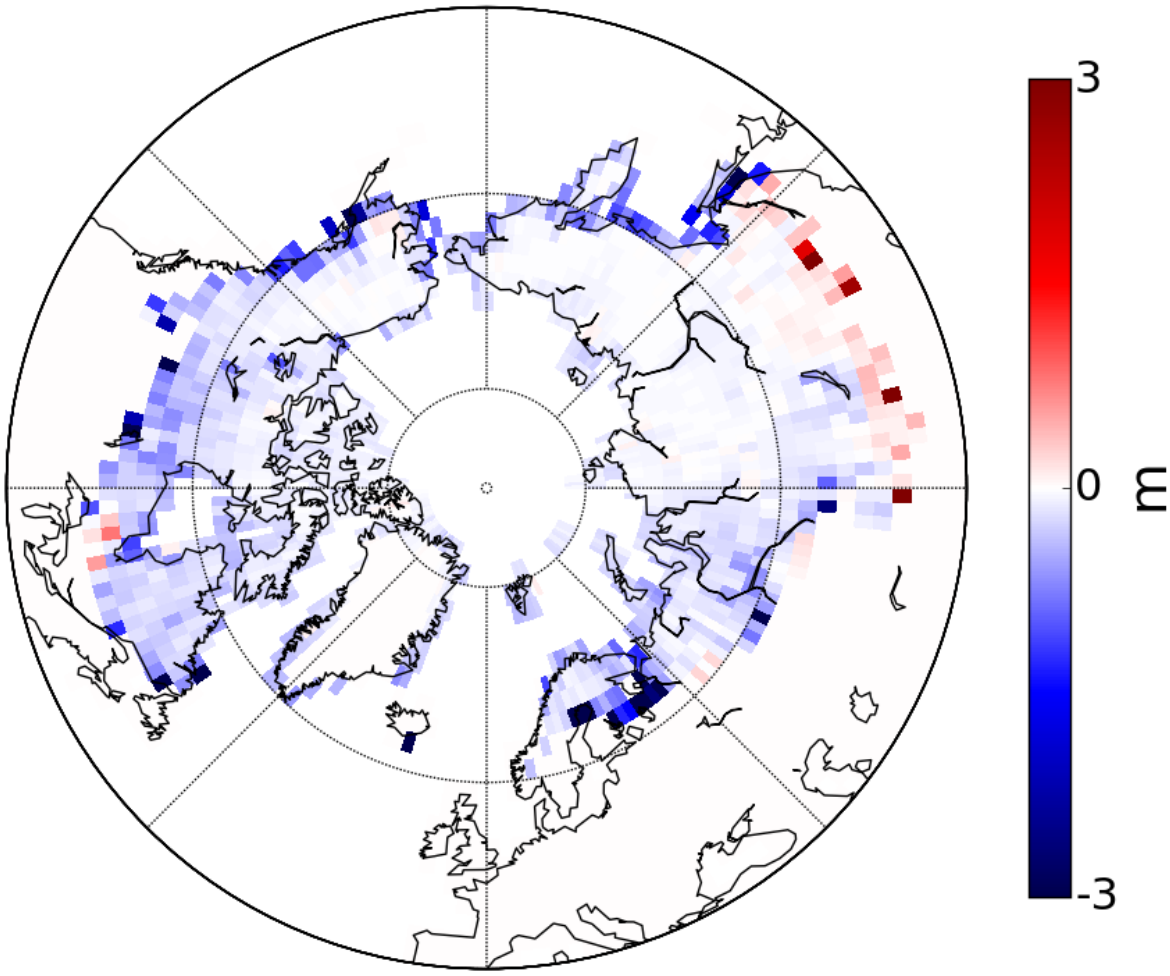


Figure App. 3. Comparison maps of active layers between standard ORCHIDEE vegetation plus NVPS (14 PFTs) and standard ORCHIDEE vegetation (13 PFTs) simulation, at present day (mean 2004-2013).

4.3. Étude complémentaire des simulations DGVM

Dans l'article présenté précédemment (section 4.2), plusieurs interrogations ont été soulevées. Nous allons approfondir ici quatre points précis qui représentent en l'état des limites potentielles à la représentativité des simulations et projections, en commençant par les sorties des simulations présentées dans l'article puis des simulations complémentaires.

4.3.1. La représentativité de l'albédo

Dans l'article présenté ci-dessus nous avons décrit les différences obtenues entre les simulations avec la végétation standard (13 PFTs) et la nouvelle description de la végétation (16 PFTs). L'albédo est typiquement inférieur dans les simulations futures et dans la simulation 16 PFTs que dans la simulation 13 PFTs. Mais nous n'avons pas décrit les valeurs absolues de ces albédos. Afin d'évaluer ces albédos, nous avons utilisé les albédos issus d'observation satellite MODIS (Schaaf and Wang, 2015). Les données ont ensuite été interpolées à 0,5° de résolution et mensualisées sur la période 2001-2010. Nous avons ensuite comparé l'albédo moyen « black-sky » (i.e. en prenant en compte la réflectance directionnelle hémisphérique) de MODIS avec celui estimé par nos différentes simulations. Les résultats sont présentés dans la Figure 32.

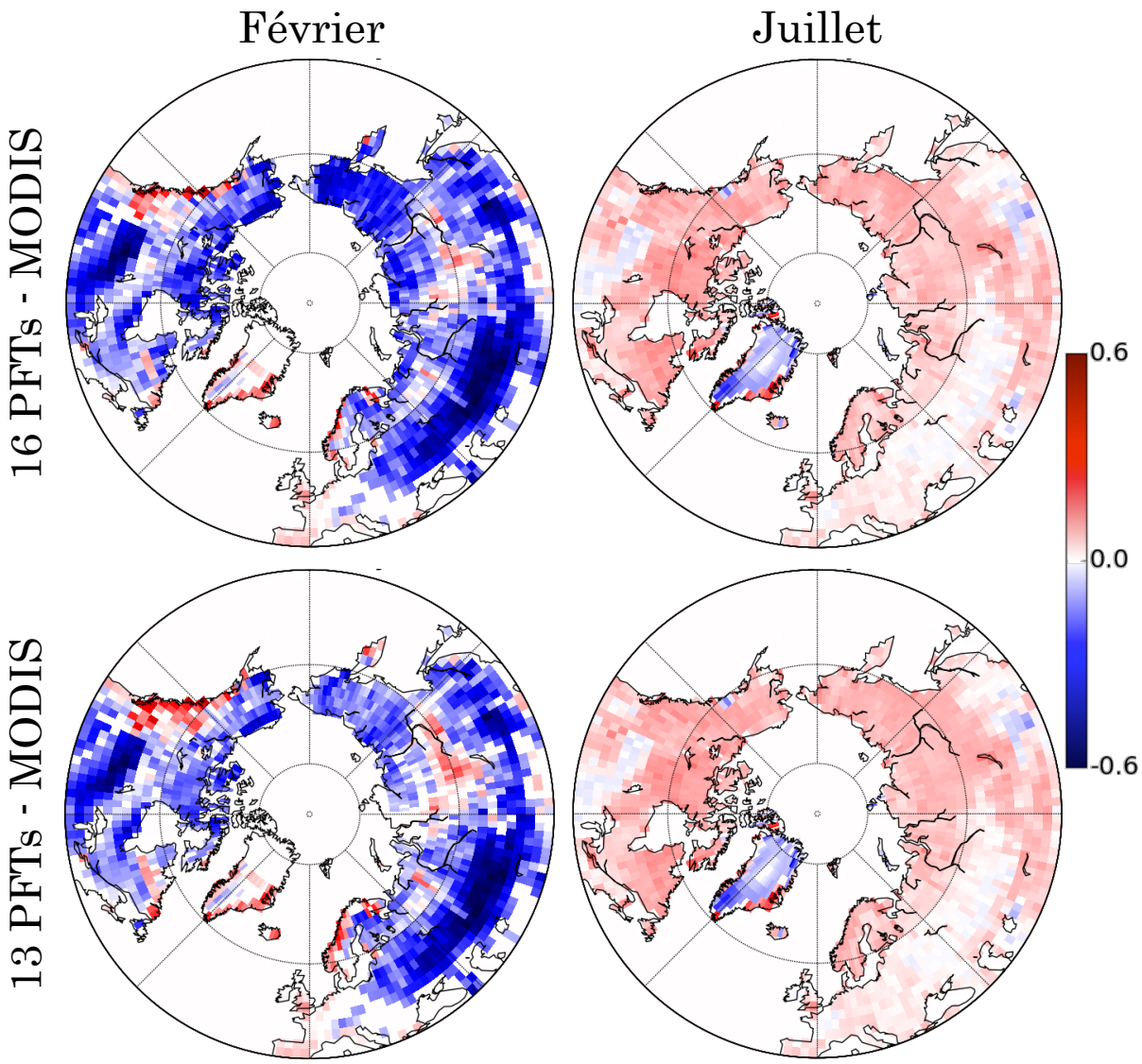


Figure 32. Cartes de différences significatives d'albédo en février et juillet (moyenne de 2001 à 2010) entre les simulations « DGVM » (végétation standard 13 PFTS ou la nouvelle description de la végétation 16 PFTs) et le produit issu d'observation satellite MODIS (Schaaf and Wang, 2015).

On observe très distinctement que dans les deux distributions de végétation les simulations sont incorrectes avec une sous-estimation de l'albédo extrêmement importante pouvant aller jusqu'à -0,6 en hiver et une surestimation atteignant localement +0,2 en été. Or, cette tendance est la même que dans la version originale d'ORCHIDEE (« trunk ») où il y a une surestimation de l'albédo en été et une sous-estimation en hiver dans les régions boréales. Actuellement une nouvelle version de la neige est en cours de développement avec notamment une optimisation des paramètres d'albédo de la végétation, de la neige et la création d'une carte d'albédo du sol nu.

Ce problème n'est donc pas directement lié à la version développée au cours de cette thèse, bien qu'elle ait pu l'amplifier. Notamment, la modification de la fraction de neige sur la végétation a entrainé globalement une diminution de la surface de neige sur la végétation et donc de l'albédo. Ainsi, en parallèle au développement d'une nouvelle description de l'albédo dans ORCHIDEE, nous

effectuons des tests et une optimisation des paramètres de l'albédo des nouveaux PFTs est en cours. Comme la version de l'albédo « standard » n'est pas encore finalisée, il n'est pas possible de présenter à ce stade les résultats de ce nouvel albédo, même si les résultats préliminaires permettent de réduire l'écart moyen de plusieurs dixièmes en hiver, et de moitié en été. De plus, la dépendance de la fraction de neige sur la végétation à la rugosité (et donc la hauteur de végétation) dépend d'un facteur prédéfini (voir 2.1.4.3) qui va pouvoir également être optimisé. Enfin, les résultats de la Figure 32 indiquent en juillet une meilleure adéquation entre la simulation 16 PFTs et MODIS qu'avec la simulation 13 PFTs (bien que très légère, de l'ordre de quelques pourcents). Les anomalies en hiver sont plus marquées, mais plus homogènes donc pouvant être plus faciles à corriger.

Finalement, ces résultats indiquent une nécessité de mieux définir l'albédo (notamment celui de la neige en hiver), ainsi que la fraction de neige sur la végétation. Cette nouvelle implémentation est en cours. Il est possible que les résultats obtenus avec la version développée dans cette thèse soient plus proches des observations MODIS, du fait de la nouvelle discrétisation de la végétation boréale et de la dépendance de la fraction de neige à la végétation.

4.3.2. Le bilan hydrique

De même que pour l'albédo, le bilan hydrique de la version d'ORCHIDEE utilisée dans cette thèse comprend un problème de conservation de l'eau. En effet, dans chacune des simulations effectuées à partir d'un même fichier de forçage, l'eau « apportée » au modèle (la pluie et la neige) est fixe, mais la quantité d'eau qui est « rendue » par le modèle (le ruissellement, le drainage et l'évaporation) additionnée à l'accumulation de neige (éternelle), ne lui est pas identique. Comme le montre le Tableau 9, pour chaque simulation, il y a plus d'eau qui « sort » que d'eau qui « entre » : l'eau n'est pas conservée. Des différences sont observables entre chaque simulation avec des végétations différentes (13 et 16 PFTs).

Tableau 9. Valeur moyenne de l'eau provenant de l'atmosphère (pluie et neige) issue des fichiers de forçage correspondant aux simulations (cf. Tableau 7), des sorties simulées correspondantes et de l'évolution du réservoir de neige (en mm.m^{-2}.j^{-1}), au-dessus de 65°N et en excluant le Groenland.

Simulations	DVGM		DVGM4.5		DVGM8.5	
Pluie	0,423		0,499		0,596	
Neige	0,283		0,295		0,288	
Total	0,706		0,794		0,884	
	13 PFTs	16PFTS	13 PFTs	16PFTS	13 PFTs	16PFTS
Ruissellement	0,137	0,134	0,206	0,205	0,284	0,286
Drainage	0,114	0,100	0,094	0,089	0,076	0,072
Évaporation	0,472	0,501	0,513	0,518	0,548	0,547
Neige (stock)	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,008	-0,008
Total	0,720	0,732	0,812	0,809	0,900	0,897

Au sein des différentes sorties des modèles, on observe des différences marquées pour les simulations récentes avec 13 ou 16 PFTs, avec principalement moins de drainage et plus d'évaporation avec 16 PFTs. Les simulations futures ont des tendances similaires mais moins marquées entre elles. Par contre dans les scénarios futurs, où les entrées d'eau sont plus importantes, c'est principalement le ruissellement qui augmente beaucoup, alors que le drainage diminue légèrement et que l'évaporation augmente faiblement. En parallèle, le bilan des entrées et sorties d'eau tend vers une apparition d'eau comprise entre 3,5% (pour les simulations présentes) et 1,5% (pour les simulations futures DVGM8.5). A part pour l'augmentation du ruissellement qui est substantiel, l'évolution des autres sorties et de la neige éternelle est du même ordre de grandeur que cette « apparition » d'eau dans le modèle. Ces résultats ne nous permettent donc pas de statuer sur les différences simulées.

La mauvaise conservation de l'eau simulée ici est due à un problème de conservation d'eau dans la version originale d'ORCHIDEE. On peut toutefois s'intéresser au problème, notamment au fait qu'il y a une distinction entre les simulations 13 et 16 PFTs et en fonction de la période ou du scénario simulé. La quantité d'eau supplémentaire est plus forte avec la version 16 PFTs que la version 13 PFTs dans la simulation présente, alors qu'elles sont similaires dans les simulations futures. Dans l'article de la section 4.2, la variable étudiée qui présente ce type de comportement est la productivité. Bien qu'il ne s'agisse que d'une piste, le processus de photosynthèse dans son ensemble parait être un bon candidat pour expliquer cette non conservation de l'eau.

Notons que le Tableau 9 ne représente pas le Groenland, du fait de l'accumulation importante locale de la neige au niveau de la calotte (les calottes ne sont pas directement modélisées dans ORCHIDEE), qui ne permet pas d'observer le comportement global. Avec le Groenland, l'accumulation moyenne de la neige est de l'ordre de 0,1 $mm.m^{-2}.j^{-1}$ et le bilan d'eau n'est pas mieux conservé (ANNEXE F). De plus la simulation DGVM8.5 avec 16 PFTs montre une incohérence au niveau de l'évolution du stock de neige. Elle est à mettre en parallèle avec le développement important de NVPs au niveau du Groenland pouvant entrainer une baisse importante de l'albédo, sans pourtant l'expliquer.

Il est important qu'un travail sur la conservation de l'eau soit effectué et que l'origine du problème soit identifiée, quelle que soit la version dont il est issu.

4.3.3. Comparaison des simulations 13 et 16 PFTs à l'aide de la biomisation.

La biomisation est une méthode qui permet d'obtenir des cartes de biomes (avec une unique valeur par point de grille) à partir d'une carte de répartition de la végétation (avec dans notre cas 13 ou 16 PFTs potentiels par point de grille). Par souci de simplicité, l'article présenté dans la section 4.2 montre uniquement des résultats de biomisation pour la nouvelle description de la végétation.

La première contrainte pour utiliser la méthode de biomisation (décrite dans la section 2.3.3.3) avec la végétation standard est qu'étant donné qu'il n'y a pas de buissons, la hauteur des PFTs arborés (contenant du bois) est systématiquement supérieure à 5 m. Pour résoudre cette difficulté, la carte « 13

PFTs DGVM » de la Figure 33 a été obtenue en utilisant la hauteur moyenne de la végétation. Deux résultats ressortent de cette transformation : d'une part les limites forêt – savane sont très légèrement en faveur des forêts par rapport à la simulation 16 PFTs, mais surtout les limites issues de la projection de la couverture foliaire (FPC) sont très en faveur des toundras arbustives par rapport aux toundras, la limite de GDD_5 restant inchangée.

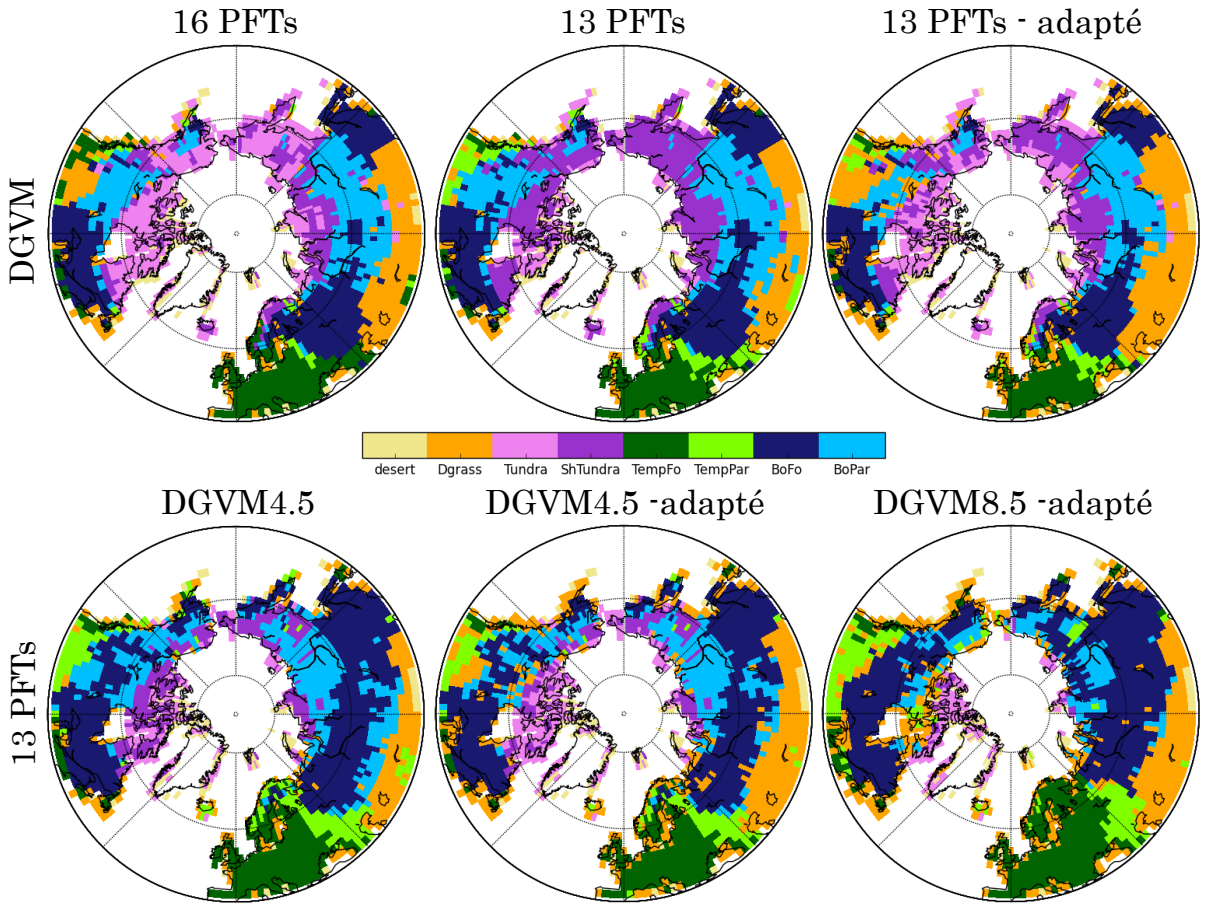


Figure 33. Biomisation des végétations simulées par ORCHIDEE (moyenne entre 2004 et 2013 pour les simulations DGVM et entre 2091 et 2100 pour les simulations DVGM4.5 et DVGM8.5), soit en suivant l'algorithme présenté dans la Figure 30, soit en l'adaptant lorsque c'est indiqué. Les biomes représentés sont le *désert*, les prairies sèches ou arbustives (*Dgrass*), les *Toundras*, les toundras arbustives (*ShTundra*), les forêts tempérées (*TempFo*), les savanes tempérées (TempPark), les forêts boréales (*BoFo*) et les toundras arborées (*BoPar*).

Nous avons donc proposé une adaptation très légère de la limite de hauteur moyenne de la végétation (établie à 4 m contre 3,5 m avant) pour distinguer les forêts, et une modification très marquée de la limite haute de FPC, établie à 0,55 (alors qu'elle était établie avant à 0,3), une valeur intermédiaire à celles proposées par Prentice et al. (2011) et Kageyama et al. (2013). Le résultat est présenté dans la Figure 33 au niveau de la carte « DGVM – 13 PFTs - adapté ». On arrive ainsi à reproduire une carte qui semble bien correspondre à la carte de biomes décrite avec 16 PFTs et contient une limite toundra – toundra arbustive réaliste.

On peut donc ensuite observer l'évolution des biomes dans les projections futures (Figure 33, cartes sur la seconde ligne), comme cela a été fait dans

l'article pour la nouvelle description de la végétation (section 4.2). On retombe globalement sur les mêmes conclusions, avec une diminution importante des toundras (puisque le GDD_5 est identique) et une augmentation substantielle de la présence des PFTs arborés. La principale différence provient de l'augmentation importante de la répartition du biome « savane tempérée ». Les différences entre les cartes « DGVM4.5 - adapté » et « DGVM4.5 » qui représentent la transformation des simulations DGVM4.5 avec soit l'algorithme adapté, soit non adapté, indiquent une surreprésentation des toundras arbustives lorsque l'algorithme n'est pas adapté, et aussi une diminution de la présence de savanes tempérées.

Les résultats obtenus avec la version adaptée de la biomisation à 13 PFTs confirment qu'il est possible d'adapter facilement l'algorithme, que les tendances globales simulées entre les deux distributions de la végétation restent semblables, mais ils montrent par contre que l'utilisation de la hauteur moyenne de la végétation ou de la hauteur moyenne de la végétation arborée (buissons et arbres) ne donne pas les mêmes résultats. Il apparaît donc ambitieux de pouvoir définir des biomes arbustifs sans avoir d'arbuste dans la description de la végétation.

4.3.4. Résultats de nouvelles simulations

Dans l'article sur la dynamique de végétation, trois points sont particulièrement importants. Tout d'abord afin de pouvoir mieux identifier les différences apportées par les nouveaux PFTs boréaux, les PFTs standards ont été le moins possible modifiés. Or, sans la présence de PFTs de buissons ou d'herbacées C3 boréales, la végétation standard représentait d'une certaine manière à travers d'autres PFTs ces PFTs boréaux. Par exemple, les arbres boréaux représentaient également la distribution des buissons. Il est donc nécessaire de modifier les arbres boréaux afin d'obtenir une représentation de la végétation plus réaliste. Ensuite, nous n'avons pas observé dans les simulations DGVM, DGVM4.5 et DGVM8.5 d'« embuissonnement » au niveau des hautes latitudes (développement important des buissons, comme observé dans la Figure 9). Une explication envisagée était que le spinup s'étalait sur une période trop longue pendant laquelle les températures étaient élevées dans les hautes latitudes, comme l'a montré Bengtsson et al. (2004). Enfin, comme les buissons étaient très présents juste après le spinup, il est possible que l'on n'observe pas d'embuissonnement aux hautes latitudes car les buissons y étaient déjà surreprésentés.

Nous avons choisi de lancer un nouveau groupe de simulations, comprenant des simulations DGVM, DGVM4.5 et DGVM8.5, avec un spinup de 5000 ans mais sur les années 1901 à 1920. Les limites de températures extrêmes sont passées de -45°C pour tous les PFTs arborés (arbres et buissons) boréaux à -43°C (PFT conifères boréaux persistants), -45°C (arbres boréaux à feuillage décidu), -70°C (conifères boréaux décidus, qui avaient auparavant une mortalité trop importante) et -40°C (buissons boréaux). Un aperçu complet des résultats obtenus est présenté dans la Figure 34.

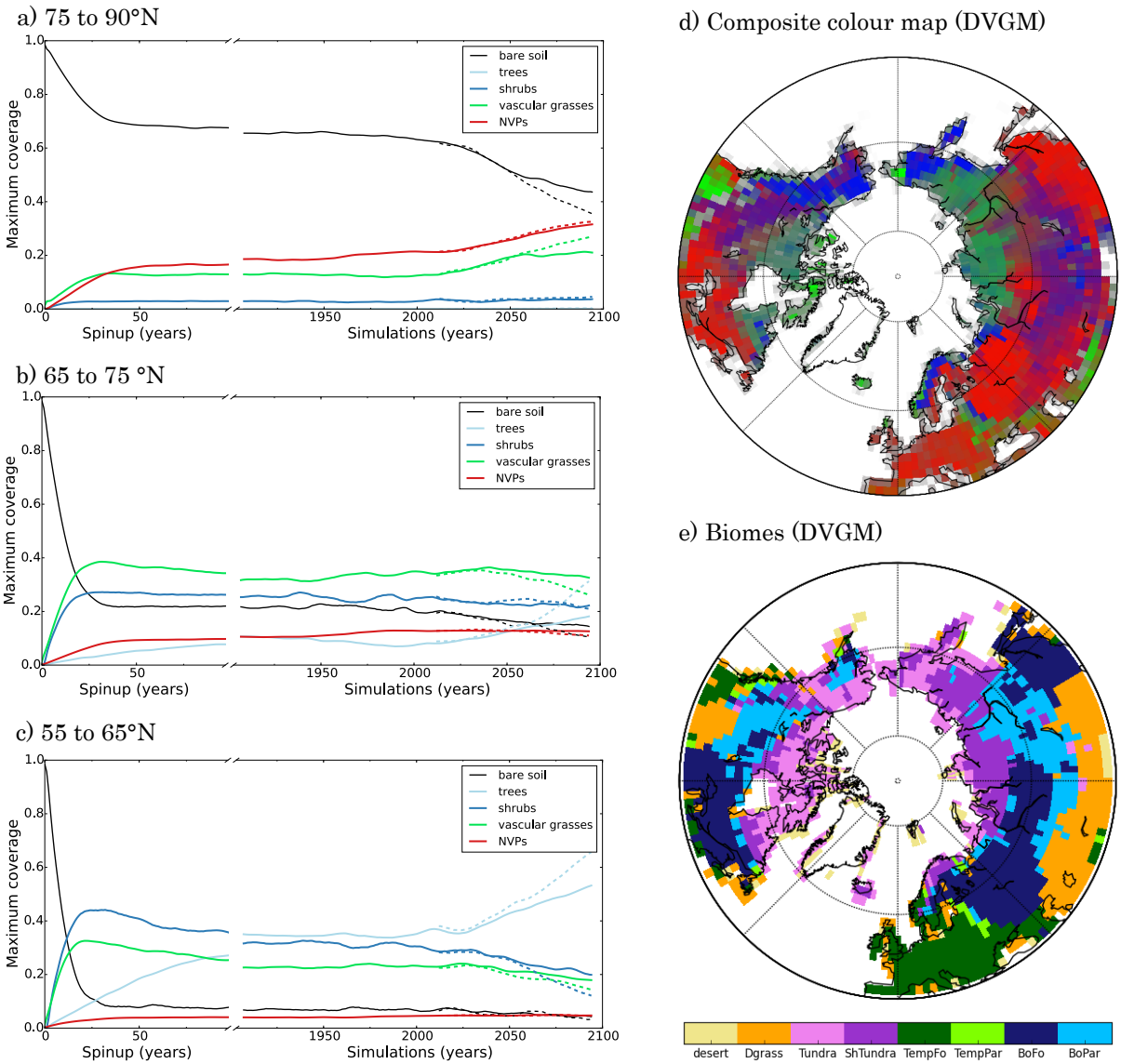


Figure 34. Ensemble de résultats décrivant la répartition de la végétation (16 PFTs) simulée à travers a), b) et c) trois séries chronologiques réalisées sur des bandes longitudinales différentes, montrant les résultats des simulations DGVM, DGVM4.5 et DGVM8.5 (trait en pointillés) ; d) une carte de couleurs composite présentant en rouge les arbres, en bleu les buissons et en vert les herbacées (la teinte représentant la fraction de chacune des 3 couches) ; et e) une carte de biomes obtenue à l'aide de la méthode de biomisation (section 2.3.3.3).

Les séries chronologiques montrent des tendances similaires aux observations effectuées dans l'article de la section 4.2. C'est-à-dire qu'une fois l'équilibre du spinup atteint, on observe à partir des années 2000 une augmentation sous 75°N de la surface occupée par les arbres, principalement prise sur les buissons, et plus marquée dans le scénario RCP 8.5. Au-dessus de 75°N ce sont les NVPs qui occupent le plus de place et qui présentent une augmentation de leur surface dès 1950. Par contre les surfaces occupées par la végétation arborée et arbustive ont changé, avec une diminution de plus de 10% des buissons entre 55°N et 75°N, et une augmentation des arbres (due au développement des conifères boréaux décidus). La carte de couleurs composite de la simulation récente montre en effet un accroissement léger de la couverture d'arbres par rapport à la simulation présentée dans l'article, mais surtout une diminution importante de la présence

des buissons. Enfin, la carte de biomes confirme clairement l'augmentation de la surface occupée par les forêts, prise directement sur les toundras arborées. Par contre, alors qu'on a une diminution de la surface occupée par les arbustes, il semble que le biome toundra arbustive s'étende sur une part de la toundra initiale. C'est probablement dû au développement à la place des buissons du PFT standard C3 herbacées, très productif.

Par rapport aux objectifs de ces simulations, on a déjà réussi à obtenir une meilleure distribution de la végétation actuelle (Figure 34 d), dans le sens où la végétation arbustive n'est pas dominante sur l'ensemble de la région boréale (où il n'y a pas d'arbres). Par contre aucun phénomène d'embuissonnement n'a pu être reproduit alors que dans les régions boréales de la place était disponible. Cela réduit donc les hypothèses avancées dans l'article de la section 4.2, sans toutefois proposer de nouvelles solutions. Enfin, à travers la biomisation et l'augmentation des toundras arbustives avec moins de buissons, on est confronté à la limite de cette méthode. Vu que dans la version d'ORCHIDEE élaborée pendant cette thèse on a des buissons, des arbres et des herbacées, un algorithme plus complexe d'attribution des biomes pourrait être envisagé.

4.4. Intérêts, perspectives et limites de l'implantation de la dynamique de la végétation

L'introduction de la végétation boréale dans la dynamique de végétation du modèle ORCHIDEE a été effectuée en respectant au mieux les mécanismes de compétition déjà présents dans ORCHIDEE et en modifiant au minimum les PFTs standards. Les trois principaux mécanismes considérés sont la compétition pour la lumière (entre strates de végétation), la compétition horizontale pour l'espace (à travers la productivité et au sein d'une même strate) et enfin une compétition indirecte pour l'eau (inter- et intra-strates). Pour les nouveaux PFTs boréaux implémentés, l'enjeu est de parvenir à reproduire la distribution de la végétation le plus fidèlement possible par rapport à la réalité.

Les nouvelles cartes de végétation simulées sont prometteuses, et permettent de bien reproduire la présence de buissons au niveau des hautes latitudes, au-delà de la limite de la distribution des arbres. Les plantes non vasculaires sont principalement présentes dans les régions les plus extrêmes, alors que les herbacées C3 boréales se retrouvent dans les mêmes conditions que les herbacées C3 standards. Les biomes observés et la biomisation des résultats obtenus semblent converger vers une bonne représentation de la végétation boréale. Les toundras arbustives sont bien reproduites, tant au niveau des biomes que de la simulation de buissons, et les NVPs sont présentes au niveau des limites toundra-désert du fait de leur résistance aux conditions extrêmes. Par contre, étant donné qu'aucune compétition directe entre les herbacées C3 standards et boréales n'a été implémentée, la compétition concernant la NPP n'a pas suffi à distinguer les aires de répartition de ces espèces. L'intérêt de mettre en place un nouveau PFT « herbacées C3 boréales » est donc moins évident que pour les

autres PFTs introduits. A moins d'implémenter de nouvelles contraintes pour les herbacées (et de processus associés), la solution proposée dans la section 0, à savoir de ne pas créer un PFT « herbacées C3 boréales » mais plutôt de modifier les paramètres du PFT « herbacées C3 » standard en fonction de la latitude (ou du gradient de température), semble donc une bonne alternative.

L'évolution de la végétation simulée, notamment dans les scénarios futurs, reproduit le phénomène d' « Arctic greening » (Bonfils et al., 2012; Elmendorf et al., 2012; Frost and Epstein, 2014; Zhu et al., 2016), présenté au début de cette thèse (section 1.1.4) dû à l'augmentation des températures et à l'augmentation de la concentration en CO_2 (Zhu et al., 2016) qui est bien entendu aussi la cause du réchauffement. En-dessous de 75°N les arbres se développent de plus en plus, entraînant une diminution importante de la couverture des buissons et une diminution plus faible des herbacées et du sol nu. Au-dessus de 75°N, le « greening » est beaucoup plus marqué, avec une dominance et une augmentation des NVPs, suivies d'une augmentation moindre des herbacées et une diminution importante du sol nu. Ces observations sont amplifiées dans le scénario futur (RCP 8.5). Néanmoins, le modèle n'a pas reproduit le phénomène d'embuissonnement (section 1.1.4) généralement observé (e.g. Frost and Epstein, 2014). Malgré de récents tests, nous n'avons pas d'explication à cela. L'hypothèse la plus probable est que la protection des buissons par la neige, qui leur permet d'être présents au-delà de la limite des arbres, a tendance à diminuer dans les simulations futures, du fait de la diminution de la couverture de neige (cf. section 4.2) et parce qu'avec l'augmentation des températures la neige devient plus conductrice (Domine et al., 2016). Ainsi, l'avantage des buissons par rapport aux arbres aux hautes latitudes est réduit.

Les impacts de l'introduction de la nouvelle végétation boréale par rapport à la végétation standard d'ORCHIDEE sont multiples. Nous avons identifié une diminution marquée de la biomasse (différence qui s'accroit dans les simulations futures), de la NPP, de l'albédo (différences qui fléchissent au cours du temps), et une diminution moins marquée de la transpiration. Ces modifications proviennent de l'introduction non seulement des buissons mais aussi des herbacées C3 boréales, sans lesquelles nous ne sommes pas capables d'expliquer l'ensemble de ces impacts. L'impact quantitatif des NVPs semble moins marqué. Si la modélisation des PFTs standards avec l'ajout uniquement de NVPs indique comme attendu une protection du pergélisol induite par la présence des NVPs, on ne retrouve pas cette protection dans la simulation avec l'ensemble des nouveaux PFTs. Comme lors de l'implémentation des PFTs boréaux (section 0), cela s'explique par la diminution de la transpiration et l'augmentation de l'humidité du sol attribuées à l'introduction des herbacées et buissons boréaux, qui augmente la conductivité moyenne du sol. Il serait important d'étudier si cela signifie que l'isolation du sol due aux NVPs est sous-estimée. Cela peut être du fait de l'épaisseur trop faible qu'elles représentent sur le sol (e.g. Chadburn et al., 2015a), de la paramétrisation incorrecte de cette isolation (issue de Soudzilovskaia et al., 2013), ou du fait que l'humidité du sol est très différente entre les simulations avec 13 PFTs ou 16 PFTs. Ce dernier point peut provenir soit de l'impact trop important de la nouvelle végétation sur l'humidité du sol,

soit de la sous-estimation de l'humidité du sol aux hautes latitudes dans la végétation standard d'ORCHIDEE.

Il est important de rappeler que, bien que l'implémentation des nouveaux PFTs améliore la description boréale, le modèle standard incluant initialement ces PFTs au sein des PFTs standards, l'impact introduit est potentiellement surestimé. Par exemple pour l'albédo de la neige, on a pu montrer dans la section 4.3.1 l'importance de ré-étalonner l'ensemble des paramètres liés à la végétation, qu'il s'agisse des PFTs standards ou nouvellement implémentés. Dans le cas où, comme prévu au début de la thèse, ces développements sont intégrés à la version commune (« trunk ») d'ORCHIDEE, il faudra être vigilant vis-à-vis des impacts induits par cette nouvelle végétation.

La dynamique de végétation associée aux nouveaux PFTs boréaux ouvre des perspectives intéressantes. Bien sûr, il serait possible de faire évoluer la végétation dans des scénarios futurs en prenant en compte les rétroactions de la végétation sur les variables climatiques, c'est-à-dire en couplant ORCHIDEE avec le schéma atmosphérique LMDZ. Cela permettrait d'identifier si une meilleure description de la végétation boréale semble induire une rétroaction positive sur le climat, par exemple si les régions boréales pourraient devenir un puits de carbone. Mais cela permettrait également de répondre à des questionnements plus précis. Pour reprendre l'exemple fourni en fin de la section 0, il est possible de simuler avec cette version dynamique la végétation présente depuis la dernière période interglaciaire. Ainsi, il serait possible de modéliser l'évolution des stocks de carbone et l'évolution de la végétation. De plus, si pour le moment les NVPs ont un effet relativement faible quantitativement sur les simulations présentes et futures, leur développement pendant plusieurs milliers d'années peut entraîner un impact important sur l'état du pergélisol et le carbone ayant pu s'accumulé dans le pergélisol. Ce carbone accumulé pourrait être relâché dans l'atmosphère avec la fonte du pergélisol, elle-même dépendante de l'impact des NVPs et des PFTs boréaux sur l'isolation du sol. Il est difficile, au vu du nombre d'interactions et sans effectuer de simulations, de prévoir avec certitude l'impact final de l'implémentation de la végétation boréale sur les projections climatiques.

Chapitre 5
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

5.1. Conclusions

Dans le contexte du changement climatique observé ces dernières décennies, il est important d'être capable d'estimer au mieux l'évolution future du climat. Afin de simuler le climat dans sa globalité, les modèles du système Terre ont été développés, incluant principalement les modèles océaniques, atmosphériques et de surface. Au sein de ces derniers, l'intérêt particulier des régions boréales s'explique par l'amplification polaire, c'est-à-dire le fait que le changement climatique est amplifié dans les régions boréales. Il est donc important d'étudier son impact sur ces régions, leurs écosystèmes, et de pouvoir anticiper si des rétroactions sur le climat sont possibles suite à une modification profonde des écosystèmes boréaux. L'objectif principal de cette thèse était donc d'améliorer la description du fonctionnement biophysique et biogéochimique de la végétation boréale et sa dynamique dans le modèle de surface continentale ORCHIDEE, la végétation étant représentée par des types fonctionnels de plantes (PFTs).

En partant d'une version d'ORCHIDEE déjà améliorée pour les simulations aux hautes latitudes, c'est-à-dire contenant une description de la neige à plusieurs couches (Wang et al., 2013) et le gel du sol (Gouttevin et al., 2012), de nouveaux PFTs boréaux ont été développés. Ils ont été choisis afin d'obtenir une meilleure description des biomes que l'on retrouve dans les régions boréales, à savoir la taïga, les toundras, les steppes et les tourbières. Pour la taïga une description existait déjà dans la version d'ORCHIDEE à travers trois PFTs arborés boréaux. Afin de représenter les autres biomes, trois nouveaux PFTs ont été introduits : les plantes non-vasculaires (NVPs) pour représenter les zones humides (tourbières) et les toundras peu denses, les buissons boréaux pour représenter les buissons présents dans les toundras arbustives et enfin les herbacées C3 boréales afin de représenter les steppes et les toundras. L'introduction de ces nouveaux PFTs a été effectuée en utilisant l'architecture des PFTs standards proches. Elle s'est accompagnée de la modification et de l'implémentation de processus spécifiques associés. Les principaux processus nouvellement implémentés pour l'occasion sont :

- Une mortalité induite par des conditions extrêmes (absence de productivité sur plusieurs dizaines de jours) pour les NVPs.
- Une seconde mortalité induite par une épaisseur trop importante de NVPs afin de représenter l'impact de la diminution de la pénétration de la lumière.
- La dessiccation des NVPs qui induit une diminution de la photosynthèse et de la respiration de maintenance en cas de stress hydrique.

- La protection des sols due à la présence d'une couche protectrice de NVPs, modifiant la conductivité et la capacité thermique du sol.
- Une nouvelle allométrie pour les buissons, afin de les distinguer des arbres.
- L'utilisation de la température du manteau neigeux afin de protéger les buissons enfouis sous la neige des températures extrêmes.

Les herbacées C3 boréales n'ont pas fait l'objet de l'implémentation d'un processus particulier. Pour l'implémentation de la dynamique de végétation, les processus fondamentaux de la version originale d'ORCHIDEE ont été maintenus, à savoir la compétition pour la lumière, pour l'occupation horizontale de l'espace (basée sur la productivité) et pour l'eau. Seules de petites améliorations ont été apportées, comme la création d'une strate arbustive intermédiaire entre les arbres et les herbacées pour la compétition pour la lumière, ou la diminution de la productivité des herbacées dans un sol saturé en eau. L'ensemble de l'implémentation des PFTs, des processus associés, ainsi que la mise à jour ou la résolution de bogues représente la plus grande quantité de travail de cette thèse.

Des simulations de la végétation standard (13 PFTs) ou avec la végétation boréale nouvellement implémentée (16 PFTs), présentes et futures (suivant les scénarios RCPs 4.5 et 8.5, cf. Moss et al., 2010), et avec la végétation prescrite ou dynamique, ont été effectuées. Les résultats concernant quelques grandeurs caractéristiques du développement de la végétation (la productivité, la biomasse et dans le cas des simulations dynamiques la répartition des PFTs) sont globalement très prometteurs. Pour les simulations effectuées avec une végétation prescrite, en utilisant une carte de répartition des PFTs développée pendant cette thèse, l'introduction des PFTs boréaux diminue la productivité et la biomasse simulées par rapport à la végétation standard. Les résultats de l'indice de surface foliaire (LAI) simulé avec la nouvelle végétation sont plus proches des observations de LAI des produits GLASS (Liang et al., 2013) et GIMMS (Zhu et al., 2013).

Dans les simulations effectuées avec la végétation dynamique, comme attendu, les buissons sont bien présents dans les régions boréales, au nord de la limite maximale des arbres. Les NVPs sont présentes dans les milieux extrêmes (au niveau des latitudes >65°N) et les herbacées boréales sont présentes sur toute la région arctique. Le phénomène d'« Arctic Greening » (Zhu et al., 2016) est bien représenté avec un développement important des arbres au-dessous de 75°N dans les simulations futures et un développement très important des NVPs au-dessus de 75°N dès les années 1950 entrainant une baisse considérable du sol nu. Toutefois, pour les buissons le phénomène d'« embuissonnement » (Frost and Epstein, 2014) n'est pas reproduit par le modèle, malgré plusieurs essais de calibration des paramètres clés. Ainsi, globalement l'introduction des PFTs boréaux s'est traduite par une meilleure description des écosystèmes arctiques et des échanges d'énergie et de matière avec l'atmosphère.

Dans ces simulations, l'introduction des PFTs boréaux a entrainé des impacts importants sur les sorties des modèles. Ainsi par exemple, dans les simulations avec une végétation prescrite, la substitution partielle des PFTs arborés par des buissons et du PFT herbacé C3 standard par le PFT herbacé boréal et les NVPs s'est traduite par une diminution de la rugosité et de la transpiration et une augmentation de l'albédo en hiver. Dans la simulation dynamique, l'albédo a au contraire diminué (avec l'augmentation de la rugosité due aux buissons). Ces différences sont la plupart du temps considérables et liées à l'implémentation des nouveaux PFTs. Par contre, si l'on pouvait s'attendre à une meilleure protection du pergélisol par les NVPs, cet effet est compensé dans les simulations 16 PFTs par l'augmentation de l'humidité du sol, entrainant une augmentation de la conductivité du sol. Soit l'isolation des NVPs est sous-estimée, soit l'augmentation de l'humidité du sol est initialement surestimée, ou alors dans la végétation standard l'humidité du sol est sous-estimée, mais est compensée par l'absence de NVPs. Après l'analyse factorielle des processus impactant le pergélisol, à savoir le flux d'humidité (bilan d'eau non conservé dans la version standard), l'albédo (présentant des biais importants, même dans la version standard) et l'isolation des mousses (qui est potentiellement sous-estimée), on ne peut pas conclure définitivement sur l'impact de la nouvelle végétation boréale sur le pergélisol.

Toutefois, la résolution de « bogues » et la mise à jour du modèle, ainsi que l'implémentation des nouveaux PFTs et des processus associés, ont eu des impacts importants sur l'ensemble du modèle, comme par exemple sur l'albédo. L'intérêt du développement de modèles globaux, comme c'est le cas dans cette thèse, est de pouvoir être utilisé ensuite par tous les utilisateurs. Il est donc nécessaire d'être attentif aux modifications induites sur le comportement du modèle avant la généralisation de l'utilisation de ces développements.

L'objectif initial du développement de la végétation boréale est donc atteint, même s'il reste un certain nombre d'améliorations possibles. Il ouvre de nombreuses perspectives de simulations passées, présentes et futures afin d'observer plus précisément l'évolution de la végétation.

La prise en compte explicite de types fonctionnels de plantes aussi variés que les NVPs, les buissons et les arbres ouvre donc de nouvelles perspectives pour améliorer les simulations climatiques et pour déterminer l'ampleur probable de l'impact de la végétation sur le climat.

5.2. Perspectives

A partir de la version actuelle de la description de la végétation boréale, il est possible d'effectuer des simulations en mode *forcé* ou *couplé* avec le modèle atmosphérique LMDZ. Si dans cette thèse des simulations futures *forcées* ont été réalisées, il est également possible d'effectuer des simulations passées. Une application typique serait par exemple de simuler la végétation boréale depuis

l'Holocène. Comme dans le modèle le gel du sol est implémenté, il serait alors possible de reproduire la dynamique du pergélisol et de la végétation boréale. Or comme cette végétation a une productivité et donc des apports de carbone dans le sol plus faibles, mais également des aires de répartition plus importantes (e.g. les NVPs) et enfin un impact potentiel sur le pergélisol, une estimation plus précise du carbone contenu actuellement dans le pergélisol pourrait être obtenue. Des simulations futures pourraient alors permettre d'estimer la quantité de carbone pouvant être libérée dans l'atmosphère ainsi que les rétroactions climatiques susceptibles d'être engendrées.

De nouveaux développements sont également envisageables, notamment en suivant l'évolution continue du modèle ORCHIDEE. Ainsi le cycle de l'azote qui est développé parallèlement dans une autre version d'ORCHIDEE devra être *couplé* et modifié pour inclure les spécificités des NVPs et des buissons. Cela permettrait de pouvoir prendre en compte la compétition pour les éléments nutritifs, notamment entre les plantes vasculaires sensibles et les NVPs plus résistantes. Le même type de développement est envisageable avec l'intégration de l'oxygène, permettant de reproduire des conditions anoxiques dans certains écosystèmes. Ainsi, le développement de certains PFTs (comme les arbres) pourrait être limité dans des régions où l'oxygène n'est pas présent au niveau des racines, favorisant le développement de PFTs moins sensibles (tels que les NVPs). La décomposition dans le sol pourrait également chuter en conditions anoxiques, entrainant une accumulation importante de carbone dans le sol comme dans le cas des tourbières. De même, une autre version du modèle ORCHIDEE prend en compte la distribution d'un peuplement forestier en termes de classes de diamètre et d'âge et applique des relations adaptées pour traiter la mortalité naturelle (Naudts et al., 2015). Intégrer ce type de développement et l'étendre à la compétition entre « peuplements » ou « individus » serait particulièrement intéressant avec l'ajout des buissons et des NVPs. Cela permettrait notamment de mettre en place des sous-bois, sachant que la couverture de bryophytes en sous-bois peut atteindre 100 % (Frolking et al., 1996). Le développement récent relatif au bilan d'énergie sur plusieurs couches verticales (Ryder et al., 2016) était déjà une première étape importante pour le développement de ces « sous-bois ».

Une évolution des nouveaux PFTs implémentés dans ce modèle peut également être envisagée :

- Les buissons boréaux apportent de nouvelles perspectives. Etant donné qu'il s'agit d'un PFT proche des arbres, mais avec quelques processus distincts, ainsi qu'une allométrie différente (ce sont finalement des « petits arbres »), on pourrait questionner l'existence d'un unique PFT buissons contre 8 PFTs arborés. La facilité d'implémentation de nouveaux PFTs dans ORCHIDEE pourrait permettre de créer pour chaque type d'arbre un PFT buissons associé, distinct par un jeu réduit de paramètres et de processus. Cela implique tout de même l'intégration de nouveaux processus, comme par exemple d'un nouveau profil racinaire pour représenter les buissons se développant sous des climats arides, de type savane.

- Les NVPs représentent des biomes peu productifs qui étaient jusqu'alors très peu représentés. Il sera donc intéressant de les maintenir dans les versions futures d'ORCHIDEE. De plus, afin de mieux représenter le comportement des NVPs dans les tourbières d'un côté et les milieux extrêmes de l'autre, il peut être envisagé de les séparer en deux PFTs distincts, les bryophytes et les lichens. Cela permettrait également de différencier deux classes de végétation distinctes avec d'un côté un PFT contenant majoritairement des mousses, et de l'autre une symbiose regroupant un champignon et une algue.
- Les herbacées C3 boréales semblent être importantes en simulation dynamique et non dynamique afin de représenter leur plus faible productivité par rapport au PFT herbacé C3 standard. Pour autant la distinction dans le modèle est faible et se résume à quelques paramètres. Il serait donc à ce stade plus intéressant de ne maintenir qu'un unique PFT herbacé C3, mais en rendant seulement quelques paramètres dépendant du climat et / ou des conditions édaphiques. Si pour cela la latitude pourrait être utilisée, une approche plus fonctionnelle (par exemple par rapport à la température) serait clairement à privilégier.

Enfin, un certain nombre de processus pourrait également être adapté avec les nouveaux PFTs, sachant que par défaut les PFTs boréaux suivent le même comportement que les PFTs dont ils sont issus. Ainsi l'impact des herbivores (mis à jour actuellement dans une autre version d'ORCHIDEE) pourrait être adapté aux buissons afin de ne pas simuler simplement une augmentation de leur mortalité mais une modification de leur développement, telle que le changement d'allocation du carbone dans les réserves. L'impact du feu pourrait également être distingué entre les arbres plus robustes mais qui une fois brulés mettent des années à se reconstituer, et les buissons plus sensibles (du fait de l'absence de tronc) mais qui ont besoin de beaucoup moins de temps pour se développer.

Globalement, cela ouvre la porte à l'implémentation d'un processus qui me tenait à cœur, mais qui ne pouvait pas être développé durant cette thèse : la « succession » de la végétation. Il s'agit de prendre en compte la cinétique du développement de la végétation. Ainsi, dans la version actuelle, un changement brutal des conditions (introduction d'eau) dans le Sahara peut faire pousser un arbre en quelques années. Sans aller jusqu'à la notion de graine, la notion d'accumulation de matière organique nécessaire pour l'apparition de végétaux arborés pourrait être intéressante pour représenter la dynamique temporelle de remplacement des écosystèmes. L'intérêt de ce type de développement serait de ne plus seulement définir un état d'équilibre, mais d'être capable de représenter la dynamique d'une transition. Dans le cas présent de la simulation de la végétation boréale, il est possible que l'on surestime la vitesse de développement de la végétation, notamment arborée, et donc l'effet « puits de carbone » lors d'une migration vers le nord des PFTs arborés.

BIBLIOGRAPHIE

Aiba, S.-I. and Kohyama, T.: Tree Species Stratification in Relation to Allometry and Demography in a Warm-Temperate Rain Forest, J. Ecol., 84(2), 207, doi:10.2307/2261356, 1996.

Barichivich, J., Briffa, K. R., Myneni, R. B., Osborn, T. J., Melvin, T. M., Ciais, P., Piao, S. and Tucker, C.: Large-scale variations in the vegetation growing season and annual cycle of atmospheric CO_2 at high northern latitudes from 1950 to 2011, Glob. Change Biol., 19(10), 3167–3183, doi:10.1111/gcb.12283, 2013.

Bastrikov, V., MacBean, N., Peylin, P., Bacour, C., Santaren, D. and Kuppel, S.: Land surface model parameter optimisation using in-situ flux data: comparison of gradient-based versus random search algorithms, in preparation.

Bengtsson, L., Semenov, V. A. and Johannessen, O. M.: The Early Twentieth-Century Warming in the Arctic—A Possible Mechanism, J. Clim., 17(20), 4045–4057, doi:10.1175/1520-0442(2004)017<4045:TETWIT>2.0.CO;2, 2004.

Betts, R. A.: Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo, Nature, 408(6809), 187–190, doi:10.1038/35041545, 2000.

Bigelow, N. H.: Climate change and Arctic ecosystems: 1. Vegetation changes north of 55°N between the last glacial maximum, mid-Holocene, and present, J. Geophys. Res., 108(D19), doi:10.1029/2002JD002558, 2003.

Blok, D., Schaepman-Strub, G., Bartholomeus, H., Heijmans, M. M. P. D., Maximov, T. C. and Berendse, F.: The response of Arctic vegetation to the summer climate: relation between shrub cover, NDVI, surface albedo and temperature, Environ. Res. Lett., 6(3), 35502, doi:10.1088/1748-9326/6/3/035502, 2011.

Bonan, G. B., Lawrence, P. J., Oleson, K. W., Levis, S., Jung, M., Reichstein, M., Lawrence, D. M. and Swenson, S. C.: Improving canopy processes in the Community Land Model version 4 (CLM4) using global flux fields empirically inferred from FLUXNET data, J. Geophys. Res., 116(G2), doi:10.1029/2010JG001593, 2011.

Bonfils, C. J. W., Phillips, T. J., Lawrence, D. M., Cameron-Smith, P., Riley, W. J. and Subin, Z. M.: On the influence of shrub height and expansion on northern high latitude climate, Environ. Res. Lett., 7(1), 15503, doi:10.1088/1748-9326/7/1/015503, 2012.

Boone, A.: Description du schema de neige ISBA-ES (Explicit Snow), Note Cent. Meteo-FranceCNRM, (70), 53, 2002.

Boone, A. and Etchevers, P.: An Intercomparison of Three Snow Schemes of Varying Complexity Coupled to the Same Land Surface Model: Local-Scale Evaluation at an Alpine Site, J. Hydrometeorol., 2(4), 374–394, doi:10.1175/1525-7541(2001)002<0374:AIOTSS>2.0.CO;2, 2001.

Botta, A., Viovy, N., Ciais, P., Friedlingstein, P. and Monfray, P.: A global prognostic scheme of leaf onset using satellite data, Glob. Change Biol., 6(7), 709–725, doi:10.1046/j.1365-2486.2000.00362.x, 2000.

Brovkin, V., Levis, S., Loutre, M.-F., Crucifix, M., Claussen, M., Ganopolski, A., Kubatzki, C. and Petoukhov, V.: Stability Analysis of the Climate-Vegetation System in the Northern High Latitudes, Clim. Change, 57(1/2), 119–138, doi:10.1023/A:1022168609525, 2003.

Calov, R., Ganopolski, A., Kubatzki, C. and Claussen, M.: Mechanisms and time scales of glacial inception simulated with an Earth system model of intermediate complexity, Clim. Past, 5(2), 245–258, doi:10.5194/cp-5-245-2009, 2009.

CAVM Mapping Team, Walker, D. A., Raynolds, M. K., Maier, H. A., Trahan, N. G. and U.S. Fish and Wildlife Service: Circumpolar Arctic vegetation, 2003.

Chadburn, S., Burke, E., Essery, R., Boike, J., Langer, M., Heikenfeld, M., Cox, P. and Friedlingstein, P.: An improved representation of physical permafrost dynamics in the JULES land-surface model, Geosci. Model Dev., 8(5), 1493–1508, doi:10.5194/gmd-8-1493-2015, 2015a.

Chadburn, S. E., Burke, E. J., Essery, R. L. H., Boike, J., Langer, M., Heikenfeld, M., Cox, P. M. and Friedlingstein, P.: Impact of model developments on present and future simulations of permafrost in a global land-surface model, The Cryosphere, 9(4), 1505–1521, doi:10.5194/tc-9-1505-2015, 2015b.

Chalita, S. and Le Treut, H.: The albedo of temperate and boreal forest and the Northern Hemisphere climate: a sensitivity experiment using the LMD GCM, Clim. Dyn., 10(4–5), 231–240, doi:10.1007/BF00208990, 1994.

Choisnel, E. M., Jourdain, S. V. and Jacquart, C. J.: Climatological evaluation of some fluxes of the surface energy and soil water balances over France, Ann. Geophys., 13(6), 666–674, doi:10.1007/s00585-995-0666-y, 1995.

Clark, D. B., Mercado, L. M., Sitch, S., Jones, C. D., Gedney, N., Best, M. J., Pryor, M., Rooney, G. G., Essery, R. L. H., Blyth, E., Boucher, O., Harding, R. J., Huntingford, C. and Cox, P. M.: The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 2: Carbon fluxes and vegetation dynamics, Geosci. Model Dev., 4(3), 701–722, doi:10.5194/gmd-4-701-2011, 2011.

Cook, B. I., Bonan, G. B., Levis, S. and Epstein, H. E.: Rapid vegetation responses and feedbacks amplify climate model response to snow cover changes, Clim. Dyn., 30(4), 391–406, doi:10.1007/s00382-007-0296-z, 2008.

Cox, P. M., Betts, R. A., Jones, C. D., Spall, S. A. and Totterdell, I. J.: Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model, Nature, 408(6809), 184–187, doi:10.1038/35041539, 2000.

Crucifix, M. and Loutre, F.: Transient simulations over the last interglacial period (126-115 kyr BP): feedback and forcing analysis, Clim. Dyn., 19(5–6), 417–433, doi:10.1007/s00382-002-0234-z, 2002.

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N. and Vitart, F.: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, Q. J. R. Meteorol. Soc., 137(656), 553–597, doi:10.1002/qj.828, 2011.

Domine, F., Barrere, M. and Sarrazin, D.: Seasonal evolution of the effective thermal conductivity of the snow and the soil in high Arctic herb tundra at Bylot Island, Canada, The Cryosphere, 10(6), 2573–2588, doi:10.5194/tc-10-2573-2016, 2016.

Douville, H., Royer, J.-F. and Mahfouf, J.-F.: A new snow parameterization for the Météo-France climate model: Part I: validation in stand-alone experiments, Clim. Dyn., 12(1), 21–35, doi:10.1007/BF00208760, 1995.

Druel, A., Krinner, G., Peylin, P., Viovy, N. and Ciais, P.: Incorporating bryophytes and Arctic shrubs in a global land surface model with dynamical vegetation, in preparation.

Druel, A., Peylin, P., Krinner, G., Ciais, P., Viovy, N., Peregon, A., Bastrikov, V., Kosykh, N. P. and Mironycheva-Tokareva, N. P.: Towards a more detailed representation of high-latitude vegetation in the global land surface model ORCHIDEE (ORC-HL-VEGv1.0), Geosci. Model Dev. Discuss., in review, doi:10.5194/gmd-2017-65, 2017.

Ducoudré, N. I., Laval, K. and Perrier, A.: SECHIBA, a New Set of Parameterizations of the Hydrologic Exchanges at the Land-Atmosphere Interface within the LMD Atmospheric General Circulation Model, J. Clim., 6(2), 248–273, doi:10.1175/1520-0442(1993)006<0248:SANSOP>2.0.CO;2, 1993.

Dufresne, J.-L., Foujols, M.-A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., Balkanski, Y., Bekki, S., Bellenger, H., Benshila, R., Bony, S., Bopp, L., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Cheruy, F., Codron, F., Cozic, A., Cugnet, D., de Noblet, N., Duvel, J.-P., Ethé, C., Fairhead, L., Fichefet, T., Flavoni, S., Friedlingstein, P., Grandpeix, J.-Y., Guez, L., Guilyardi, E., Hauglustaine, D., Hourdin, F., Idelkadi, A., Ghattas, J., Joussaume, S., Kageyama, M., Krinner, G., Labetoulle, S., Lahellec, A., Lefebvre, M.-P., Lefevre, F., Levy, C., Li, Z. X., Lloyd, J., Lott, F., Madec, G., Mancip, M., Marchand, M., Masson, S., Meurdesoif, Y., Mignot, J., Musat, I., Parouty, S., Polcher, J., Rio, C., Schulz, M., Swingedouw, D., Szopa, S., Talandier, C., Terray, P., Viovy, N. and Vuichard, N.: Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5, Clim. Dyn., 40(9–10), 2123–2165, doi:10.1007/s00382-012-1636-1, 2013.

Elmendorf, S. C., Henry, G. H. R., Hollister, R. D., Björk, R. G., Boulanger-Lapointe, N., Cooper, E. J., Cornelissen, J. H. C., Day, T. A., Dorrepaal, E., Elumeeva, T. G., Gill, M., Gould, W. A., Harte, J., Hik, D. S., Hofgaard, A., Johnson, D. R., Johnstone, J. F., Jónsdóttir, I. S., Jorgenson, J. C., Klanderud, K., Klein, J. A., Koh, S., Kudo, G., Lara, M., Lévesque, E., Magnússon, B., May, J. L., Mercado-Dı´az, J. A., Michelsen, A., Molau, U., Myers-Smith, I. H., Oberbauer, S. F., Onipchenko, V. G., Rixen, C., Martin Schmidt, N., Shaver, G. R., Spasojevic, M. J., Þórhallsdóttir, Þ. E., Tolvanen, A., Troxler, T., Tweedie, C. E., Villareal, S., Wahren, C.-H., Walker, X., Webber, P. J., Welker, J. M. and Wipf, S.: Plot-scale evidence of tundra vegetation change and links to recent summer warming, Nat. Clim. Change, 2(6), 453–457, doi:10.1038/nclimate1465, 2012.

Epstein, H. E., Walker, M. D., Chapin, F. S. and Starfield, A. M.: A transient, nutrient-based model of artic plant community response to climatic warming, Ecol. Appl., 10(3), 824–841, doi:10.1890/1051-0761(2000)010[0824:ATNBMO]2.0.CO;2, 2000.

Farquhar, G. D., von Caemmerer, S. and Berry, J. A.: A biochemical model of photosynthetic CO2 assimilation in leaves of C3 species, Planta, 149(1), 78–90, doi:10.1007/BF00386231, 1980.

Flexas, J., Carriquí, M., Coopman, R. E., Gago, J., Galmés, J., Martorell, S., Morales, F. and Diaz-Espejo, A.: Stomatal and mesophyll conductances to CO2 in different plant groups: Underrated factors for predicting leaf photosynthesis responses to climate change?, Plant Sci., 226, 41–48, doi:10.1016/j.plantsci.2014.06.011, 2014.

Foley, J. A., Kutzbach, J. E., Coe, M. T. and Levis, S.: Feedbacks between climate and boreal forests during the Holocene epoch, Nature, 371(6492), 52–54, doi:10.1038/371052a0, 1994.

Foody, G. M.: Thematic Map Comparison, Photogramm. Eng. Remote Sens., 70(5), 627–633, doi:10.14358/PERS.70.5.627, 2004.

Friedlingstein, P., Joel, G., Field, C. B. and Fung, I. Y.: Toward an allocation scheme for global terrestrial carbon models, Glob. Change Biol., 5(7), 755–770, doi:10.1046/j.1365-2486.1999.00269.x, 1999.

Frolking, S., Goulden, M. L., Wofsy, S. C., Fan, S.-M., Sutton, D. J., Munger, J. W., Bazzaz, A. M., Daube, B. C., Crill, P. M., Aber, J. D., Band, L. E., Wang, X., Savage, K., Moore, T. and Harriss, R. C.: Modelling temporal variability in the carbon balance of a spruce/moss boreal forest, Glob. Change Biol., 2(4), 343–366, doi:10.1111/j.1365-2486.1996.tb00086.x, 1996.

Frost, G. V. and Epstein, H. E.: Tall shrub and tree expansion in Siberian tundra ecotones since the 1960s, Glob. Change Biol., 20(4), 1264–1277, doi:10.1111/gcb.12406, 2014.

Gallimore, R. G. and Kutzbach, J. E.: Role of orbitally induced changes in tundra area in the onset of glaciation, Nature, 381(6582), 503–505, doi:10.1038/381503a0, 1996.

Gouttevin, I., Krinner, G., Ciais, P., Polcher, J. and Legout, C.: Multi-scale validation of a new soil freezing scheme for a land-surface model with physically-based hydrology, The Cryosphere, 6(2), 407–430, doi:10.5194/tc-6-407-2012, 2012.

Hagen, A.: Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps, Int. J. Geogr. Inf. Sci., 17(3), 235–249, doi:10.1080/13658810210157822, 2003.

Hansen, J., Johnson, D., Lacis, A., Lebedeff, S., Lee, P., Rind, D. and Russell, G.: Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, Science, 213(4511), 957–966, doi:10.1126/science.213.4511.957, 1981.

Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J. and Lister, D. H.: Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset: UPDATED HIGH-RESOLUTION GRIDS OF MONTHLY CLIMATIC OBSERVATIONS, Int. J. Climatol., 34(3), 623–642, doi:10.1002/joc.3711, 2014.

Hourdin, F.: Study and numerical simulation of the general circulation of planetary atmospheres, Université de Paris VII, Paris VII., 1992.

Intergovernmental Panel on Climate Change, Ed.: Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge. [online] Available from: http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9781107415324 (Accessed 26 May 2016), 2014.

Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon, S. and Intergovernmental Panel on Climate Change, Eds.: Climate Change 2007: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge ; New York., 2007.

Jia, G. J., Epstein, H. E. and Walker, D. A.: Greening of arctic Alaska, 1981-2001: GREENING OF ARCTIC ALASKA, 1981-2001, Geophys. Res. Lett., 30(20), n/a-n/a, doi:10.1029/2003GL018268, 2003.

Jiang, Y., Zhuang, Q., Schaphoff, S., Sitch, S., Sokolov, A., Kicklighter, D. and Melillo, J.: Uncertainty analysis of vegetation distribution in the northern high latitudes during the 21st century with a dynamic vegetation model: Uncertainty Analysis of Vegetation Distribution, Ecol. Evol., 2(3), 593–614, doi:10.1002/ece3.85, 2012.

Joos, F., Gerber, S., Prentice, I. C., Otto-Bliesner, B. L. and Valdes, P. J.: Transient simulations of Holocene atmospheric carbon dioxide and terrestrial carbon since the Last Glacial Maximum: HOLOCENE ATMOSPHERIC CO $_2$, Glob. Biogeochem. Cycles, 18(2), n/a-n/a, doi:10.1029/2003GB002156, 2004.

Kageyama, M., Braconnot, P., Bopp, L., Mariotti, V., Roy, T., Woillez, M.-N., Caubel, A., Foujols, M.-A., Guilyardi, E., Khodri, M., Lloyd, J., Lombard, F. and Marti, O.: Mid-Holocene and last glacial maximum climate simulations with the IPSL model: part II: model-data comparisons, Clim. Dyn., 40(9–10), 2469–2495, doi:10.1007/s00382-012-1499-5, 2013.

Kaplan, J. O., Bigelow, N. H., Prentice, I. C., Harrison, S. P., Bartlein, P. J., Christensen, T. R., Cramer, W., Matveyeva, N. V., McGuire, A. D., Murray, D. F., Razzhivin, V. Y., Smith, B., Walker, D. A., Anderson, P. M., Andreev, A. A., Brubaker, L. B., Edwards, M. E. and Lozhkin, A. V.: Climate change and Arctic ecosystems: 2. Modeling, paleodata-model comparisons, and future projections, J. Geophys. Res., 108(D19), doi:10.1029/2002JD002559, 2003.

Kattge, J. and Knorr, W.: Temperature acclimation in a biochemical model of photosynthesis: a reanalysis of data from 36 species, Plant Cell Environ., 30(9), 1176–1190, doi:10.1111/j.1365-3040.2007.01690.x, 2007.

Kattge, J., DíAz, S., Lavorel, S., Prentice, I. C., Leadley, P., BöNisch, G., Garnier, E., Westoby, M., Reich, P. B., Wright, I. J., Cornelissen, J. H. C., Violle, C., Harrison, S. P., Van BODEGOM, P. M., Reichstein, M., Enquist, B. J., Soudzilovskaia, N. A., Ackerly, D. D., Anand, M., Atkin, O., Bahn, M., Baker, T. R., Baldocchi, D., Bekker, R., Blanco, C. C., Blonder, B., Bond, W. J., Bradstock, R., Bunker, D. E., Casanoves, F., Cavender-Bares, J., Chambers, J. Q., Chapin Iii, F. S., Chave, J., Coomes, D., Cornwell, W. K., Craine, J. M., Dobrin, B. H., Duarte, L., Durka, W., Elser, J., Esser, G., Estiarte, M., Fagan, W. F., Fang, J., FernáNdez-MéNdez, F., Fidelis, A., Finegan, B., Flores, O., Ford, H., Frank, D., Freschet, G. T., Fyllas, N. M., Gallagher, R. V., Green, W. A., Gutierrez, A. G., Hickler, T., Higgins, S. I., Hodgson, J. G., Jalili, A., Jansen, S., Joly, C. A., Kerkhoff, A. J., Kirkup, D., Kitajima, K., Kleyer, M., Klotz, S., Knops, J. M. H., Kramer, K., KüHn, I., Kurokawa, H., Laughlin, D., Lee, T. D., Leishman, M., Lens, F., Lenz, T., Lewis, S. L., Lloyd, J., Llusià, J., Louault, F., Ma, S., Mahecha, M. D., Manning, P., Massad, T., Medlyn, B. E., Messier, J., Moles, A. T., MüLler, S. C., Nadrowski, K., Naeem, S., Niinemets, ü., NöLlert, S., NüSke, A., Ogaya, R., Oleksyn, J., Onipchenko, V. G., Onoda, Y., OrdoñEz, J., Overbeck, G., et al.: TRY - a global database of plant traits: TRY - A GLOBAL DATABASE OF PLANT TRAITS, Glob. Change Biol., 17(9), 2905–2935, doi:10.1111/j.1365-2486.2011.02451.x, 2011.

Koven, C. D., Lawrence, D. M. and Riley, W. J.: Permafrost carbon−climate feedback is sensitive to deep soil carbon decomposability but not deep soil nitrogen dynamics, Proc. Natl. Acad. Sci., 201415123, doi:10.1073/pnas.1415123112, 2015.

Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S. and Prentice, I. C.: A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system: DVGM FOR COUPLED CLIMATE STUDIES, Glob. Biogeochem. Cycles, 19(1), n/a-n/a, doi:10.1029/2003GB002199, 2005.

Kuppel, S.: Assimilation de mesures de flux turbulents d'eau et de carbone dans un modèle de la biosphère continentale, Sciences de l'atmosphère, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, 14 December., 2012.

Kuppel, S., Chevallier, F. and Peylin, P.: Quantifying the model structural error in carbon cycle data assimilation systems, Geosci. Model Dev., 6(1), 45–55, doi:10.5194/gmd-6-45-2013, 2013.

Lacis, A. A., Schmidt, G. A., Rind, D. and Ruedy, R. A.: Atmospheric CO2: Principal Control Knob Governing Earth's Temperature, Science, 330(6002), 356–359, doi:10.1126/science.1190653, 2010.

Laval, K., Sadourny, R. and Serafini, Y.: Land surface processes in a simplified general circulation model, Geophys. Astrophys. Fluid Dyn., 17(1), 129–150, doi:10.1080/03091928108243677, 1981.

Legendre, P., Borcard, D. and Peres-Neto, P. R.: Analysing beta diversity: Partitioning the spacial variation of community composition data, Ecol. Monogr., 75(4), 435–450, doi:10.1890/05-0549, 2005.

Liang, S., Zhao, X., Liu, S., Yuan, W., Cheng, X., Xiao, Z., Zhang, X., Liu, Q., Cheng, J., Tang, H., Qu, Y., Bo, Y., Qu, Y., Ren, H., Yu, K. and Townshend, J.: A long-term Global LAnd Surface Satellite (GLASS) data-set for environmental studies, Int. J. Digit. Earth, 6(sup1), 5–33, doi:10.1080/17538947.2013.805262, 2013.

Loveland, T. R., Reed, B. C., Brown, J. F., Ohlen, D. O., Zhu, Z., Yang, L. and Merchant, J. W.: Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data, Int. J. Remote Sens., 21(6–7), 1303–1330, doi:10.1080/014311600210191, 2000.

Manabe, S. and Bryan, K.: Climate Calculations with a Combined Ocean-Atmosphere Model, J. Atmospheric Sci., 26(4), 786–789, doi:10.1175/1520-0469(1969)026<0786:CCWACO>2.0.CO;2, 1969.

Masson-Delmotte, V., Stenni, B., Pol, K., Braconnot, P., Cattani, O., Falourd, S., Kageyama, M., Jouzel, J., Landais, A., Minster, B., Barnola, J. M., Chappellaz, J., Krinner, G., Johnsen, S., Röthlisberger, R., Hansen, J., Mikolajewicz, U. and Otto-Bliesner, B.: EPICA Dome C record of glacial and interglacial intensities, Quat. Sci. Rev., 29(1–2), 113–128, doi:10.1016/j.quascirev.2009.09.030, 2010.

Meissner, K. J., Weaver, A. J., Matthews, H. D. and Cox, P. M.: The role of land surface dynamics in glacial inception: a study with the UVic Earth System Model, Clim. Dyn., 21(7–8), 515–537, doi:10.1007/s00382-003-0352-2, 2003.

Monserud, R. A. and Leemans, R.: Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic, Ecol. Model., 62(4), 275–293, doi:10.1016/0304-3800(92)90003-W, 1992.

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P. and Wilbanks, T. J.: The next generation of scenarios for climate change research and assessment, Nature, 463(7282), 747–756, doi:10.1038/nature08823, 2010.

Naudts, K., Ryder, J., McGrath, M. J., Otto, J., Chen, Y., Valade, A., Bellasen, V., Berhongaray, G., Bönisch, G., Campioli, M., Ghattas, J., De Groote, T., Haverd, V., Kattge, J., MacBean, N., Maignan, F., Merilä, P., Penuelas, J., Peylin, P., Pinty, B., Pretzsch, H., Schulze, E. D., Solyga, D., Vuichard, N., Yan, Y. and Luyssaert, S.: A vertically discretised canopy description for ORCHIDEE (SVN r2290) and the modifications to the energy, water and carbon fluxes, Geosci. Model Dev., 8(7), 2035–2065, doi:10.5194/gmd-8-2035-2015, 2015.

de Noblet, N. I., Prentice, I. C., Joussaume, S., Texier, D., Botta, A. and Haxeltine, A.: Possible role of atmosphere-biosphere interactions in triggering the Last Glaciation, Geophys. Res. Lett., 23(22), 3191–3194, doi:10.1029/96GL03004, 1996.

Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V. N., Underwood, E. C., D'amico, J. A., Itoua, I., Strand, H. E., Morrison, J. C., Loucks, C. J., Allnutt, T. F., Ricketts, T. H., Kura, Y., Lamoreux, J. F., Wettengel, W. W., Hedao, P. and Kassem, K. R.: Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth, BioScience, 51(11), 933, doi:10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2, 2001.

Ottlé, C., Lescure, J., Maignan, F., Poulter, B., Wang, T. and Delbart, N.: Use of various remote sensing land cover products for plant functional type mapping over Siberia, Earth Syst. Sci. Data, 5(2), 331–348, doi:10.5194/essd-5-331-2013, 2013.

Overland, J., Hanna, E., Hanssen-Bauer, S., Kim, S.-J., Walsh, J. E., Wang, M., Bhatt, U. S. and Thoman, R. L.: Surface Air Temperature, NOAA [online] Available from: http://www.arctic.noaa.gov/reportcard/air_temperature.html (Accessed 25 May 2016), 2015.

Parton, W. J.: The CENTURY model, in Evaluation of Soil Organic Matter Models, edited by D. S. Powlson, P. Smith, and J. U. Smith, pp. 283–291, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. [online] Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-61094-3_23 (Accessed 12 November 2016), 1996.

Parton, W. J., Stewart, J. W. B. and Cole, C. V.: Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model, Biogeochemistry, 5(1), 109–131, doi:10.1007/BF02180320, 1988.

Peel, M. C., Finlayson, B. L. and McMahon, T. A.: Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, Hydrol. Earth Syst. Sci., 11(5), 1633–1644, doi:10.5194/hess-11-1633-2007, 2007.

Peregon, A., Maksyutov, S., Kosykh, N. P. and Mironycheva-Tokareva, N. P.: Map-based inventory of wetland biomass and net primary production in western Siberia: WETLAND BIOMASS AND NPP INVENTORIES, J. Geophys. Res. Biogeosciences, 113(G1), n/a-n/a, doi:10.1029/2007JG000441, 2008.

Peregon, A., Kosykh, N. P., Mironycheva-Tokareva, N. P., Ciais, P. and Yamagata, Y.: Estimation of Biomass and Net Primary Production (NPP) in West Siberian Boreal Ecosystems: In Situ and Remote Sensing Methods, in Novel Methods for Monitoring and Managing Land and Water Resources in Siberia, edited by L. Mueller, A. K. Sheudshen, and F. Eulenstein, pp. 233–252, Springer International Publishing, Cham. [online] Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-24409-9_8 (Accessed 28 June 2016), 2016.

Petit, J. R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N. I., Barnola, J.-M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davis, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V. M., Legrand, M., Lipenkov, V. Y., Lorius, C., Pépin, L., Ritz, C., Saltzman, E. and Stievenard, M.: Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica, Nature, 399, 429–436, doi:10.1038/20859, 1999.

Porada, P., Ekici, A. and Beer, C.: Effects of bryophyte and lichen cover on permafrost soil temperature at large scale, Cryosphere Discuss., 1–31, doi:10.5194/tc-2015-223, 2016.

Poulter, B., Ciais, P., Hodson, E., Lischke, H., Maignan, F., Plummer, S. and Zimmermann, N. E.: Plant functional type mapping for earth system models, Geosci. Model Dev., 4(4), 993–1010, doi:10.5194/gmd-4-993-2011, 2011.

Poulter, B., MacBean, N., Hartley, A., Khlystova, I., Arino, O., Betts, R., Bontemps, S., Boettcher, M., Brockmann, C., Defourny, P., Hagemann, S., Herold, M., Kirches, G., Lamarche, C., Lederer, D., Ottlé, C., Peters, M. and Peylin, P.: Plant functional type classification for earth system models: results from the European Space Agency's Land Cover Climate Change Initiative, Geosci. Model Dev., 8(7), 2315–2328, doi:10.5194/gmd-8-2315-2015, 2015.

Prentice, I. C., Harrison, S. P. and Bartlein, P. J.: Global vegetation and terrestrial carbon cycle changes after the last ice age, New Phytol., 189(4), 988–998, doi:10.1111/j.1469-8137.2010.03620.x, 2011.

Rogers, A.: The use and misuse of V c,max in Earth System Models, Photosynth. Res., 119(1–2), 15–29, doi:10.1007/s11120-013-9818-1, 2014.

de Rosnay, P.: Représentation de l'interaction sol-végétation-atmosphère dans le Modèle de Circulation Générale du Laboratoire de Météorologie Dynamique., Physique, Université Paris 6., Paris., 1999.

de Rosnay, P. and Polcher, J.: Modelling root water uptake in a complex land surface scheme coupled to a GCM, Hydrol. Earth Syst. Sci., 2(2/3), 239–255, doi:10.5194/hess-2-239-1998, 1998.

Ryder, J., Polcher, J., Peylin, P., Ottlé, C., Chen, Y., van Gorsel, E., Haverd, V., McGrath, M. J., Naudts, K., Otto, J., Valade, A. and Luyssaert, S.: A multi-layer land surface energy budget model for implicit coupling with global atmospheric simulations, Geosci. Model Dev., 9(1), 223–245, doi:10.5194/gmd-9-223-2016, 2016.

Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y.-T., Chuang, H., Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M. P., van den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., Chen, M. and Becker, E.: The NCEP Climate Forecast System Version 2, J. Clim., 27(6), 2185–2208, doi:10.1175/JCLI-D-12-00823.1, 2014.

Santaren, D., Peylin, P., Bacour, C., Ciais, P. and Longdoz, B.: Ecosystem model optimization using in situ flux observations: benefit of Monte Carlo versus variational schemes and analyses of the year-to-year model performances, Biogeosciences, 11(24), 7137–7158, doi:10.5194/bg-11-7137-2014, 2014.

Santaren, J.-D.: Optimisation des paramètres du modèle de biosphère ORCHIDEE à partir de mesures sur site des flux de carbone, d'eau et d'énergie., Modélisation et Simulation, Université de Versailles Saint-Quentin, Versailles Saint-Quentin, 4 November., 2006.

Schaaf, C. and Wang, Z.: MCD43C3 MODIS/Terra+Aqua BRDF/Albedo Albedo Daily L3 Global 0.05Deg CMG V006, , doi:10.5067/MODIS/MCD43C3.006, 2015.

Schmidt, G. A., Ruedy, R. A., Miller, R. L. and Lacis, A. A.: Attribution of the present-day total greenhouse effect, J. Geophys. Res., 115(D20), doi:10.1029/2010JD014287, 2010.

Scripps Institution of Oceanography: C02 concentration the last 800k years, Scripps Inst. Oceanogr. [online] Available from: https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/wp-content/plugins/sio-bluemoon/graphs/co2_800k.png, 2016.

Sellers, P. J., Mintz, Y., Sud, Y. C. and Dalcher, A.: A Simple Biosphere Model (SIB) for Use within General Circulation Models, J. Atmospheric Sci., 43(6), 505–531, doi:10.1175/1520-0469(1986)043<0505:ASBMFU>2.0.CO;2, 1986.

Sellers, P. J., Randall, D. A., Collatz, G. J., Berry, J. A., Field, C. B., Dazlich, D. A., Zhang, C., Collelo, G. D. and Bounoua, L.: A Revised Land Surface Parameterization (SiB2) for Atmospheric GCMS. Part I: Model Formulation, J. Clim., 9(4), 676–705, doi:10.1175/1520-0442(1996)009<0676:ARLSPF>2.0.CO;2, 1996.

Sitch, S., Smith, B., Prentice, I. C., Arneth, A., Bondeau, A., Cramer, W., Kaplan, J. O., Levis, S., Lucht, W., Sykes, M. T., Thonicke, K. and Venevsky, S.: Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model, Glob. Change Biol., 9(2), 161–185, doi:10.1046/j.1365-2486.2003.00569.x, 2003.

Smith, B., Prentice, I. C. and Sykes, M. T.: Representation of vegetation dynamics in the modelling of terrestrial ecosystems: comparing two contrasting approaches within European climate space: Vegetation dynamics in ecosystem models, Glob. Ecol. Biogeogr., 10(6), 621–637, doi:10.1046/j.1466-822X.2001.t01-1-00256.x, 2001.

Soudzilovskaia, N. A., van Bodegom, P. M. and Cornelissen, J. H. C.: Dominant bryophyte control over high-latitude soil temperature fluctuations predicted by heat transfer traits, field moisture regime and laws of thermal insulation, edited by J. Schweitzer, Funct. Ecol., 27(6), 1442–1454, doi:10.1111/1365-2435.12127, 2013.

Tarantola, A.: Inverse problem theory: methods for data fitting and model parameter estimation, Elsevier ; Distributors for the United States and Canada, Elsevier Science Pub. Co, Amsterdam ; New York : New York, NY, U.S.A., 1987.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J. and Meehl, G. A.: An Overview of CMIP5 and the Experiment Design, Bull. Am. Meteorol. Soc., 93(4), 485–498, doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1, 2012.

Trenberth, K. E., Fasullo, J. T. and Kiehl, J.: Earth's Global Energy Budget, Bull. Am. Meteorol. Soc., 90(3), 311–323, doi:10.1175/2008BAMS2634.1, 2009.

Vautard, R., Cattiaux, J., Yiou, P., Thépaut, J.-N. and Ciais, P.: Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness, Nat. Geosci., 3(11), 756–761, doi:10.1038/ngeo979, 2010.

Viovy, N.: Interannuality and CO2 sensitivity of the SECHIBA-BGC coupled SVAT-BGC model, Phys. Chem. Earth, 21(5–6), 489–497, doi:10.1016/S0079-1946(97)81147-0, 1996.

Viovy, N.: Forcing ORCHIDEE: 1.1 CRU-NCEP, Forching OCRCHIDEE [online] Available from: http://forge.ipsl.jussieu.fr/orchidee/wiki/Documentation/Forcings#a1.1CRU-NCEP (Accessed 9 June 2016), 2015.

Visser, H. and de Nijs, T.: The Map Comparison Kit, Environ. Model. Softw., 21(3), 346–358, doi:10.1016/j.envsoft.2004.11.013, 2006.

Wang, T., Ottlé, C., Boone, A., Ciais, P., Brun, E., Morin, S., Krinner, G., Piao, S. and Peng, S.: Evaluation of an improved intermediate complexity snow scheme in the ORCHIDEE land surface model: ORCHIDEE SNOW MODEL EVALUATION, J. Geophys. Res. Atmospheres, 118(12), 6064–6079, doi:10.1002/jgrd.50395, 2013.

Weedon, G. P., Gomes, S., Viterbo, P., Shuttleworth, W. J., Blyth, E., Österle, H., Adam, J. C., Bellouin, N., Boucher, O. and Best, M.: Creation of the WATCH Forcing Data and Its Use to Assess Global and Regional Reference Crop Evaporation over Land during the Twentieth Century, J. Hydrometeorol., 12(5), 823–848, doi:10.1175/2011JHM1369.1, 2011.

Weedon, G. P., Balsamo, G., Bellouin, N., Gomes, S., Best, M. J. and Viterbo, P.: The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data, Water Resour. Res., 50(9), 7505–7514, doi:10.1002/2014WR015638, 2014.

Wei, Y., Liu, S., Huntzinger, D. N., Michalak, A. M., Viovy, N., Post, W. M., Schwalm, C. R., Schaefer, K., Jacobson, A. R., Lu, C., Tian, H., Ricciuto, D. M., Cook, R. B., Mao, J. and Shi, X.: The North American Carbon Program Multi-scale Synthesis and Terrestrial Model Intercomparison Project – Part 2: Environmental driver data, Geosci. Model Dev., 7(6), 2875–2893, doi:10.5194/gmd-7-2875-2014, 2014.

Wikipédia: Cycle de Calvin, vue des trois étapes : fixation du dioxyde de carbone, réduction et régénération du ribulose., [online] Available from: https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_de_Calvin#/media/File:Calvin-cycle4.svg (Accessed 22 August 2016), 2010.

Wikipédia: Chaîne de transfert d'électron dans les membranes des thylakoides, Wikipédia [online] Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thylakoid_membrane-fr.svg?uselang=fr (Accessed 22 August 2016), 2011.

Woillez, M.-N., Kageyama, M., Krinner, G., de Noblet-Ducoudré, N., Viovy, N. and Mancip, M.: Impact of CO2 and climate on the Last Glacial Maximum vegetation: results from the ORCHIDEE/IPSL models, Clim. Past, 7(2), 557–577, doi:10.5194/cp-7-557-2011, 2011.

Xiao, Z., Liang, S., Wang, J., Chen, P., Yin, X., Zhang, L. and Song, J.: Use of General Regression Neural Networks for Generating the GLASS Leaf Area Index Product From Time-Series MODIS Surface Reflectance, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 52(1), 209–223, doi:10.1109/TGRS.2013.2237780, 2014.

Yin, X. and Struik, P. C.: C3 and C4 photosynthesis models: An overview from the perspective of crop modelling, NJAS - Wagening. J. Life Sci., 57(1), 27–38, doi:10.1016/j.njas.2009.07.001, 2009.

Yoshimori, M., Reader, M. C., Weaver, A. J. and McFarlane, N. A.: On the causes of glacial inception at 116 kaBP, Clim. Dyn., 18(5), 383–402, doi:10.1007/s00382-001-0186-8, 2002.

Zhang, W., Miller, P. A., Smith, B., Wania, R., Koenigk, T. and Döscher, R.: Tundra shrubification and tree-line advance amplify arctic climate warming: results from an individual-based dynamic vegetation model, Environ. Res. Lett., 8(3), 34023, doi:10.1088/1748-9326/8/3/034023, 2013.

Zhu, D., Peng, S. S., Ciais, P., Viovy, N., Druel, A., Kageyama, M., Krinner, G., Peylin, P., Ottlé, C., Piao, S. L., Poulter, B., Schepaschenko, D. and Shvidenko, A.: Improving the dynamics of Northern Hemisphere high-latitude vegetation in the ORCHIDEE ecosystem model, Geosci. Model Dev., 8(7), 2263–2283, doi:10.5194/gmd-8-2263-2015, 2015.

Zhu, Z., Bi, J., Pan, Y., Ganguly, S., Anav, A., Xu, L., Samanta, A., Piao, S., Nemani, R. and Myneni, R.: Global Data Sets of Vegetation Leaf Area Index (LAI)3g and Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR)3g Derived from Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI3g) for the Period 1981 to 2011, Remote Sens., 5(2), 927–948, doi:10.3390/rs5020927, 2013.

Zhu, Z., Piao, S., Myneni, R. B., Huang, M., Zeng, Z., Canadell, J. G., Ciais, P., Sitch, S., Friedlingstein, P., Arneth, A., Cao, C., Cheng, L., Kato, E., Koven, C., Li, Y., Lian, X., Liu, Y., Liu, R., Mao, J., Pan, Y., Peng, S., Peñuelas, J., Poulter, B., Pugh, T. A. M., Stocker, B. D., Viovy, N., Wang, X., Wang, Y., Xiao, Z., Yang, H., Zaehle, S. and Zeng, N.: Greening of the Earth and its drivers, Nat. Clim. Change, 6(8), 791–795, doi:10.1038/nclimate3004, 2016.

Zobler, L.: A world soil profile for global climate modelling, NASA Tech. Memo., 87802, 1986.

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Le bilan radiatif terrestre : moyenne annuelle du bilan énergétique ($W.m^{-2}$) (Trenberth et al., 2009 – Fig. 1) 11

Figure 2. Séries chronologiques des indices climatiques (en unité de déviation standard) provenant de la carotte EPICA dôme C, centrés et normalisés (moyenne sur 7000 ans en trait plein et écart-type correspondant en ombragé), pour : la température de l'atmosphère (rouge), la poussière (échelle logarithmique, bon proxy des aérosol), le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et le niveau des océans (Masson-Delmotte et al., 2010). 12

Figure 3. Concentration du dioxyde de carbone dans l'atmosphère depuis 800 000 ans. Avant 1958 les données proviennent de carottes de glace et ensuite des mesures de Mauna Loa. On a atteint 400 ppm en 2015 (Scripps Institution of Oceanography, 2016). 13

Figure 4. Evolution de la température moyenne annuelle mondiale (écart à la moyenne sur la période de référence (1961-1990). Données issues de la NASA (National Aeronautics and Space Administration, courbe bleu), du NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, courbe orange), du Met Office (courbe grise) et de Météo-France (courbe jaune). 14

Figure 5. Moyenne annuelle des anomalies de température (en °C) de surface en Arctique (>60°N) et globale, sur la période 1900-2015 par rapport à la valeur moyenne de 1981-2010 (Overland et al., 2015). 15

Figure 6. Température de surface de l'IPCC AR5WG1 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014). 15

Figure 7. Le cycle global simplifié du carbone dans les années 90. En noir les flux pré-industriels « naturels » et en rouge les flux issus de l'activité « anthropique » (Intergovernmental Panel on Climate Change et al., 2007). 16

Figure 8. Répartition spatiale de la croissance du LAI (Leaf Area Index) pour la période 1982-2009 (Zhu et al., 2016). Données de LAI issues des données GIMMS, GLOBMAP and GLASS LAI (a) et issues de moyennes de modèles (b), avec en hachuré les tendances qui sont statistiquement significatives ($p < 0,05$). c) représente les facteurs dominants contribuant à l'augmentation (+) ou la diminution (-) du LAI, avec le CO_2, le changement climatique (CLI), le dépôt d'azote (NDE), les changements de couvert végétal (LCC) et les autres facteurs (OF). d) représente la contribution de chacun des paramètres en pourcentage de végétation suivant un gradient nord-sud. 17

Figure 9. « Embuissonnement » : évolution de la fraction de végétation des buissons étudiés sur sites en Sibérie (Frost and Epstein, 2014). 18

Figure 10. Évolution de la Mer de Glace (Chamonix) de 1895 (en haut a gauche) à nos jours (en haut à droite). La coupe transversale (en bas) représente l'évolution de l'épaisseur de la glace sur cette même période (Delphine Six, LGGE). 19

Figure 11. Principaux processus dans les modèles de biosphère continentale. Les conditions limites sont l'ensoleillement (S pour shortwave), le vent, les différents types de précipitation, la température de l'air et la concentration de CO_2. Flux de carbone : photosynthèse (P), respiration autotrophe (R_a) et hétérotrophe (R_h). Flux d'eau : précipitation (pluie ou neige), ruissellement (Ru), infiltration (I), diffusion (Di), absorption par la végétation (A) et drainage (Dr). Flux d'énergie : via les courtes longueurs d'ondes (S, avec S↓= (1- α).S↑ et α l'albédo), les grandes longueurs d'ondes (L pour longwave, dont l'infrarouge), la chaleur sensible (H), la chaleur latente (LE) et la diffusion thermique (D_t). Les flux dans la neige sont également représentés. 21

Figure 12. Description schématique du modèle du système Terre IPSL-CM et de ses composantes. 29

Figure 13. Fonctionnement du modèle ORCHIDEE. Les flèches bleues représentent les échanges entre ORDHIDEE et les autres modèles de l'IPSL-CM. La structure principale d'ORCHIDEE est découpée en trois parties distinctes, avec les différents pas de temps indiqués et les principaux processus associés. Chaque point correspond à une routine distincte. Les flèches noires représentent les échanges entre ces compartiments. T° la température, S↓ et L↓ respectivement les rayonnements incidents de courtes et grandes longueurs d'ondes, H↑ et LE↑ respectivement les flux de chaleur sensible et latente. 31

Figure 14. Description des Types Fonctionnels de Plantes (PFTs) présents dans ORCHIDEE. A gauche, un diagramme de la distinction des PFTs suivant leurs spécificités physionomiques (①), climatiques (②), leur rang (③), leur phénologie (④), leur nature (⑤) et encore leur biogéochimie (⑥). A droite, le tableau récapitulatif des PFTs avec leurs noms complets et leurs numéros associés. 32

Figure 15. Structure générale du modèle ORCHIDEE décrivant les principaux processus (en bleu) et réservoirs (encadrés) de carbone dans les modules Sechiba et Stomate. Adapté de Santaren (2006)..... 34

Figure 16. Discrétisation verticale du sol utilisée pour résoudre l'Équation 7 (de Fokker-Plank). D'après de Rosnay (1999). Avec Z_i la profondeur de la couche (m), ΔZ_i (m) son épaisseur, θi sa teneur en eau, W_i son contenu en eau, q_i représentant les flux d'eau, i son indice dépendant de sa profondeur (de 1 à 11) et N l'indice de la dernière couche..... 35

Figure 17. Comparaison des schémas de neige une couche (a) et multicouches (b) utilisés dans ORCHIDEE. La précipitation et la neige sont représentées schématiquement. La diffusion de l'eau est représentée par les flèches droites bleues. S est le rayonnement de courtes longueurs d'ondes, L les grandes longueurs d'ondes, LE et H respectivement la chaleur latente et sensible, E_n l'évaporation, Dt la diffusion thermique, ρ la densité de la neige, Q le contenu calorifique de la neige (et Qp la chaleur provenant de la pluie ou la neige), Ep l'épaisseur de la neige, T sa température et Wl,i son contenu neigeux ou liquide (équivalent en eau). 38

Figure 18. Photosynthèse : chaîne de transfert d'électrons dans les membranes des thylakoides (Wikipédia, 2011). PSII, Cyt b_6f, PSI, ATP-Synthase représentent des enzymes et protéines intervenant dans le processus. 41

Figure 19. Cycle de Calvin, vue des trois étapes : fixation du dioxyde de carbone, réduction et régénération du ribulose (Wikipédia, 2010). 41

Figure 20. Évolution du coefficient de vitesse de carboxylation en fonction de deux températures mensuelles distinctes, dans ORCHIDEE. 42

Figure 21. Fonction de contrôle de la décomposition dépendant de l'humidité relative définie dans l'Équation 20. 45

Figure 22. Simplification d'un arbre, permettant de considérer numériquement un arbre comme un cylindre..... 46

Figure 23. Comparaison du profil racinaire des arbres décidus boréaux (à gauche) et de celui des herbacées C3 (à droite). La somme de la distribution racinaire faisant 1 (axe horizontale). 48

Figure 24. Carte du monde avec la limite d'étude (carte source Wikipédia) 52

Figure 25. Distribution des mousses et des lichens présents dans la LCC correspondante, issus de carte de l'ESA CCI. 55

Figure 26. Distribution spatiale des nouveaux PFTs (plantes non vasculaires, buissons, herbacées C3 boréales) ainsi que la carte de dominance des PFTs, à partir de 30°N. 56

Figure 27. Carte du monde avec les trois transects (carte source Wikipédia). 61

Figure 28. Présentation du principe de distance Euclidienne par proximité (D_{Fuzzy} ou D_f) par rapport à la distance Euclidienne standard (D_{cc}) selon deux cas 1 et 2. Dans les cartes A et B la fraction de végétation d'un unique PFT est représentée. Les valeurs nulles sont représentées en blanc, les valeurs égales à 1 en noir et les valeurs intermédiaires en gris. 69

Figure 29. Distance Euclidienne entre deux simulations (avec la nouvelle version de la végétation boréale, entre la simulation future avec le RCP 8.5 et la simulation de l'époque actuelle). (a) distance Euclidienne standard, (b) distance Euclidienne par proximité. 70

Figure 30. Algorithme de biomisation dans les régions Arctiques, permettant de convertir des fractions de PFTs simulées dans ORCHIDEE en biomes, en fonction du nombre de degrés jours au-dessus de 5°C (GDD_5), de la fraction de couverture foliaire projetée, de la hauteur moyenne de la végétation arborée et du type de climat des PFTs dominants. 72

Figure 31. Cartes montrant les différences entre le modèle final (ORC, développé dans cette thèse) et le modèle initial (ORI) avec 13 PFTs, pour la productivité primaire nette, la biomasse vivante totale, la transpiration, l'albédo total, l'albédo de la végétation et enfin la rugosité. Il s'agit des moyennes sur 10 ans (2004-2013) pour janvier, avril, juillet, octobre et annuelles. Notez que pour les albédos, l'échelle n'est pas identique à celle présentée en section 3.3. 76

Figure 32. Cartes de différences significatives d'albédo en février et juillet (moyenne de 2001 à 2010) entre les simulations « DGVM » (végétation standard 13 PFTS ou la nouvelle description de la végétation 16 PFTs) et le produit issu d'observation satellite MODIS (Schaaf and Wang, 2015). 156

Figure 33. Biomisation des végétations simulées par ORCHIDEE (moyenne entre 2004 et 2013 pour les simulations DGVM et entre 2091 et 2100 pour les simulations DVGM4.5 et DVGM8.5), soit en suivant l'algorithme présenté dans la Figure 30, soit en l'adaptant lorsque c'est indiqué. Les biomes représentés sont le *désert*, les prairies sèches ou arbustives (*Dgrass*), les *Toundras*, les toundras arbustives (*ShTundra*), les forêts tempérées (*TempFo*), les savanes tempérées (TempPark), les forêts boréales (*BoFo*) et les toundras arborées (*BoPar*)..... 159

Figure 34. Ensemble de résultats décrivant la répartition de la végétation (16 PFTs) simulée à travers a), b) et c) trois séries chronologiques réalisées sur des bandes longitudinales différentes, montrant les résultats des simulations DGVM, DGVM4.5 et DGVM8.5 (trait en pointillés) ; d) une carte de couleurs composite présentant en rouge les arbres, en bleu les buissons et en vert les herbacées (la teinte représentant la fraction de chacune des 3 couches) ; et e) une carte de biomes obtenue à l'aide de la méthode de biomisation (section 2.3.3.3). 161

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Description des 8 compartiments (organes) des végétaux dans ORCHIDEE, et les ratios respectifs lignine / carbone (L:C) et carbone / azote (C:N) associés. 33

Tableau 2. Discrétisation verticale des couches hydriques. 35

Tableau 3. Conductivité et capacité des différents constituants dans le sol. 49

Tableau 4. Paramètres de compaction de la neige (d'après Wang et al., 2013) 51

Tableau 5. Synthèse des données de biomasse et de productivité sur les 36 sites 58

Tableau 6. Synthèse des données de biomasse et de productivité sur les 16 sites. Légende : biom pour biomasse (gC.m-2), NPP pour la productivité nette (gC.m-2.an-1). (10%) signifie que seule la végétation représentant au moins 10 % de la surface totale a été prise en compte. 58

Tableau 7. Description des 6 ensembles de simulations effectuées. ORI et ORC présentent chacune une unique simulation « 13 PFTs » alors que « ORC2.0 » et les DGVM présentent une simulation « 13PFTs » ainsi qu'une simulation « 16 PFTs ». *Pour le forçage, cf section 2.2.2. **fichiers de forçage issus de IPSL-CM5A-LR. 62

Tableau 8. Description des paramètres optimisés, de leur valeur initiale (prior), minimale (min), maximale (max) et de la valeur obtenue (POST). La valeur de la fonction de coût est également incluse de façon indicative. 65

Tableau 9. Valeur moyenne de l'eau provenant de l'atmosphère (pluie et neige) issue des fichiers de forçage correspondant aux simulations (cf. Tableau 7), des sorties simulées correspondantes et de l'évolution du réservoir de neige (en $mm.m^{-2}.j^{-1}$), au-dessus de 65°N et en excluant le Groenland. 157

ANNEXES

ANNEXE A.

Discrétisation verticale des couches thermiques

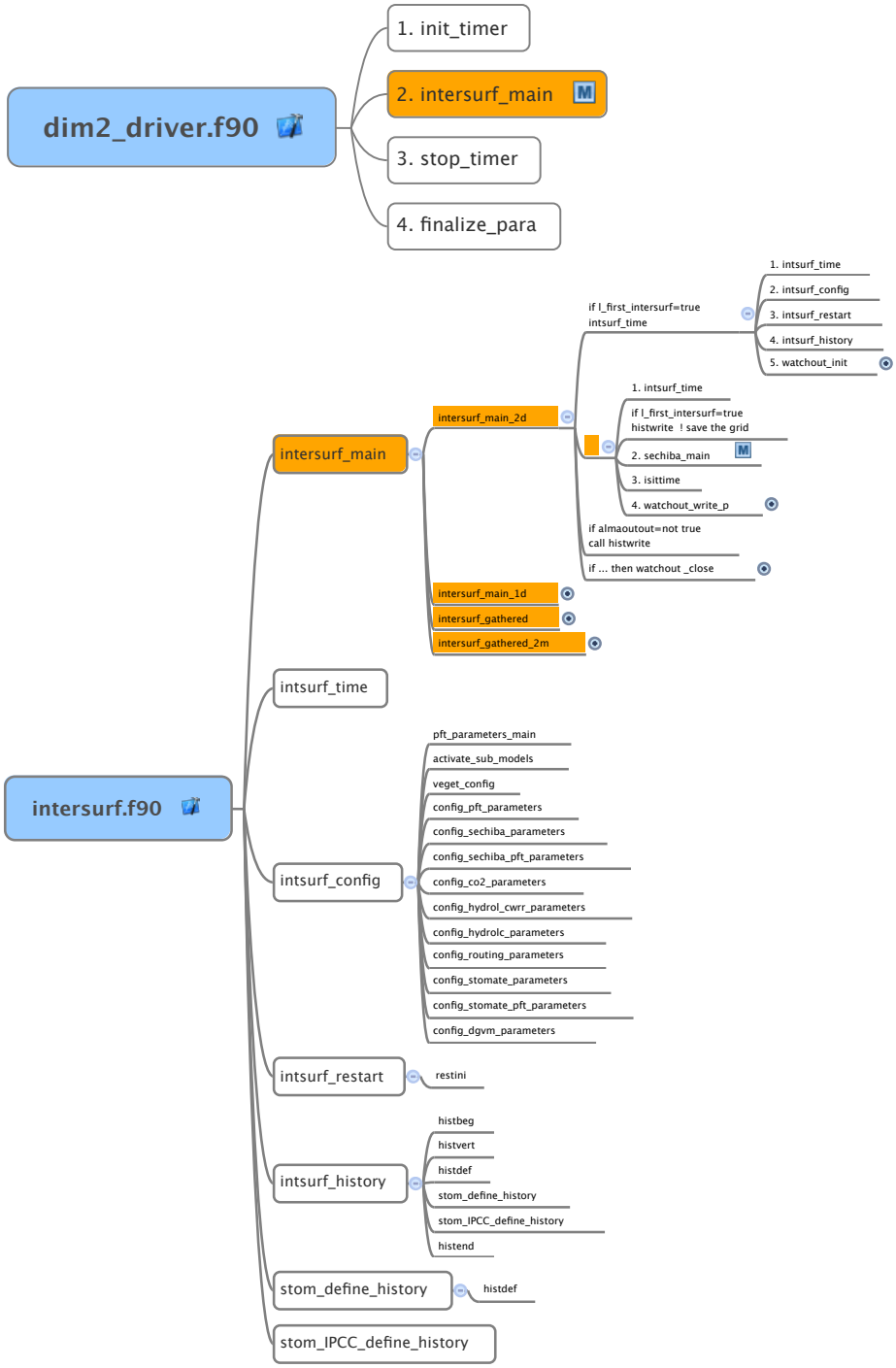
Discrétisation verticale des couches thermiques dans le modèle ORCHIDEE

Indice de la couche	Profondeur du nœud	Profondeur de la limite inférieure	Épaisseur
1	0,02	0,04	0,04
2	0,06	0,09	0,05
3	0,12	0,15	0,06
4	0,19	0,22	0,07
5	0,26	0,31	0,08
6	0,36	0,41	0,10
7	0,46	0,52	0,12
8	0,89	0,66	0,14
9	0,74	0,82	0,16
10	0,91	1,01	0,19
11	1,12	1,24	0,23
12	1,37	1,51	0,27
13	1,66	1,82	0,31
14	2,00	2,19	0,37
15	2,40	2,63	0,44
16	2,87	3,14	0,52
17	3,44	3,75	0,61
18	4,10	4,47	0,72
19	4,88	5,32	0,85
20	5,80	6,32	1,00
21	6,89	7,50	1,18
22	8,17	8,89	1,39
23	9,68	10,54	1,64
24	11,47	12,48	1,94
25	13,57	14,77	2,29
26	16,06	17,47	2,70
27	19,00	20,65	3,19
28	22,46	24,42	3,76
29	26,54	28,53	4,44
30	31,36	34,09	5,24
31	37,05	40,27	6,18
32	43,76	47,56	7,29

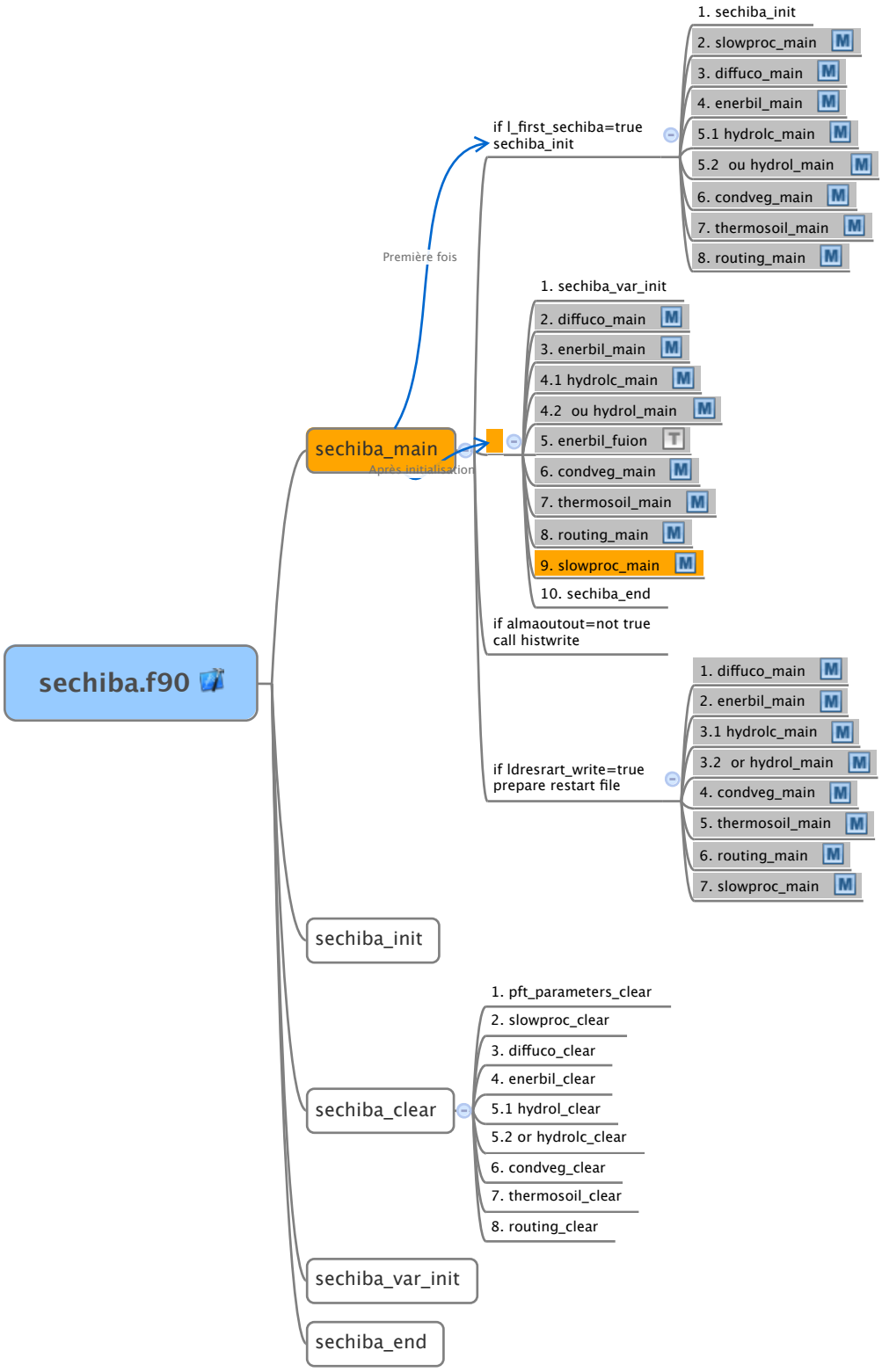
ANNEXE B.

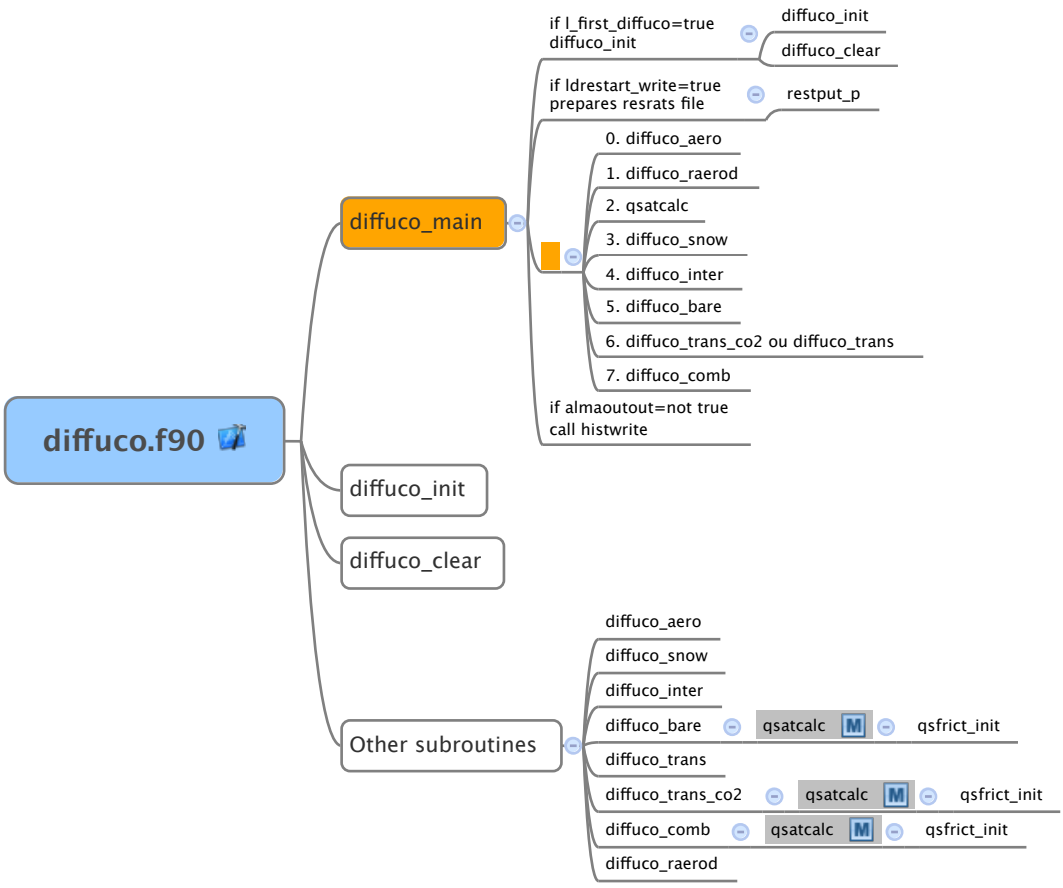
Organigramme des modules utilisés dans ORCHIDEE

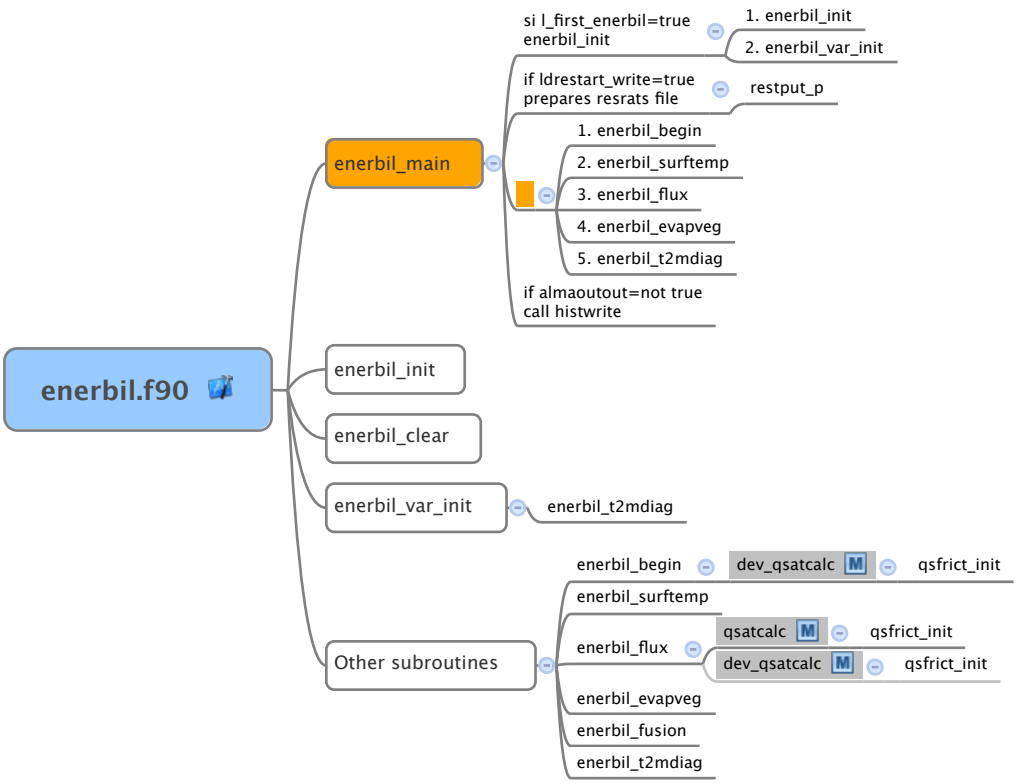
Légende : Chaque module est décrit par une figure qui contient un cadre bleu dans lequel est inscrit son nom. De ce cadre est relié l'ensemble des sous-routines dans l'ordre chronologique de fonctionnement. En orange est représenté le module principal utilisé. L'appel à un autre module est indiqué par un petit encadré M. Les (+) indiquent un processus en plusieurs étapes.

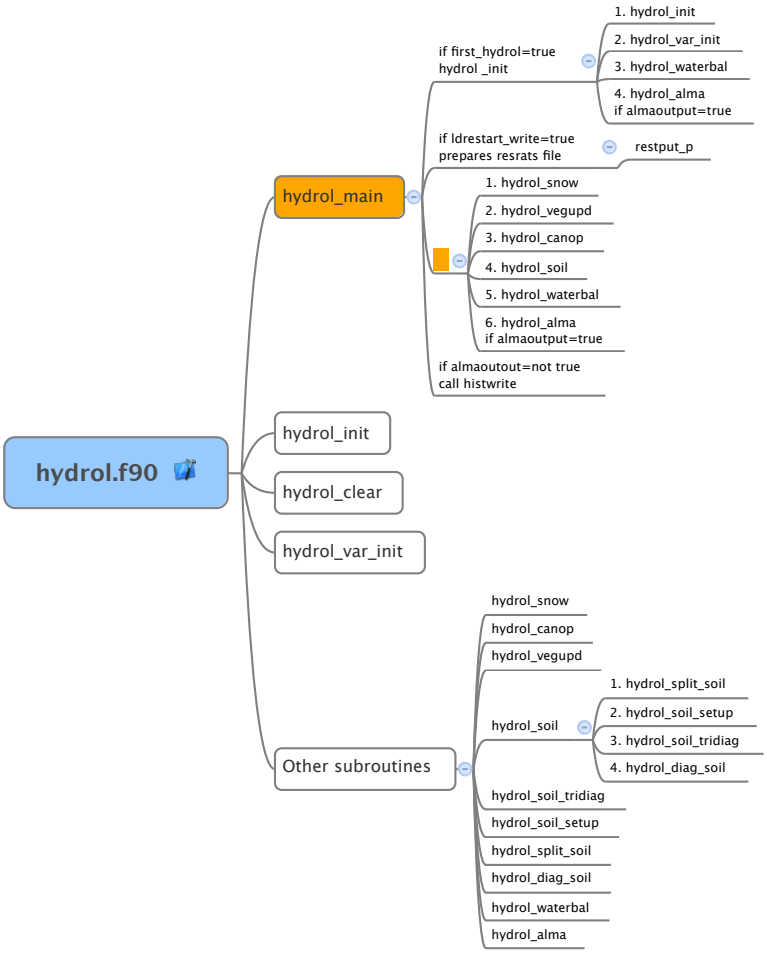


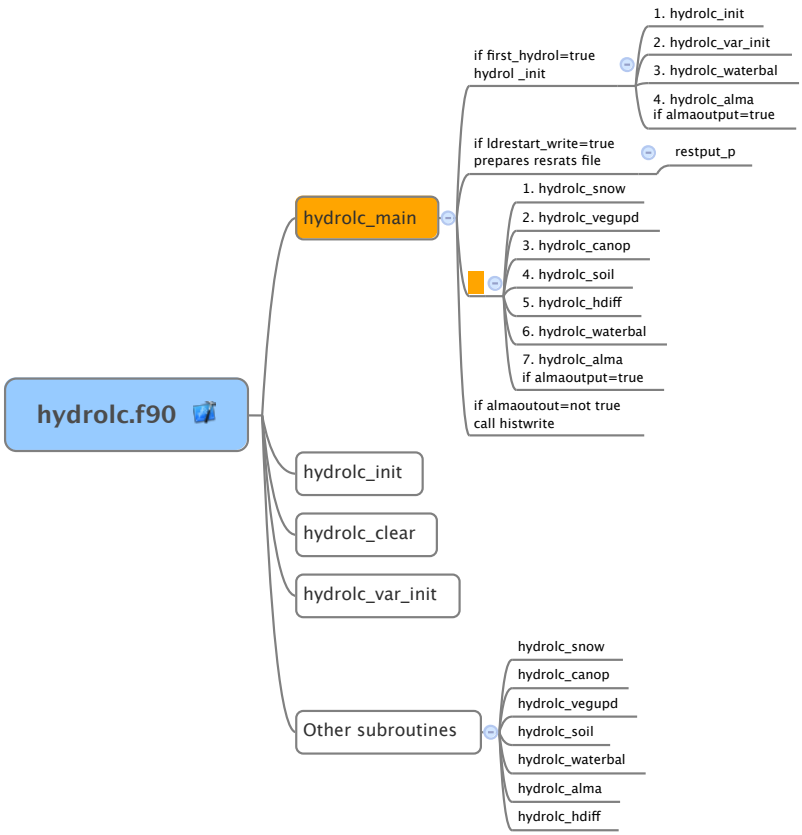
Organigramme de SECHIBA
(appelé par intersurf et qui appelle STOMATE via slowproc.f90)

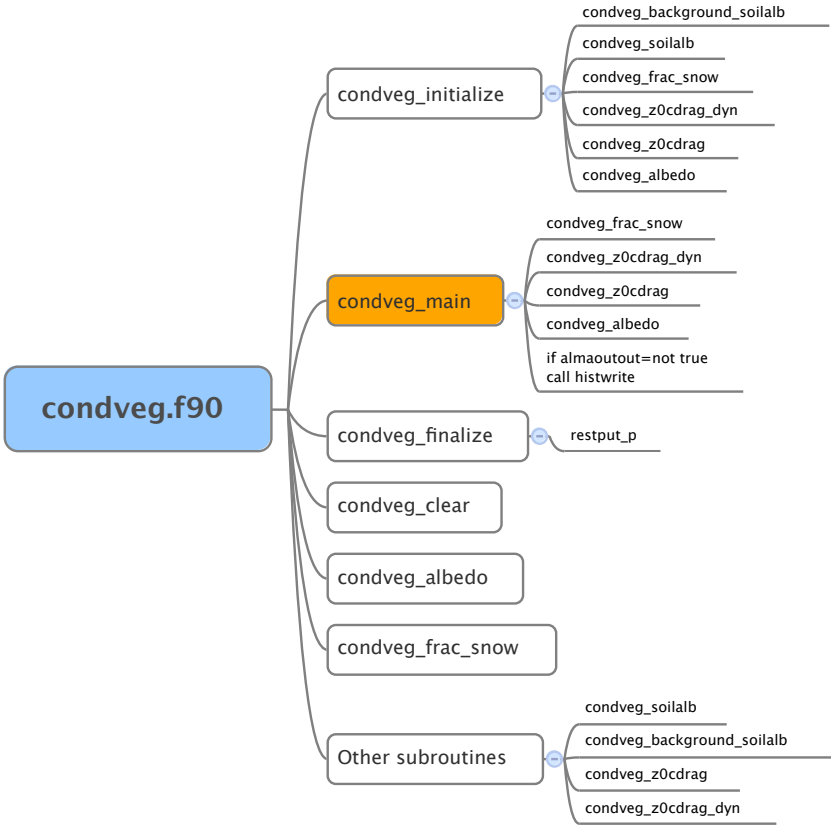


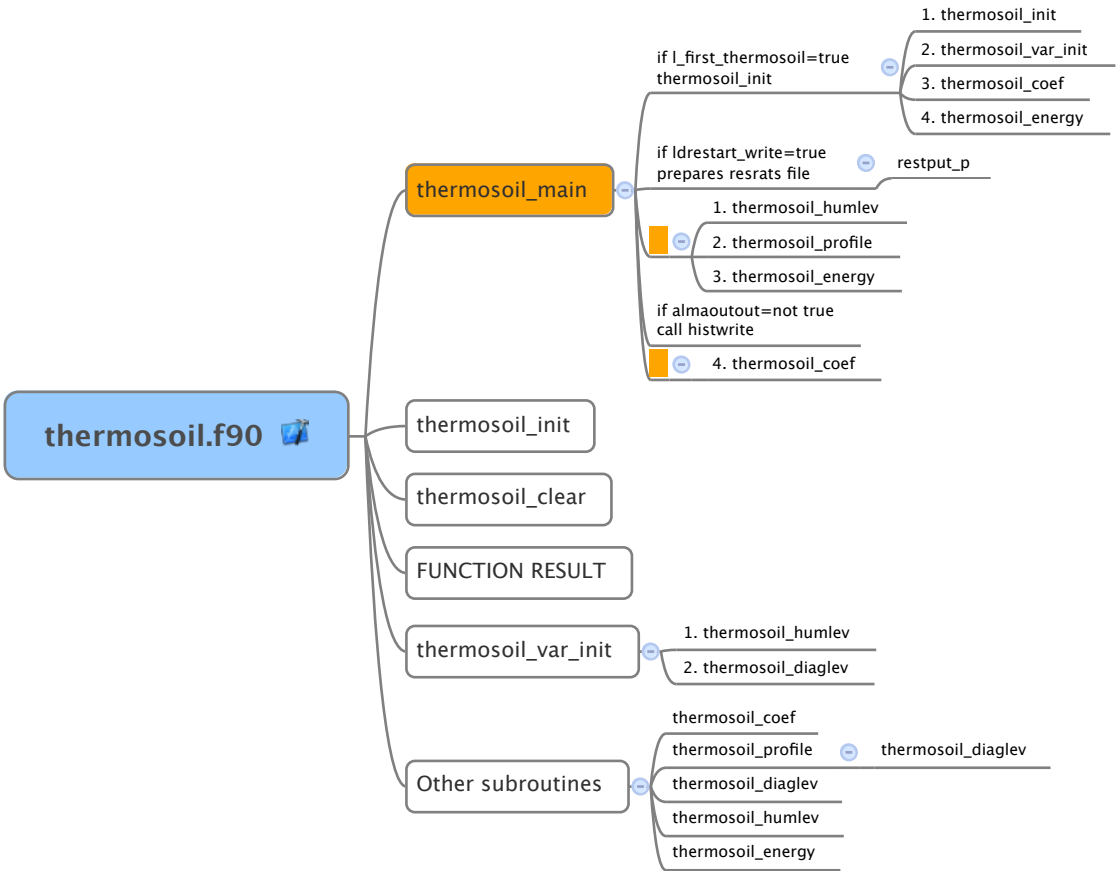

diffuco.f90
diffuco_main
if l_first_diffuco=true
diffuco_init
diffuco_init
diffuco_clear
if ldrestart_write=true
prepares resrats file
restput_p
0. diffuco_aero
1. diffuco_raerod
2. qsatcalc
3. diffuco_snow
4. diffuco_inter
5. diffuco_bare
6. diffuco_trans_co2 ou diffuco_trans
7. diffuco_comb
if almaoutout=not true
call histwrite
diffuco_init
diffuco_clear
Other subroutines
diffuco_aero
diffuco_snow
diffuco_inter
diffuco_bare
qsatcalc
qsfrict_init
diffuco_trans
diffuco_trans_co2
qsatcalc
qsfrict_init
diffuco_comb
qsatcalc
qsfrict_init
diffuco_raerod

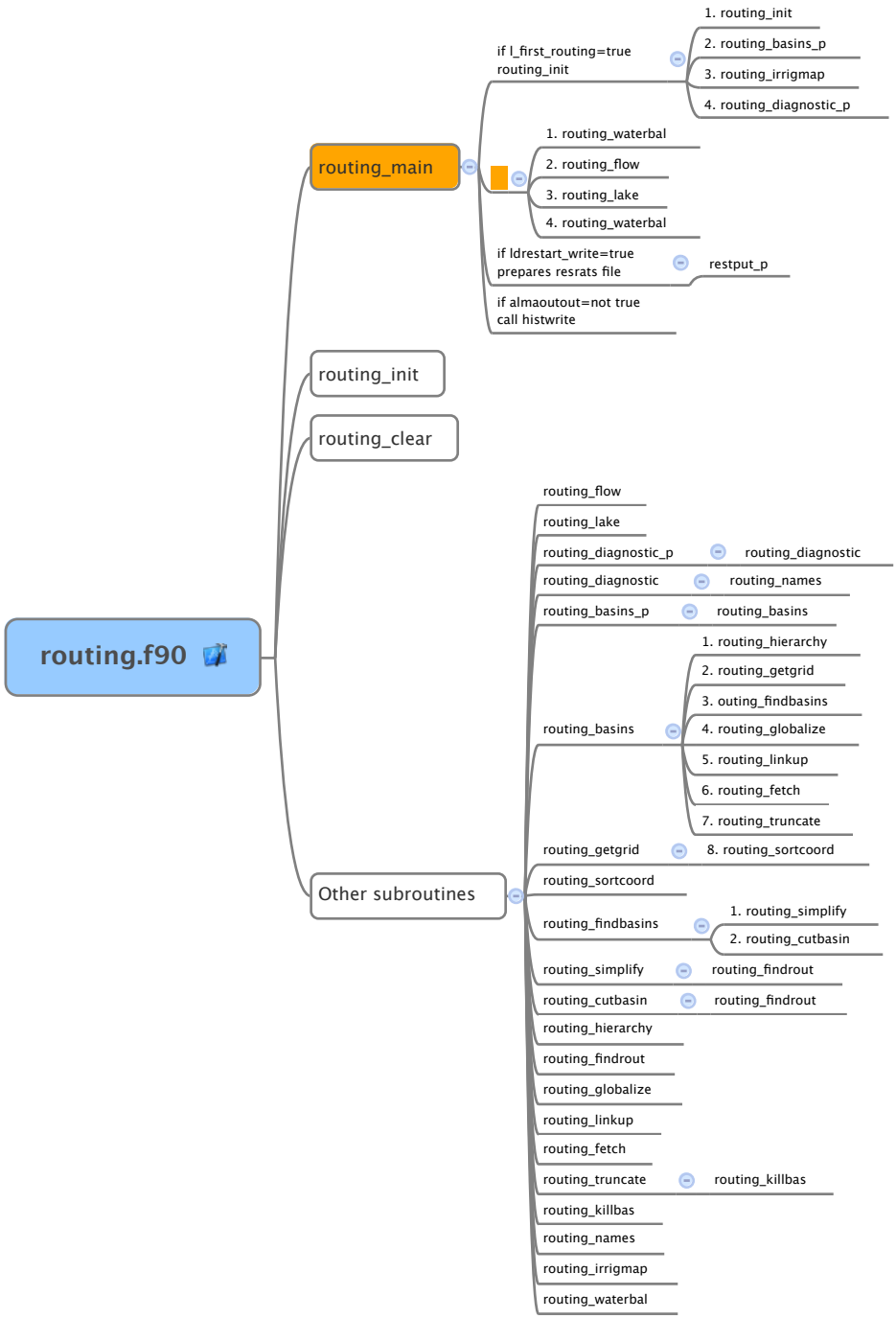

enerbil.f90
enerbil_main
si l_first_enerbil=true
enerbil_init
1. enerbil_init
2. enerbil_var_init
if ldrestart_write=true
prepares resrats file
restput_p
1. enerbil_begin
2. enerbil_surftemp
3. enerbil_flux
4. enerbil_evapveg
5. enerbil_t2mdiag
if almaoutout=not true
call histwrite
enerbil_init
enerbil_clear
enerbil_var_init
enerbil_t2mdiag
Other subroutines
enerbil_begin
dev_qsatcalc
qsfrict_init
enerbil_surftemp
enerbil_flux
qsatcalc
qsfrict_init
dev_qsatcalc
qsfrict_init
enerbil_evapveg
enerbil_fusion
enerbil_t2mdiag

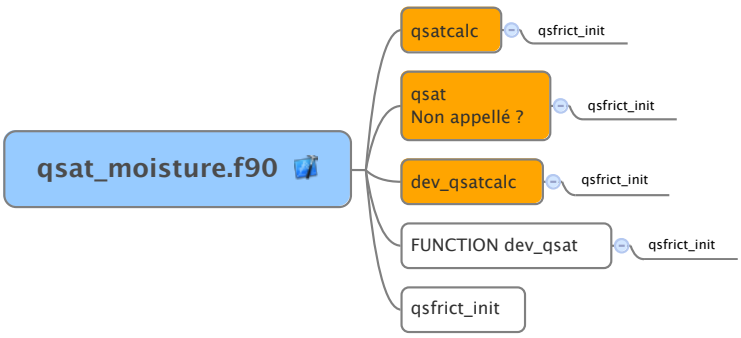

hydrol.f90
hydrol_main
if first_hydrol=true
hydrol _init
1. hydrol_init
2. hydrol_var_init
3. hydrol_waterbal
4. hydrol_alma
if almaoutput=true
if ldrestart_write=true
prepares resrats file
restput_p
1. hydrol_snow
2. hydrol_vegupd
3. hydrol_canop
4. hydrol_soil
5. hydrol_waterbal
6. hydrol_alma
if almaoutput=true
if almaoutout=not true
call histwrite
hydrol_init
hydrol_clear
hydrol_var_init
Other subroutines
hydrol_snow
hydrol_canop
hydrol_vegupd
hydrol_soil
1. hydrol_split_soil
2. hydrol_soil_setup
3. hydrol_soil_tridiag
4. hydrol_diag_soil
hydrol_soil_tridiag
hydrol_soil_setup
hydrol_split_soil
hydrol_diag_soil
hydrol_waterbal
hydrol_alma

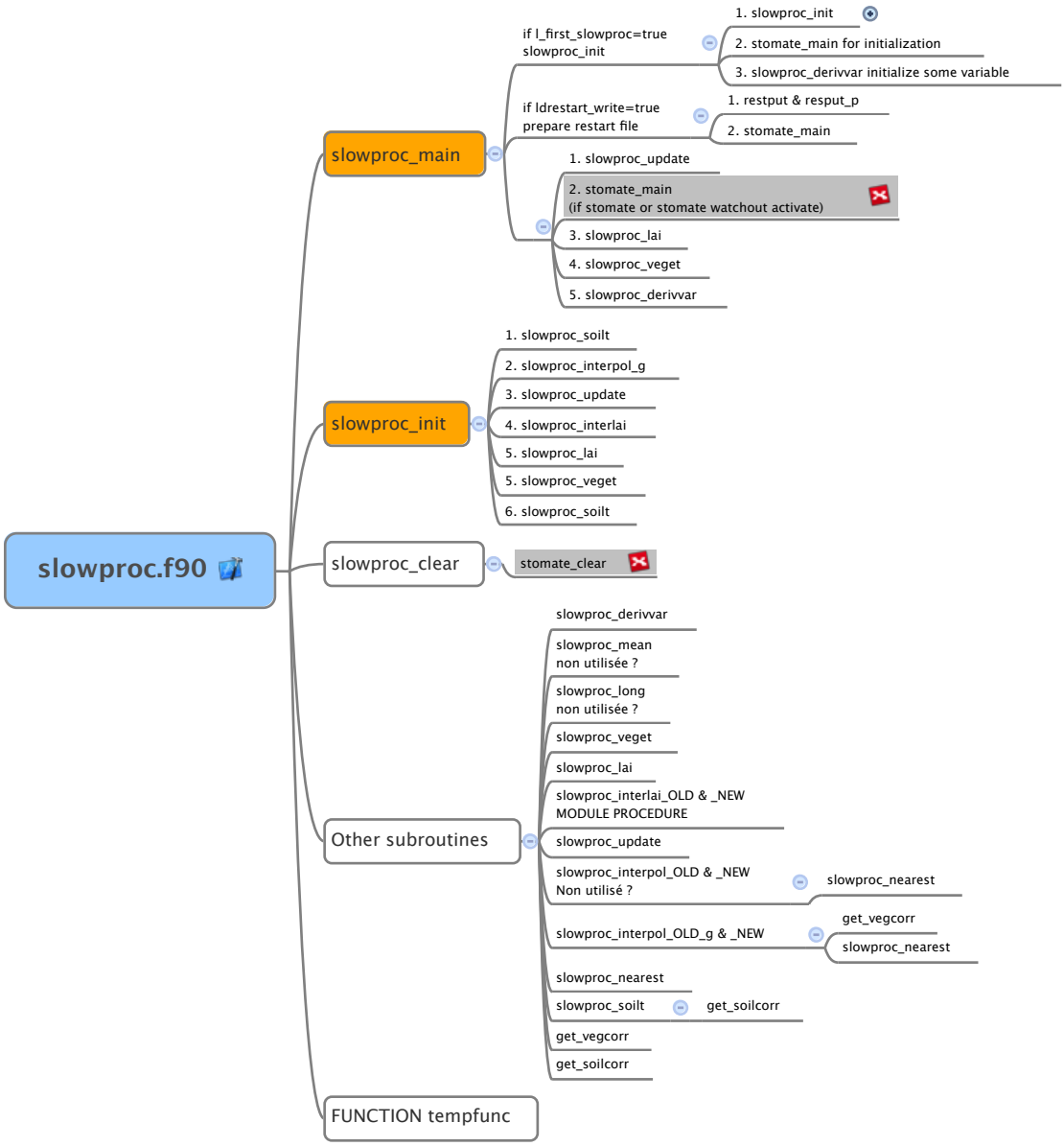

hydrolc.f90
hydrolc_main
if first_hydrol=true
hydrol _init
1. hydrolc_init
2. hydrolc_var_init
3. hydrolc_waterbal
4. hydrolc_alma
if almaoutput=true
if ldrestart_write=true
prepares resrats file
restput_p
1. hydrolc_snow
2. hydrolc_vegupd
3. hydrolc_canop
4. hydrolc_soil
5. hydrolc_hdiff
6. hydrolc_waterbal
7. hydrolc_alma
if almaoutput=true
if almaoutout=not true
call histwrite
hydrolc_init
hydrolc_clear
hydrolc_var_init
Other subroutines
hydrolc_snow
hydrolc_canop
hydrolc_vegupd
hydrolc_soil
hydrolc_waterbal
hydrolc_alma
hydrolc_hdiff


condveg.f90
condveg_initialize
condveg_background_soilalb
condveg_soilalb
condveg_frac_snow
condveg_z0cdrag_dyn
condveg_z0cdrag
condveg_albedo
condveg_main
condveg_frac_snow
condveg_z0cdrag_dyn
condveg_z0cdrag
condveg_albedo
if almaoutout=not true
call histwrite
condveg_finalize
restput_p
condveg_clear
condveg_albedo
condveg_frac_snow
Other subroutines
condveg_soilalb
condveg_background_soilalb
condveg_z0cdrag
condveg_z0cdrag_dyn


thermosoil.f90
thermosoil_main
if l_first_thermosoil=true
thermosoil_init
1. thermosoil_init
2. thermosoil_var_init
3. thermosoil_coef
4. thermosoil_energy
if ldrestart_write=true
prepares resrats file
restput_p
1. thermosoil_humlev
2. thermosoil_profile
3. thermosoil_energy
if almaoutout=not true
call histwrite
4. thermosoil_coef
thermosoil_init
thermosoil_clear
FUNCTION RESULT
thermosoil_var_init
1. thermosoil_humlev
2. thermosoil_diaglev
Other subroutines
thermosoil_coef
thermosoil_profile
thermosoil_diaglev
thermosoil_diaglev
thermosoil_humlev
thermosoil_energy

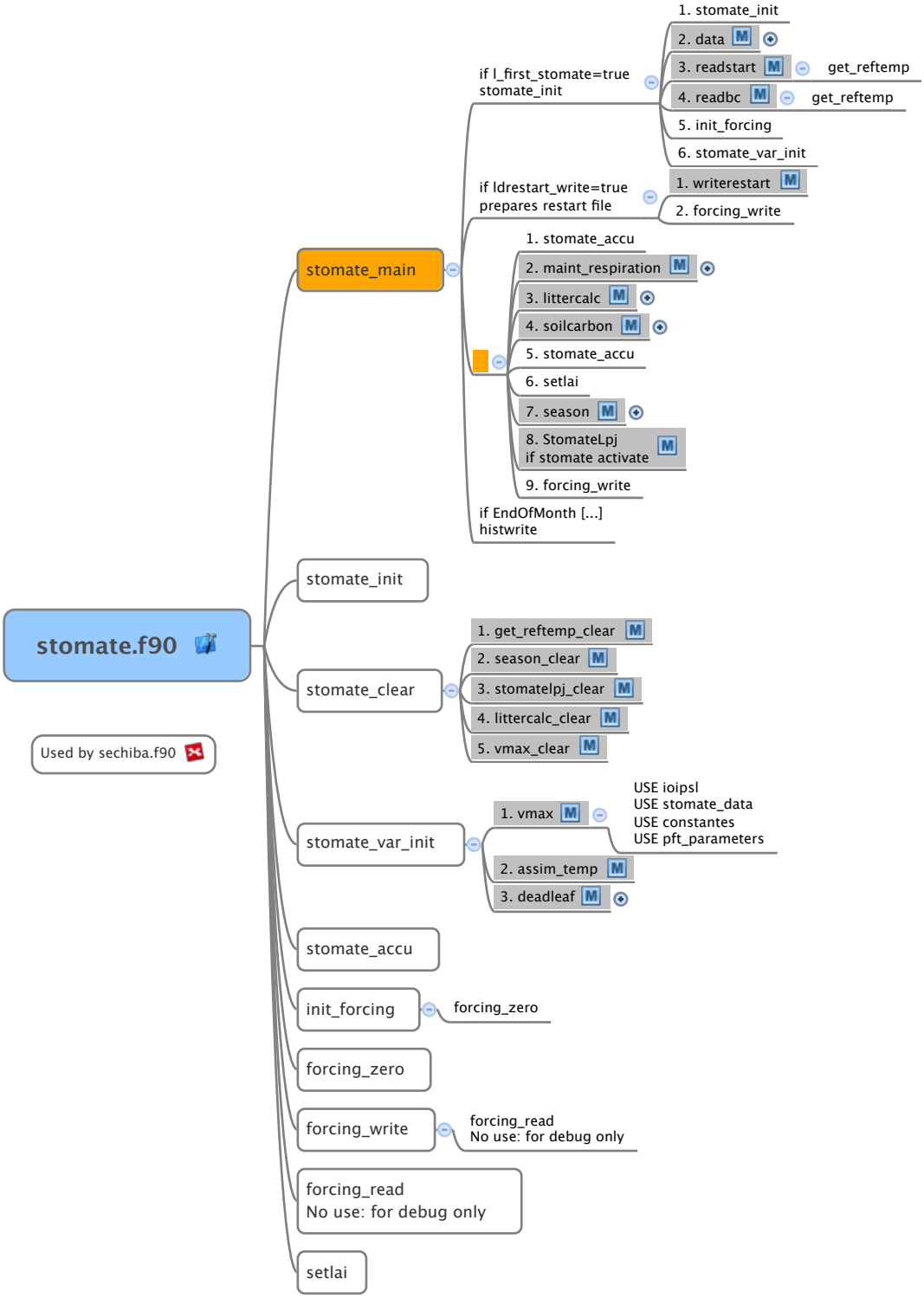

routing.f90
routing_main
if l_first_routing=true
routing_init
1. routing_init
2. routing_basins_p
3. routing_irrigmap
4. routing_diagnostic_p
1. routing_waterbal
2. routing_flow
3. routing_lake
4. routing_waterbal
if ldrestart_write=true
prepares resrats file
restput_p
if almaoutout=not true
call histwrite
routing_init
routing_clear
Other subroutines
routing_flow
routing_lake
routing_diagnostic_p
routing_diagnostic
routing_diagnostic
routing_names
routing_basins_p
routing_basins
routing_basins
1. routing_hierarchy
2. routing_getgrid
3. outing_findbasins
4. routing_globalize
5. routing_linkup
6. routing_fetch
7. routing_truncate
routing_getgrid
8. routing_sortcoord
routing_sortcoord
routing_findbasins
1. routing_simplify
2. routing_cutbasin
routing_simplify
routing_findrout
routing_cutbasin
routing_findrout
routing_hierarchy
routing_findrout
routing_globalize
routing_linkup
routing_fetch
routing_truncate
routing_killbas
routing_killbas
routing_names
routing_irrigmap
routing_waterbal

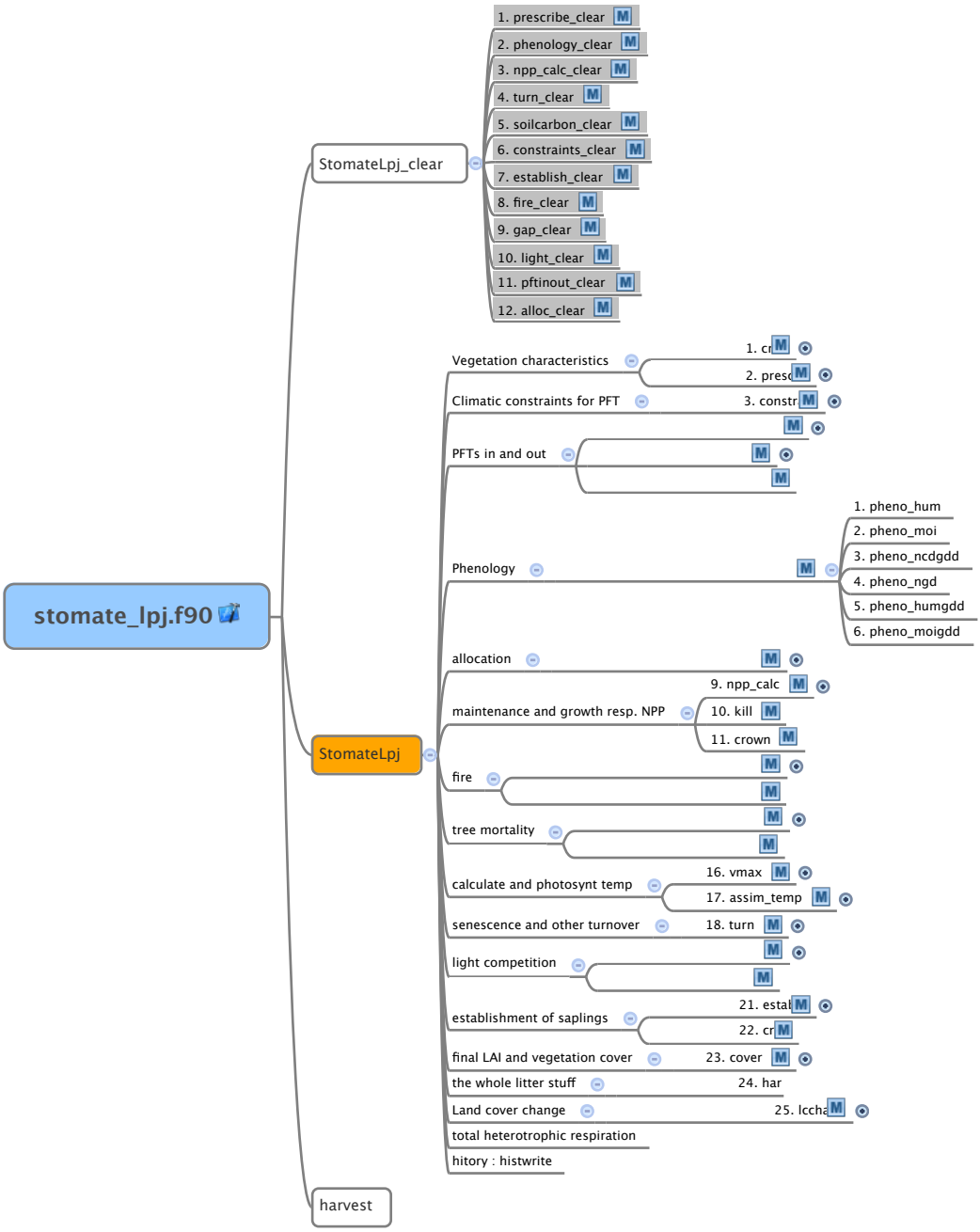

qsat_moisture.f90
qsatcalc
qsfrict_init
qsat
Non appellé ?
qsfrict_init
dev_qsatcalc
qsfrict_init
FUNCTION dev_qsat
qsfrict_init
qsfrict_init


slowproc.f90
slowproc_main
if l_first_slowproc=true
slowproc_init
1. slowproc_init
2. stomate_main for initialization
3. slowproc_derivvar initialize some variable
if ldrestart_write=true
prepare restart file
1. restput & resput_p
2. stomate_main
1. slowproc_update
2. stomate_main
(if stomate or stomate watchout activate)
3. slowproc_lai
4. slowproc_veget
5. slowproc_derivvar
slowproc_init
1. slowproc_soilt
2. slowproc_interpol_g
3. slowproc_update
4. slowproc_interlai
5. slowproc_lai
5. slowproc_veget
6. slowproc_soilt
slowproc_clear
stomate_clear
Other subroutines
slowproc_derivvar
slowproc_mean
non utilisée ?
slowproc_long
non utilisée ?
slowproc_veget
slowproc_lai
slowproc_interlai_OLD & _NEW
MODULE PROCEDURE
slowproc_update
slowproc_interpol_OLD & _NEW
Non utilisé ?
slowproc_nearest
slowproc_interpol_OLD_g & _NEW
get_vegcorr
slowproc_nearest
slowproc_nearest
slowproc_soilt
get_soilcorr
get_vegcorr
get_soilcorr
FUNCTION tempfunc

Organigramme de STOMATE (appelé par SECHIBA via slowproc.f90)

Dans cette partie, tous les modules ne seront pas décrits, leur contenu étant standardisé : ils contiennent « clear » (pour effacer les variables de la mémoire) et « main routine » (la routine principale).




stomate_lpj.f90
StomateLpj_clear
1. prescribe_clear
2. phenology_clear
3. npp_calc_clear
4. turn_clear
5. soilcarbon_clear
6. constraints_clear
7. establish_clear
8. fire_clear
9. gap_clear
10. light_clear
11. pftinout_clear
12. alloc_clear
StomateLpj
Vegetation characteristics
Climatic constraints for PFT
PFTs in and out
Phenology
1. pheno_hum
2. pheno_moi
3. pheno_ncdgdd
4. pheno_ngd
5. pheno_humgdd
6. pheno_moigdd
allocation
9. npp_calc
maintenance and growth resp. NPP
10. kill
11. crown
fire
tree mortality
calculate and photosynt temp
16. vmax
17. assim_temp
senescence and other turnover
18. turn
light competition
establishment of saplings
final LAI and vegetation cover
23. cover
the whole litter stuff
24. har
Land cover change
total heterotrophic respiration
hitory : histwrite
harvest

ANNEXE C.

Résumé des données de Sibérie par site et par année

Légende : NB : nombre de données, biomasses (gC.m^{-2}), NPP : productivité primaire nette (gC.m^{-2}.an^{-1}), Moy : moyenne, ET : écart-type lat : latitude (°N), lon : longitude (°E), ZC : zone climatique, NA : pas de valeur

Biomasses et productivités des NVPs par site, avec les coordonnées et zone climatique associées

Site	NB	Biomasse		NPP		Coordonnées		
		Moy	ET	Moy	ET	Lat	Lon	ZC
1	85	226.6	139.7	117.4	106.8	55.2	79.1	Forest-steppe
2	3	146.0	79.5	54.8	26.3	55.3	79.7	Forest-steppe
3	20	195.8	67.2	90.1	30.7	55.4	79.1	Forest-steppe
4	4	212.5	111.3	95.1	41.7	55.6	79.6	Forest-steppe
5	24	217.3	92.3	124.4	58.2	56.9	82.8	South Taiga
6	2	131.3	11.7	68.0	26.9	56.9	78.6	South Taiga
7	6	191.6	50.9	128.4	56.1	57.0	80.0	South Taiga
8	4	177.1	54.0	144.3	44.1	60.3	90.2	Central Siberia
9	7	188.4	42.1	64.7	22.0	60.9	63.5	Middle Taiga
10	27	296.8	99.0	133.0	52.7	60.9	68.7	Middle Taiga
11	21	304.1	153.7	129.5	67.4	60.9	68.7	Middle Taiga
12	81	233.9	78.4	144.2	51.5	60.9	76.7	Middle Taiga
13	99	188.2	86.9	97.7	51.3	61.0	70.2	Middle Taiga
14	7	172.8	70.6	115.0	51.0	61.0	76.0	Middle Taiga
15	45	175.5	82.9	94.2	46.8	61.1	69.5	Middle Taiga
16	17	173.1	65.8	93.2	25.8	61.4	73.3	Middle Taiga
17	8	139.1	84.2	77.0	52.0	62.2	74.1	Middle Taiga
18	5	224.3	29.5	141.1	23.0	62.3	75.5	North Taiga
19	23	246.7	64.9	87.2	19.5	62.7	81.9	North Taiga
20	93	167.5	82.5	101.4	54.1	63.0	75.2	North Taiga
21	13	262.7	85.3	145.2	31.9	63.1	76.9	North Taiga
22	75	213.0	137.1	120.6	63.8	63.2	75.7	North Taiga
23	194	211.3	70.6	146.2	50.7	63.3	75.5	North Taiga
24	39	272.4	107.7	130.1	42.9	63.3	75.4	North Taiga
25	12	154.7	35.8	60.3	18.6	64.6	77.0	North Taiga
26	2	237.8	129.0	135.5	84.1	64.7	75.4	North Taiga
27	4	200.8	30.6	78.8	14.9	65.8	75.2	Forest-tundra (Tundra)
28	30	228.0	104.0	95.3	45.7	65.8	75.4	Forest-tundra
29	146	247.4	126.6	120.4	62.3	65.9	75.0	Forest-tundra
30	25	215.7	119.9	97.2	52.6	65.9	80.2	Forest-tundra
31	6	299.3	105.2	139.0	50.5	66.3	73.9	Forest-tundra
32	9	294.9	65.9	137.6	51.7	66.3	73.9	Forest-tundra/Tundra
33	15	208.0	93.0	95.9	66.9	66.6	73.8	Tundra
34	3	337.7	128.3	141.7	23.6	67.5	78.7	Tundra
35	5	147.2	59.5	78.2	33.5	70.9	78.5	Forest-tundra/Tundra
36	20	175.5	77.8	81.1	43.2	70.9	78.6	Tundra

Biomasses et productivités des NVPs par année

Année	NB	Biomasse		NPP	
		Moy	ET	Moy	ET
1995	1	105.5	NA	30.5	NA
1997	22	218.2	79.5	141.0	60.5
1998	12	151.8	103.2	108.1	41.8
1999	108	169.1	67.2	115.9	42.1
2000	126	180.8	60.4	113.1	38.2
2001	148	243.9	72.7	160.8	54.2
2002	28	221.0	80.5	142.1	60.3
2003	1	106.5	NA	55.0	NA
2004	52	218.0	132.1	126.4	72.8
2005	108	206.3	100.0	112.2	53.4
2006	135	224.1	90.3	97.7	40.6
2007	56	216.2	94.4	92.6	44.4
2008	82	203.5	115.3	88.6	55.3
2009	71	189.3	81.0	85.6	38.9
2010	122	275.4	122.1	123.5	57.5
2011	61	272.0	138.9	123.3	63.2
2012	11	277.5	210.8	143.6	109.6
2013	63	200.3	141.6	119.1	120.9

Biomasses et productivités des herbacées et des buissons par site

Site	NB	Herbacées				Buissons			
		Biomasse		Écart Type		Biomasse		Écart Type	
1	29	1314.3	854.3	626.8	392.0	911.4	325.4	160.0	81.2
2	1					922.8	NA	101.1	NA
3	2					874.4	144.3	147.7	53.4
4	1					773.7	NA	183.8	NA
5	15	506.6	416.3	226.0	62.9	832.0	381.8	190.5	62.8
6	10	567.9	382.8	266.2	231.7	1424.5	569.8	277.0	24.3
10	42	739.4	227.6	483.3	106.4	471.4	277.9	114.8	63.3
12	167	411.7	105.9	289.3	102.1	653.8	366.9	120.1	89.9
13	113	496.2	245.6	287.0	157.9	779.1	298.6	201.0	87.9
15	30	344.8	70.0	346.6	113.8	866.5	380.5	268.8	105.6
16	15					865.6	169.8	171.5	34.4
20	75	654.0	180.8	329.2	123.2	1126.7	488.3	255.4	107.1
22	46	522.0	243.3	358.2	281.6	626.2	273.5	129.3	58.2
24	13	352.8	149.0	187.9	44.1	734.4	90.5	139.3	55.9
28	4	961.9	317.0	750.2	263.3				
29	97	260.4	169.6	186.8	126.9	858.2	605.3	155.4	118.6

Biomasses et productivités des NVPs par site, avec coordonnées, nom et zone climatique associées

Site	Plantes non vasculaire				Coordonnées		Nom	ZC
	Moy	ET	Moy	ET	Lat	Lon		
1	364.6	194.6	100.0	53.1	55.2	79.1	Nikolaevka	Forest steppe
2	1.6	NA	43.2	NA	55.3	79.7	Ubinsky ryam	Forest steppe
3	88.3	99.9	35.5	42.8	55.4	79.1	Koschurla	Forest steppe
4	4.9	NA	1.1	NA	55.6	79.6	Novoborodinsky	Forest steppe
5	424.0	180.7	96.9	45.3	56.9	82.8	Plotnikovo	South taiga
6	303.1	46.0	81.3	18.9	56.9	78.6	Verkh-Tarskoe	South taiga
10	409.5	185.0	118.5	70.6	60.9	68.7	Mukhrino	Middle Taiga
12	277.4	117.5	117.7	50.0	60.9	76.7	Savkino	Middle Taiga
13	277.9	134.7	105.0	56.6	61.0	70.2	Kukushkino	Middle Taiga
15	300.5	83.5	104.9	42.9	61.1	69.5	Shapsha (Tchistoe)	Middle Taiga
16	252.9	67.1	109.8	38.2	61.4	73.3	Surgut	Middle Taiga
20	316.6	340.0	112.5	106.5	63.0	75.2	Pogranichnoe	North Taiga
22	416.8	270.9	129.6	84.0	63.2	75.7	Tetu-Mamontotyai	North Taiga
24	602.6	299.1	183.8	68.8	63.3	75.4	Zapadno-Noyabrskyi	North Taiga
28	421.1	60.4	133.1	22.5	65.8	75.4	Yamsovey	Forest tundra
29	303.6	166.5	75.9	64.7	65.9	75.0	Pangody	Forest tundra

Biomasses et productivités des herbacées, buissons et NVPs par année

Année	NB	Herbacée				Buissons				NVPs			
		Biomasse		NPP		Biomasse		NPP		Biomasse		NPP	
		Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET	Moy	ET
1999	60	625.9	139.5	287.4	109.3	1173.0	404.7	261.9	95.4	300.1	206.8	109.3	59.7
2000	92	585.5	212.4	392.8	80.3	727.8	416.8	161.6	112.0	261.3	144.3	103.7	48.6
2001	111	355.5	88.6	226.1	74.8	624.5	370.3	98.4	64.9	287.8	93.5	121.0	50.8
2003	11					920.9	455.0	302.5	129.9	338.8	92.4	96.2	40.5
2004	80	374.2	205.4	228.1	134.6	918.6	511.0	232.1	89.9	290.3	158.8	109.7	60.4
2005	81	427.8	266.3	267.0	172.1	742.4	444.3	168.8	95.7	283.0	136.2	86.1	56.8
2006	29	535.4	299.9	324.3	163.5	906.5	354.5	195.4	113.7	280.6	99.5	93.8	46.9
2007	16	495.1	334.7	280.6	156.3	945.8	599.5	284.4	161.8	235.5	153.8	67.1	50.9
2008	3					826.9	83.2	151.3	44.1	117.5	197.9	41.4	39.5
2009	35	746.6	735.9	504.8	352.3	575.2	348.3	111.5	59.0	320.7	163.6	69.5	46.8
2010	74	741.7	634.3	379.6	297.5	723.0	398.8	143.5	66.4	508.8	345.9	143.6	112.5
2011	49	943.9	793.6	481.3	392.7	722.8	330.1	148.1	72.3	340.5	163.2	108.4	67.0
2012	12	498.1	291.9	387.6	148.4	728.5	555.5	110.0	63.9	508.6	338.7	199.1	86.2
2013	7	1133.0	172.3	746.7	345.8	866.3	404.7	158.6	84.7	353.4	191.5	92.4	40.8

ANNEXE D.

« Cross walking table » utilisée pour l'obtention de la carte de végétation avec les nouveaux PFTs

ID	CCI ESA Land Cover Class Description	Trees				Shrub				Herbaceous		NVPs	Non-vegetated				
		BE	BD	NE	ND	BE	BD	NE	ND	Natural	Crops		Bare soil	Water	Snow/Ice	Urban	No data
0	No data																100
10	Cropland, rainfed										100						
11	Herbaceous cover										100						
12	Tree or shrub cover						50				50						
20	Cropland, irrigated or post-flooding										100						
30	Mosaic cropland (>50%) / natural vegetation (<50%)	5	5			5	5	5		15	60						
40	Mosaic natural vegetation (>50%) / cropland (<50%)	5	5			7.5	10	7.5		25	40						
50	Tree cover, broadleaved, evergreen, closed to open (>15%)	90				5	5										
60	Tree cover, broadleaved, deciduous, closed to open (>15%)		50				20			30							
61	Tree cover, broadleaved, deciduous, closed (>40%)		70				15			15							
62	Tree cover, broadleaved, deciduous, open (15-40%)		30				25			45							
70	Tree cover, needleleaved, evergreen, closed to open (>15%)			50		2.5	2.5	15		30							
71	Tree cover, needleleaved, evergreen, closed (>40%)			70		5	5	5		15							
72	Tree cover, needleleaved, evergreen, open (15-40%)			30				25		45							
80	Tree cover, needleleaved, deciduous, closed to open (>15%)				50	2.5	2.5	2.5	12.5	30							
81	Tree cover, needleleaved, deciduous, closed (>40%)				70	5	5	5		15							

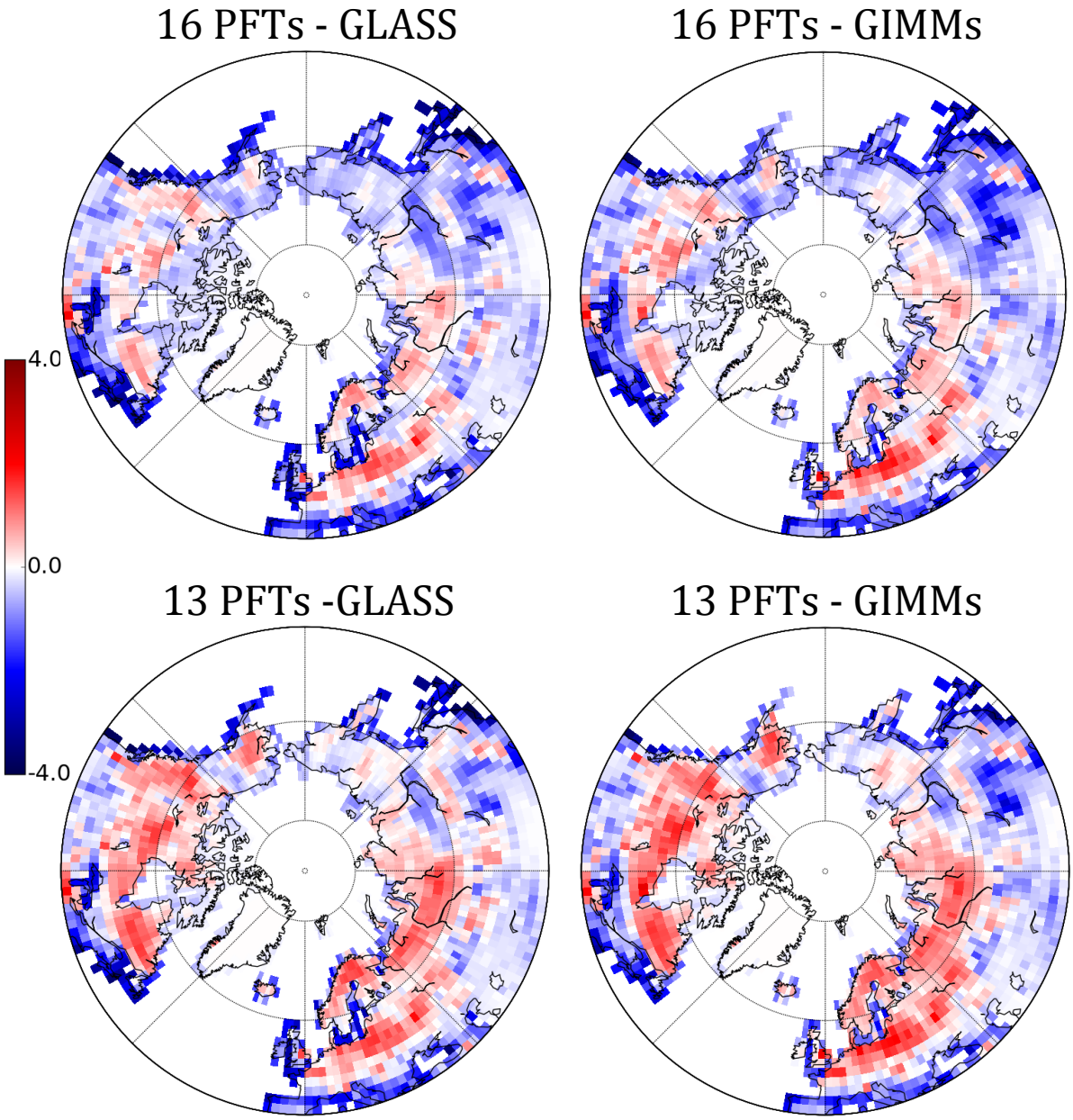
82	Tree cover, needleleaved, deciduous, open (15-40%)				30				25	45					
90	Tree cover, mixed leaf type (broadleaved and needleleaved)		30	20	10	5	5	5		25					
100	Mosaic tree and shrub (>50%) / herbaceous cover (<50%)	**7**	**15**	**4**	**5**	**8**	**15**	**6**		40					
110	Mosaic herbaceous cover (>50%) / tree and shrub (<50%)	**4**	**7**	**4**		**6**	**13**	**6**		60					
120	Shrubland					15	30	15		40					
121	Shrubland evergreen					30		30		40					
122	Shrubland deciduous						60			40					
130	Grassland									100					
140	Lichens and mosses									**10**	**70**	**20**			
150	Sparse vegetation (tree, shrub, herbaceous cover) (<15%)		4.7	4.7	3.1		4.7	4.7	3.1	**10.0**	**45.0**	**20.0**			
151	Sparse tree (<15%)		9.4	9.4	6.2					**10.0**	**45.0**	**20.0**			
152	Sparse shrub (<15%)						7.5	7.5	5.0	**15.0**	**45.0**	**20.0**			
153	Sparse herbaceous cover (<15%)									**35.0**	**45.0**	**20.0**			
160	Tree cover, flooded, fresh or brakish water	37.5	37.5							25					
170	Tree cover, flooded, saline water	75				25									
180	Shrub or herbaceous cover, flooded, fresh/saline/brakish water						25	15		**30**	**30**				
190	Urban areas														100
200	Bare areas											100			
201	Consolidated bare areas											100			
202	Unconsolidated bare areas											100			
210	Water bodies												100		
220	Permanent snow and ice													100	

BE : Broadleaf Evergreen, BD : Broadleaf Deciduous, NE : Needleleaf Evergreen and ND : Needleleaf Deciduous.
En gras : les valeurs modifiées pour l'introduction de la nouvelle végétation

ANNEXE E.

Comparaison des LAI simulés hors DGVM (dans OCR2.0) avec les produits GLASS et GIMMS

Cartes de différences de LAI des régions boréales en été (moyenne entre juillet, août et septembre de 2004 à 2013) entre les simulations « ORC » avec soit les nouveaux PFTs boréaux (16PFTs) soit les PFTs standards (13 PFTs) et les produits issues d'observation satellite GLASS ou GIMMs (Zhu et al., 2013).



ANNEXE F.

Bilan hydrique au-dessus de 65°N, sur toutes les latitudes (avec la végétation dynamique)

Valeur moyenne de l'eau provenant de l'atmosphère (pluie et neige) issue des fichiers de forçage correspondant aux simulations (cf. Tableau 7), des sorties simulées correspondantes et de l'évolution du réservoir de neige (en mm.m^{-2}.j^{-1}), au-dessus de 65°N et comprenant le Groenland.

Simulations	DVGM		DVGM4.5		DVGM8.5	
Pluie	0,447		0,539		0,647	
Neige	0,507		0,513		0,512	
Total	0,954		1,052		1,159	
	13 PFTs	16PFTS	13 PFTs	16PFTS	13 PFTs	16PFTS
Ruissellement	0,231	0,232	0,341	0,338	0,445	0,445
Drainage	0,120	0,102	0,108	0,103	0,115	0,116
Évaporation	0,516	0,546	0,547	0,553	0,583	0,582
Neige (stock)	0,104	0,104	0,086	0,086	0,043	-0,331
Total	0,971	0,984	1,082	1,067	1,186	0,812