

Multi-model investigations of the biogeophysical effects of historical and future land-cover changes on climate

Doctoral Thesis

Author(s):

Lejeune, Quentin

Publication date:

2016

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010877806>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS ETH NO. 23798

**Multi-model investigations of the biogeophysical effects
of historical and future land-cover changes on climate**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
Quentin Lejeune

MSc Earth Sciences, Université Claude Bernard Lyon 1

born on 18.01.1990
citizen of France

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Sonia I. Seneviratne
Dr. Edouard L. Davin
Prof. Dr. Victor Brovkin

2016

Abstract

Vegetation plays an important role in the climate system by determining the biogeophysical properties of the land surface, such as its albedo, emissivity, evapotranspiration rate and roughness length. Since these properties depend on the plant type, their modifications through human-induced land-cover changes (LCC) affect the surface energy budget and the water cycle, and can therefore lead to changes in climate conditions. However, some questions are still unresolved regarding the overall biogeophysical effect of LCC on climate, due to the many mechanisms at play and their geographically-varying nature. This explains for example the high uncertainties regarding the climatic effect of the expansion of agricultural areas which occurred at the expense of forests over the northern mid-latitudes during the industrial period, or of the deforestation that is projected to occur in the future over tropical areas, especially in the Amazon Basin.

The aim of this thesis is thus to reduce these uncertainties. To achieve this goal, I primarily base my analyses on simulations run by recent climate models, which include state-of-the-art land surface models representing the energy and water fluxes at the land-atmosphere interface. Emphasis is put on comparing the results from multiple models, so as to assess the robustness of their overall conclusions. Moreover, I also confront these model findings with observational evidence of the effect of deforestation on climate in order to identify their most realistic aspects.

In Chapters 2 and 3 of this thesis, I look at how the LCC that have occurred during the industrial period over the northern mid-latitudes (mainly North America, northern Eurasia and South Asia) have locally modified surface air temperature. To do so, I adapt a recently introduced statistical method which aims to extract the climate impact from the LCC forcing in simulations where other climate forcings are also imposed. In Chapter 2, I first demonstrate the suitability of this reconstruction method to study the local impacts of LCC on albedo, the latent heat flux and surface air temper-

ature, and show that it gives very similar results to the factorial experiment approach that is traditionally employed, even if it tends to underestimate them.

This method is then applied to numerical climate simulations from about 1850 until today from 17 recent global climate models part of the LUCID and CMIP5 model intercomparison projects. This analysis shows that a great majority of models agree that historical LCC have led to an increase in albedo, especially under the presence of snow over mid-latitudes, which drove a decrease in temperature in winter in these regions. In contrast, there is less model agreement on the sign of the changes in latent heat flux, and therefore in summer temperature since the evapotranspirative cooling plays a more important role in this season. Overall, the majority of the investigated models indicate that historical LCC led to a summer warming over mid-latitude regions, which contrasts with the results from most previous studies.

A comparison of these model findings with observational evidence of the local effect of deforestation on surface air temperature over North America is also conducted. It reveals that none of the analysed models are able to reproduce the pronounced impact of deforestation on the diurnal cycle of temperature shown by observations. However, overall the more recent CMIP5 models perform better at capturing its warming effect during daytime in the warm season, which suggests a positive effect of recent model developments.

In Chapter 3, I develop on these results and concentrate on the five CMIP5 models that are able to represent the daytime warming effect of deforestation during summer over North America in order to investigate the impact of LCC on extremely warm temperatures. Contrary to most previous modelling studies, this observation-constrained analysis indicates that deforestation has led to substantial local increases in the intensity of daytime hot extremes over many regions in the world, and especially in the northern mid-latitudes. Over the areas of North America and Eurasia where the tree cover has diminished by at least 15% since pre-industrial times, I estimate that the biogeophysical effects of deforestation are responsible for a third of the total warming of the hottest day of the year by present-day, but accounted for most of it before 1980. This underlines the importance of considering LCC for regional-scale detection/attribution purposes, and suggests that future re-/afforestation policies could help locally mitigate hot extremes.

In the following chapter, I examine how possible scenarios of deforestation in the Amazon basin may influence future climate conditions in this region through biogeophysical mechanisms. For this purpose, one control and three perturbed experiments reflecting different levels of deforestation are run with the Regional Climate Model COSMO-CLM coupled to the land surface model CLM. These simulations show that surface air temperature increases over deforested areas because of reduced evapotranspiration, and that this increase is almost proportional to the imposed deforestation rate. Besides, I find that deforestation leads to a reduction in precipitation on average over the

Amazonian region, even if the opposite behaviour is simulated over its eastern part because of an enhanced moisture input from the Atlantic Ocean.

In a second time, these results are compared with those from 28 previous studies that investigated the biogeophysical impacts of Amazon deforestation on the regional climate. This meta-analysis shows that a great majority of the considered experiments agree that surface air temperature will increase and precipitation will decrease in response to deforestation in this region. More recent studies are found to show a similar sensitivity to full deforestation scenarios than older ones (+1.3°C and -0.8 mm/d), but exhibit a lower spread. Overall, based on the current literature I find it rather unlikely that drastic reductions in the rainfall amounts related to the presence of tipping points will occur during the 21st century in response to the biogeophysical effects of deforestation alone, i.e. if the additional effect of global warming is not considered.

In summary, the findings of this thesis confirm the importance of LCC for regional climates. The employed multi-model approach and the confrontation of model results with observational evidence of the effect of deforestation highlight some robust impacts of LCC on climate, but also point out some model deficiencies and remaining uncertainties related to this research topic. More investigation is required to further diminish these uncertainties, for example regarding the more general impact of future LCC in a global warming context. However, I believe that the methodologies employed in this thesis and the obtained results can provide solid direction to address these questions.

Résumé

La végétation joue un rôle important dans le système climatique en déterminant les propriétés biogéophysiques de la surface des continents, telles que son albédo, son émissivité, son taux d'évapotranspiration et sa rugosité. Comme ces propriétés varient selon le type de plante, leurs altérations par des modifications du couvert végétal (MCV) d'origine humaine affectent le bilan énergétique à la surface et le cycle de l'eau, et peuvent donc modifier le climat. Cependant, certaines questions restent non résolues quant à l'effet biogéophysique total des MCV sur le climat, en raison des nombreux mécanismes impliqués et de leur caractère changeant selon les régions. Ceci explique par exemple les larges incertitudes entourant l'impact climatique de l'expansion des surfaces agricoles au détriment des forêts qui a eu lieu sous les latitudes moyennes septentrionales pendant la période industrielle, ou de la déforestation tropicale qui est annoncée pour les prochaines décennies, particulièrement dans le bassin amazonien.

Le but de cette thèse est donc de réduire ces incertitudes. Pour y arriver, je me base essentiellement sur l'analyse de simulations réalisées avec des modèles climatiques récents, qui incluent des modèles de surface terrestre de pointe capables de représenter les flux d'eau et d'énergie à l'interface entre la surface continentale et l'atmosphère. L'accent est mis sur la comparaison des résultats de plusieurs modèles, afin d'évaluer leur robustesse. De plus, ceux-ci sont confrontés à des données d'observation de l'effet de la déforestation sur le climat, pour en identifier les aspects les plus réalistes.

Dans les Chapitres 2 et 3 de cette thèse, j'examine comment les MCV qui ont eu lieu pendant la période industrielle sous les latitudes moyennes septentrionales (principalement en Amérique du Nord, Eurasie du Nord et Asie du Sud) ont localement modifié la température de l'air en surface. Pour cela, j'adapte une méthode développée récemment qui vise à extraire l'impact climatique du forçage dû aux MCV dans des simulations également soumises à d'autres forçages. Dans le Chapitre 2, je démontre premièrement que cette

méthode de reconstruction est appropriée pour étudier les impacts locaux des MCV sur l'albédo, le flux latent et la température de l'air en surface, et montre qu'elle donne des résultats très similaires à ceux de l'analyse par plan factoriel qui est traditionnellement employée, même si elle a tendance à les sous-estimer.

Cette méthode est ensuite appliquée à des simulations numériques représentant le climat d'environ 1850 à nos jours, réalisées par 17 modèles climatiques globaux ayant pris part aux projets d'intercomparaison de modèles LUCID et CMIP5. Il en ressort que selon une grande majorité d'entre eux, les MCV historiques ont mené à une augmentation de l'albédo, en particulier sous les latitudes moyennes en présence de neige, ce qui a conduit à une diminution de température en hiver dans ces régions. Par contre, il y a moins d'unanimité sur le signe de la réponse du flux latent, et donc des températures en été puisque l'effet refroidissant de l'évapotranspiration joue un rôle plus important en cette saison. Au final, la majorité des modèles analysés indique que les MCV historiques ont entraîné un réchauffement en été sous ces latitudes, ce qui contraste avec les résultats de la plupart des études précédentes.

Ces résultats obtenus avec des modèles sont également confrontés avec des observations de l'effet local de la déforestation sur la température de l'air en surface collectées en Amérique du Nord. Ceci révèle qu'aucun des modèles analysés n'est capable de reproduire l'impact prononcé de la déforestation sur le cycle journalier des températures qui est indiqué par les observations. Cependant, globalement les modèles plus récents de CMIP5 sont plus performants pour capturer son effet réchauffant durant la journée pendant la saison chaude, ce qui suggère un effet positif des développements récents des modèles climatiques.

Dans le Chapitre 3, je me base sur ces résultats pour me focaliser sur les cinq modèles CMIP5 qui sont capables de représenter l'effet réchauffant de la déforestation durant la journée et pendant l'été en Amérique du Nord, afin d'étudier l'impact des MCV sur les extrêmes chauds. Contrairement à la plupart des précédentes études basées sur des modèles, cette analyse contrainte par des observations indique que la déforestation a localement amplifié l'intensité des extrêmes chauds pendant la journée dans plusieurs régions du monde, et particulièrement sous les moyennes latitudes septentrionales. Dans les régions d'Amérique du Nord et d'Eurasie où la couverture forestière a diminué d'au moins 15% depuis l'époque pré-industrielle, j'estime que les effets biogéophysiques de la déforestation sont responsables d'un tiers du réchauffement total lors du jour le plus chaud de l'année, mais en expliquaient plus de la moitié avant 1980. Ceci souligne l'importance de considérer les MCV dans les études régionales de détection/attribution, et suggère que de futures politiques de reboisement pourraient aider à atténuer les événements extrêmes chauds.

Dans le chapitre suivant, j'examine comment des scénarios possibles de dé-

forestation dans le bassin amazonien pourrait influencer les futures conditions climatiques de cette région par des mécanismes biogéophysiques. Dans ce but, une simulation de contrôle et trois autres forcées par différents niveaux de déforestation sont réalisées avec le modèle climatique régional COSMO-CLM couplé au modèle de surface terrestre CLM. Ces expériences révèlent que la température de l'air en surface augmente au-dessus des zones déforestées en réponse à une évapotranspiration réduite, et ceci de manière presque proportionnelle au taux de déforestation imposé. En outre, je trouve que la déforestation entraîne une réduction des précipitations en moyenne sur la région amazonienne, même si le comportement contraire est simulé sur sa partie orientale en raison d'un renforcement de l'apport d'humidité depuis l'Océan Atlantique.

Dans un second temps, ces résultats sont comparés avec ceux de 28 études précédentes qui se sont penchées sur les impacts biogéophysiques de la déforestation amazonienne sur le climat régional. Cette méta-analyse montre qu'une grande majorité des expériences considérées convient que la température de l'air en surface va augmenter et que les précipitations vont diminuer en réponse à la déforestation dans cette région. Les études plus récentes indiquent une sensibilité à la déforestation totale similaire aux plus anciennes (+1.3°C et -0.8 mm/jour), mais présentent une dispersion moindre. Globalement, d'après la littérature existante je conclus qu'il est plutôt improbable que des réductions drastiques des pluies liées à l'existence de points de bascule surviennent pendant le XXI^{ème} siècle en réponse aux seuls effets biogéophysiques de la déforestation, c'est-à-dire si l'effet supplémentaire du réchauffement climatique n'est pas pris en compte.

En résumé, les conclusions de cette thèse confirment l'importance des MCV pour le climat régional. L'approche multi-modèle employée et la confrontation de ses résultats avec des données d'observation de l'effet climatique local de la déforestation surlignent certains aspects robustes des impacts des MCV sur le climat, mais attirent également l'attention sur certaines lacunes des modèles ainsi que sur des incertitudes toujours existantes dans ce domaine de recherche. Des travaux plus approfondis seraient nécessaires pour les réduire encore plus, par exemple pour mieux comprendre l'impact plus général des futures MCV dans un contexte de réchauffement climatique global. Cependant, je pense que les méthodologies employées dans cette thèse et les résultats obtenus peuvent fournir des orientations claires pour répondre à ces questions.