



Rapport de stage de fin d'études
AgroParisTech - Université Paris-Saclay

Mars - Septembre 2023

**Évaluation de la modélisation des feux de
biomasses dans différents modèles de climat**

ROUGIER Hugo

Encadrée par :

Bertrand Decharme (DR/CNRS)

Marc Mallet (DR/CNRS)

Table des matières

Introduction	3
1 Les feux de biomasses et leurs émissions	3
1.1 Généralités	3
1.2 Dans le contexte du réchauffement climatique	5
1.3 Les aérosols et leur impact climatique	5
1.4 Au-delà des science du climat	7
2 Méthodes	10
2.1 Observations	10
2.2 Simulations	13
3 Le comportement du modèle global du CNRM sur la période présente	18
3.1 Simulations <i>vs.</i> observations	18
3.1.1 Les surfaces brûlées	18
3.1.2 Les émissions de CO ₂	20
3.1.3 L'existence de biais	22
4 Les projections climatiques	26
4.1 Les projections en moyenne globale	26
4.2 Les projections à l'échelle régionale	26
4.3 Brève analyse de la réponse du modèle du CNRM	28
Conclusion	31

Introduction

Le journal *Le Point* indiquait le 19 août 2023 que 14 millions d’hectares (Mha), soit 140 000 km², avait brûlé depuis le début de la saison estivale canadienne. Autrement dit, en l’espace d’une saison c’est la superficie de la Grèce qui s’est fait dévorée par les flammes. Ceci pose de nombreuses questions qu’elles soient d’intérêt pour les sciences du climat ou pour la mise en place de politiques publiques adaptées. En effet, les feux de biomasse sont responsables de 10 % à 15 % des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) à l’échelle de la planète chaque année. Les incendies impactent également l’albédo terrestre et donc l’équilibre radiatif local [17, 36]. Ils peuvent modifier aussi le bilan radiatif planétaire ainsi que la dynamique atmosphérique [22]. Enfin, les feux de biomasse impactent également la concentration locale en particule fine qui sont nocives pour la santé humaine [23].

Dés lors, une prise en compte correcte des feux de biomasse et notamment de leurs émissions est nécessaire pour limiter les incertitudes dans les modèles atmosphériques ou climatiques, qu’ils soient utilisés pour étudier les impacts sur la qualité de l’air, sur la dynamique atmosphérique ou sur le climat récent et futur. Le stage que j’ai réalisé entre mars 2023 et septembre 2023 dans le groupe qui étudie le l’évolution du climat au sein du Centre National de Recherches Météorologiques de Météo-France s’intègre dans cette thématique.

La problématique générale à laquelle j’ai essayé d’apporter une réponse est la suivante : le module de feu développé au sein du modèle de surface du CNRM, ISBA, est-il assez robuste pour représenter les surfaces brûlées et les émissions issues des feux de biomasse ? Nous répondrons à cette question en trois temps. D’abord, je présenterai les outils utilisés pour réaliser ce travail de recherche. Nous évaluerons ensuite la manière dont le modèle ISBA simule ces deux variables dans le modèle de climat du CNRM sur la période présente. Cette analyse sera réalisée en comparant les sorties du modèle du CNRM avec les observations disponibles mais également en utilisant les simulations réalisées par le modèle américain du National Center for Atmospheric Research dont la modélisation des feux de biomasse est bien plus complexe et à "l’état de l’art" que celle du CNRM. Nous analyserons ensuite les projections futures établies pour différents scénarios climatiques. Enfin, nous discuterons d’améliorations pertinentes qui pourraient être intégrées dans le schéma de feu du modèle ISBA du CNRM.

1 Les feux de biomasses et leurs émissions

1.1 Généralités

14 Mha de forêt ont donc brûlé depuis le début de la saison estivale au Canada. Au sein des processus naturels agissant dans les hautes latitudes du continent Nord-américain, les feux de biomasse se trouvent être très récurrents [6]. Nous pouvons retracer la présence de ce phénomène au sein des régions boréales jusqu’au début de l’Holocène [52]. La présence récurrente de feux de biomasse n’est pas limitée à ces régions comme le montre l’importance annuelle des incendies touchant le pourtour méditerranéen. L’incendie important qui a touché la Grèce pendant l’été 2023 en est l’exemple flagrant.

Il est important de comprendre que les feux de biomasse sont des processus qui ont façonné la terre depuis des millions d’années. Ces phénomènes intègrent une véritable dualité d’un point de vu anthropologique. Par exemple, la Figure 1 montre que sans les feux de biomasse l’Afrique du Sud, qui est principalement composée de savane, devrait être idéalement recouverte d’une végétation arborée beaucoup plus importante [5]. La maîtrise des départs de feux par les sociétés humaines a également influencé l’organisation paysagère des espaces qu’elles ont investi. Les espaces insulaires tels que Madagascar ou Hawaï en sont des exemples caricaturaux puisque la couverture végétale y a été partiellement remplacée par des surfaces herbacées [9, 51]. De même, la majorité des feux ayant lieu en Afrique entre mai et août ont une origine anthropique puisqu’ils sont liés à l’agriculture. En ce sens, 7% de la population mondiale dépend de la culture sur brûlis [34].

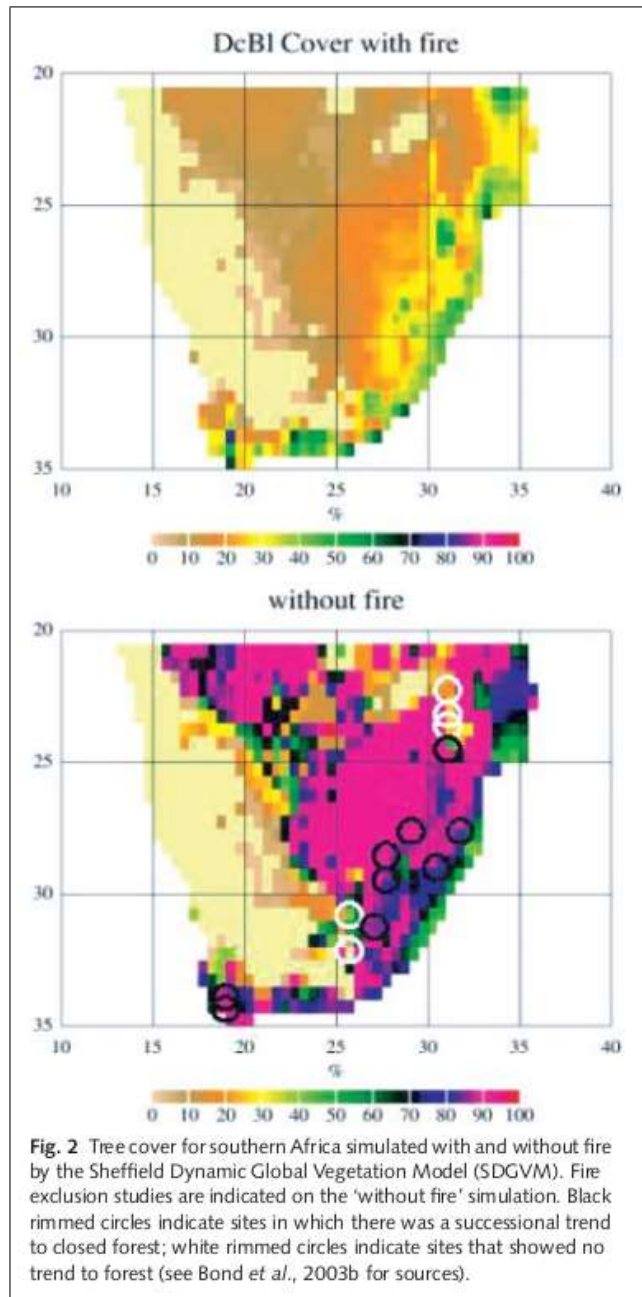


Figure 1: Simulation de la couverture forestière sud-africaine avec (haut) et sans (bas) prise en compte des feux de biomasse [5]

Les zones touchées par les incendies et les émissions associées peuvent varier considérablement entre les régions [8, 18]. Environ 70% des surfaces brûlées dans le monde se trouvent en Afrique, principalement en raison des incendies de surface fréquents dans les savanes [65]. Comme ces incendies sont des feux qui ne consomment quasi que de l'herbe (ou brousse), leur consommation en "combustible" est relativement faible et ils ne représentent donc qu'environ la moitié des émissions mondiales de carbone dues aux incendies [67]. Une grande partie de ces émissions est ensuite séquestrée par la repousse de la brousse en l'espace d'un an. Des taux de consommation de biomasse plus importants sont observés dans les incendies de forêts qui impliquent la combustion de plus grandes quantités de combustibles [19, 65]. Dans les écosystèmes forestiers, la repousse est plus lente et le carbone perdu met plus de temps à être re-séquestré par les écosystèmes. Les émissions sont particulièrement importantes en cas de déforestation, car la repousse est largement ou totalement inhibée. Dans les tropiques, les pratiques de brûlis sont utilisées pour convertir les terres de la

forêt tropicale en terre agricole, ce qui implique une perte de carbone vers l'atmosphère [7].

1.2 Dans le contexte du réchauffement climatique

Tout d'abord, nous appelons ici réchauffement climatique l'évolution du forçage radiatif externe sur le système Terre. On appelle forçage externe toute perturbation de l'équilibre énergétique du système climatique dont l'origine est extérieure au système. En ce sens, le rayonnement solaire incident et la capture du rayonnement infrarouge terrestre par les gaz à effet de serre sont deux types de forçage affectant le système climatique terrestre [44]. Nous savons que l'activité économique humaine contribue depuis la période pré-industrielle [48, 49, 50] aux émissions de gaz à effet de serre [60]. Ces gaz contribuent à la croissance du stock d'énergie qui n'est pas évacué du système Terre.

Concernant l'évolution des surfaces brûlées dans le contexte du réchauffement climatique, les avis divergent en fonction de la période considérée. Par exemple, les observations montrent actuellement un déclin régional des surfaces brûlées [70]. Selon Andela et al. [1], ce déclin à court terme est en partie le fruit d'une extension des zones agricoles. D'autres facteurs peuvent également être pris en compte pour comprendre cela et notamment l'incertitude inhérente aux outils spatiaux utilisés dans la construction des inventaires d'émissions [42]. A long terme, la tendance semble différente. En effet, les modèles présentent une évolution régionale inverse. En ce sens, Xie et al. [41] présente une augmentation des surfaces brûlées sur le territoire des États-Unis. Par ailleurs, la recherche montre qu'il semble probable que la fréquence des méga-feux s'accroisse dans le futur [3]. Un feu est considéré comme méga-feu relativement à l'impact qu'il a sur la biochimie du lieu où il se développe et relativement à l'impact socio-économique qu'il a [40]. Il peut également être considéré de cette façon relativement à sa taille : il doit être supérieur à 10 000 ha et peut avoir un ou plusieurs foyers [16].

1.3 Les aérosols et leur impact climatique

Les émissions anthropiques contribuent également à l'ajout d'aérosol dans l'atmosphère (Figure 2). Il s'agit de particules microscopiques transportés par les courants aériens. Ces dernières peuvent être directement injectées dans l'atmosphère (comme les aérosols désertiques) ou alors elles peuvent être générées par transformation d'un matériel parent (gazeux notamment).

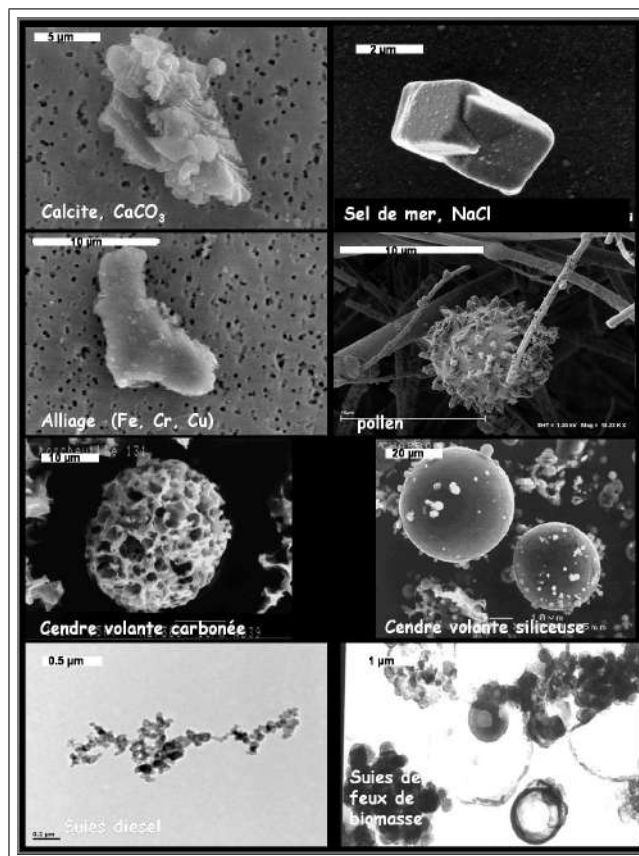


Figure 2: Exemple de différents aérosols d'après Ausset et al [4].

Il n'est pas possible de dissocier les émissions des feux de biomasse des surfaces brûlées. En effet, les émissions de gaz et d'aérosols sont inhérents au processus de combustion. Si certains gaz émis sont rapidement détruits par photo-réaction et par réactions avec l'ensemble des composantes de l'atmosphère, les aérosols émis ont, eux, une durée de vie beaucoup plus longue (du jour à la semaine). Par ailleurs, les effets de ces deux types d'émissions sur le climat est très différent. Si certains types de gaz émis tel que le dioxyde de carbone interagissent avec les ondes infrarouge, les aérosols ont eux un effet sur le rayonnement solaire. D'une part, ils le diffusent et d'autre part ils l'absorbent, ils ont donc un impact sur le forçage radiatif direct. Cependant, le signe de cet impact radiatif n'est pas encore clairement identifié [15]. Malgré cette incertitude forte, il est possible de relever trois impacts des aérosols sur l'atmosphère [35]. D'une part, ils refroidissent le système "Terre-Atmosphère" en augmentant le flux solaire réfléchi. D'autre part, ils échauffent certaines couches atmosphériques et refroidissent la surface terrestre et agissent donc sur les flux (latent/sensible) provenant de celle-ci. Enfin, ils affectent également les caractéristiques physiques de la surface terrestre. Par exemple, leur dépôt sur le manteau neigeux réduit fortement l'albédo dû au noircissement de l'espace considéré. Ainsi, des chercheurs [28] ont montré que l'accroissement local de la température de surface dû à la présence d'un dépôt d'aérosol accélère la période de fonte de la chaîne himalayenne de vingt jours.

De même, les aérosols émis par les feux au centre et au Sud du continent africain impact les moussons africaines. En effet, les aérosols libérés dans cette zone, dû fait de l'activité anthropique, peuvent affecter la dynamique des précipitations de mousson par des interactions avec les radiations émises par le Soleil et aussi avec les radiations émises par la Terre. De même, ces particules peuvent agir de manière complexe sur la formation des nuages [66]. Il est donc nécessaire de pouvoir observer et quantifier exactement l'ensemble des particules émises par les feux dans cette zone. En effet, cela permettrait de diminuer la part d'incertitude

liée à la modélisation des phénomènes de mousson [33].

Pour toutes ces raisons, les modèles de climat qui représentent les interactions entre la biosphère, la cryosphère, les océans, la surface terrestre et l’atmosphère doivent également prendre en compte les surfaces brûlées et leurs émissions. De nombreuses tentatives d’intégration de modèle de feux ont eu lieu (Spitfire [37], CTEM [2], CLM [20], ISBA [12]) chacun ayant sa complexité propre. En parallèle, différents jeux de données (GFED, GFAS, QFED) permettant de représenter les émissions de feux de biomasse sont aujourd’hui utilisés dans certains modèles de climat. Il s’agit donc aujourd’hui de réfléchir au moyen de coupler les modèles de surface aux modèles d’atmosphère dans le but de comprendre les interactions entre les émissions des feux, la surface et l’atmosphère. Dans la suite de ce travail nous concentrerons notre analyse sur les émissions carbonées issues des surfaces brûlées. En effet, la temporalité du stage n’a pas permis de différencier les émissions gazeuses des émissions d’aérosols.

1.4 Au-delà des science du climat

Au-delà de la recherche en science du climat, les feux de biomasse sont également centraux pour la recherche dite *opérationnelle*. En ce sens, la recherche en économie de l’environnement fait partie de cette branche. Ce thème de recherche est défini comme une branche particulière de l’économie néo-classique [54] dont les objets principaux sont : la problématique des externalités négatives et la tarification optimale d’une ressource. Pigou [59] définit une externalité comme apparaissant lorsque l’action d’un agent économique a un impact sur la situation d’un autre agent, sans que cette action soit compensé par une transaction monétaire. Dans le cas où l’impact est positif nous parlons d’externalité positive et dans le cas où l’action est négative nous parlons d’externalité négative. Suivant cette définition de l’externalité, il est possible de caractériser le changement climatique comme étant une externalité négative. Dès lors, ce champs d’étude dispose d’outil pour réaliser une évaluation monétaire du changement climatique alors qu’il ne dispose pas d’un marché particulier pour lui attribuer une valeur monétaire [58]. Il existe un nombre conséquent de critique de la discipline, elle reste cependant utile dans la création de politiques publiques [58]. Selon Fatih Demir [46], les politiques publiques sont *any issue that the government is interested in*. Dans notre cas, il s’agit de l’ensemble des actions centrés sur la protection de la société face aux évolutions écologiques et climatiques. Nous pouvons ici citer trois types de processus : l’adaptation, l’atténuation et la transformation. Ces processus ont un champ de finalité très large. En effet, le spectre de leur action va de la diminution de la consommation d’énergie électrique par la population à la sauvegarde des services écosystémiques. Ces derniers sont l’ensemble des bénéfices que la société retire du fonctionnement d’un écosystème. Nous pouvons les diviser en quatre catégories : régulation, approvisionnement, récréation et culturel. L’évolution des températures sur le globe à cause du changement impact les macro-écosystèmes dont la répartition peut être caractérisée par des facteurs bioclimatiques [55, 68]. Par conséquent, le changement climatique a un impact sur les services écosystémiques. Par ailleurs, il est utile de souligner ici que le concept de service écosystémique est anthropocentré car il ne prend en compte un écosystème que dans sa relation par rapport à l’humain. L’Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, qui est l’équivalent de l’Intergovernmental Panel on Climate Change pour les sciences de la vie, essaie de développer une définition des services écosystémiques décentrée de la notion de bénéfice. Ce faisant un concept différent est apparu : *nature contribution to people*. Il s’agit de *all the positive contributions, or benefits, and occasionally negative contributions, losses or detriments, that people obtain from nature* [57].

L’atténuation est l’ensemble des actions humaines visant à réduire les émissions anthropiques. Nous pouvons penser ici à l’ensemble des actions visant à fixer le carbone par la photosynthèse. Deuxièmement, l’adaptation peut être comprise comme l’action d’anticipation des effets négatifs du changement climatique et de mise en oeuvre de plan pour minimiser les dommages et/ou maximiser les avantages. Il s’agit, par exemple, de créer une carte multi-risques pour arbitrer des décisions de protection d’espace en fonction de leurs valeurs [31]. Il s’agit également de définir des trajectoires optimales en terme d’émissions de gaz à effet

de serre et/ou d'aérosols. Enfin, la transformation est un processus tout à fait différent qui se différencie de l'atténuation par sa finalité. En effet, il s'agit de réaliser une mutation générale de l'organisation économique et sociale d'une communauté donnée.

Des trajectoires de politique publique sont aujourd'hui intégrées aux Shared-Social Pathways (SSP). Il s'agit de scénario décrivant des chemins alternatifs pris par notre système productif en fonction des politiques mises en places à différentes échelles. Ainsi, le SSP1 prend en compte une trajectoire de développement durable, le SSP2 prend en compte une trajectoire inchang, le SSP3 décrit un accroissement de la fréquence des tensions géopolitiques, le SSP4 décrit un accroissement des inégalités et le SSP5 présente un développement des énergies fossiles (IPCC, 2019). Ces récits ont la caractéristique d'être prospectif. En ce sens, ils se basent sur une approche systémique centrée sur l'existence de futurs multiples, inconnus et à construire. Cette méthode se différencie de la prévision qui est l'évaluation quantitative et potentiellement probabilisée d'une valeur futur. En ce sens, leur écriture se base sur l'avis d'experts de différents champs [29].

Il est remarquable que les recherches au sein du champ économique et du champ climatiques restent fortement hermétiques. En ce sens, les modèles intégrant des rétroactions complètes entre un modèle de climat et un modèle économique sont rares. Nous pouvons citer les projet DICE (*Dynamic Integrated model of Climate and the Economy*) [56]. Nordhaus représente au sein de ce projet un système bio-économique globale à l'aide de treize équations. Le système productif émet au sein de ce modèle un gaz à effet de serre qui rétroagit sur la température terrestre. Enfin, la température influence le système productif par l'intermédiaire de la production intérieur brut. Le travail de William Nordhaus est à la fois primé et critiqué. En ce sens, plusieurs arguments sont souvent opposés à son travail. D'une part, la communauté scientifique critique l'utilisation d'un nombre d'équations particulièrement réduit qui diminue la capacité d'explicabilité du modèle. D'autre part, le modèle DICE est également discuté sur la valeur numériques du taux d'actualisation utilisé. Ce concept est central en économie puisqu'il permet de ramener la valeur courante d'une dépense ou d'une recette future à une valeur actuelle. Dès lors, les effets de plusieurs types de politique publique peuvent être comparés à l'aide de la valeur net actualisée (VAN). Cette dernière comme :

$$VAN = \sum B_t \cdot f(t)$$

Ici, $f(t)$ est un facteur d'actualisation dépendant du temps et B_t une quantité étroitement liée aux bénéfices ou coûts nets survenant à la date t [63]. Dans le cadre du modèle de William Nordhaus, ce taux est arbitrairement retenu au chiffre de 4.5%. En 2006, le directeur de la banque mondiale, publie un rapport proposant de diminuer le taux d'actualisation du modèle DICE. Ce fait, correspond philosophiquement à accorder un poids plus important au génération futur. Ainsi, le rapport Stern présente un taux d'actualisation plus faible de 1,4 %. Ce faisant, les dommages climatiques auxquels seront confrontées les générations futures ont une valeur actuelle très élevée, ce qui légitime une action vigoureuse aujourd'hui. Nous pouvons ici mettre le doigt sur un fait inhérent à la recherche en économie : son caractère arbitraire. En dépit de cela, la méthodologie développé par les modèle couplés, également appelé *Integrated Assessment Model* est retenu par l'IPCC.

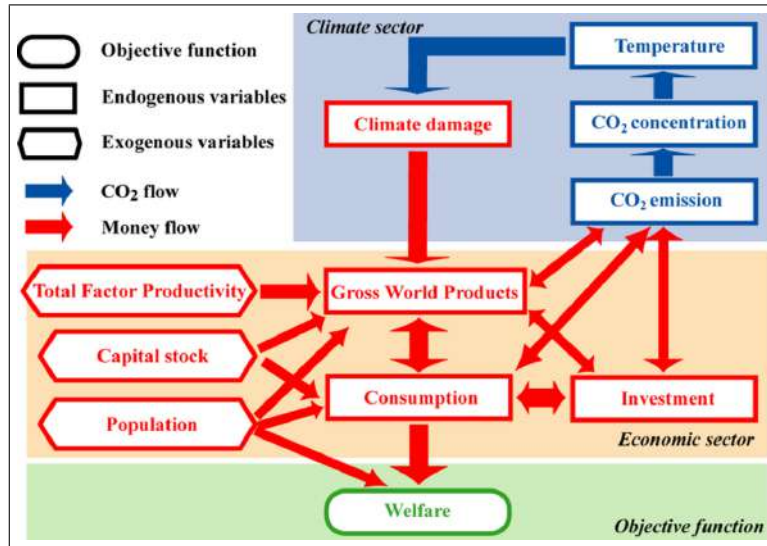


Figure 3: Fonctionnement du modèle économique DICE d'après Nakata et Ashina [43].

Les émissions carbonées sont centrales dans les analyses produites par les méthodes d'économie environnementale. En ce sens, elles sont au coeur des négociations internationales sur les politiques climatique à travers le concept de responsabilité [26]. En ce sens, les pays en voie de développement défendent l'idée d'une différenciation des rôles lutte contre le changement climatique. L'accord de Kyoto négocié en 1997 institutionnalise cela en créant deux catégories de pays : les pays de l'Annexe 1 et les pays non-Annexe 1. La différence entre les deux réside dans l'investissement public à réaliser. Des modèles économiques sont apparus pour aider les décisions d'optimisation des paiements dans le cadre des accords sur le climat [25].

2 Méthodes

Pour réaliser ce travail d'évaluation nous avons dû regrouper de multiples données. Nous devons d'abord différencier celles provenant d'observations de celles provenant de simulations.

2.1 Observations

Plusieurs outils d'imagerie spatiale existent pour observer les surfaces brûlées et, indirectement, les différentes émissions qui leurs sont liées. Cependant, les produits spatiaux issus de l'instrument MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer), seront principalement utilisés comme références dans cette étude.

Un spectroradiomètre mesure la puissance du rayonnement électromagnétique en fonction de la longueur d'onde. Les spectroradiomètres peuvent couvrir, en fonction de leur résolution spectrale, un domaine plus ou moins étendu de longueurs d'onde. Pour détecter les feux de biomasse, l'instrument MODIS dispose de plusieurs bandes spectrales passant du spectre solaire aux infrarouges.

Dans des conditions quasi idéales, le produit peut détecter des incendies d'une superficie de 50 m². Mais si l'on considère qu'environ 70% de la surface de la planète est couverte de nuages à tout moment, ces conditions idéales sont difficiles à atteindre. L'instrument MODIS peut régulièrement détecter des incendies d'une surface moyenne de 900 m² dans diverses conditions [47].

Concernant les émissions carbonées, nous devons différencier deux outils différents mais respectivement particulièrement utiles. Nous pouvons regrouper, d'une part, les missions satellitaires et, d'autre part, les missions aéroportées. Dans le premier cas, les données recueillies peuvent être des anomalies de températures ou des changements de l'albedo de surface. Ces informations sont ensuite utilisées dans l'ensemble de la chaîne de traitement permettant le développement des inventaires d'émission pour différents gaz et pour les aérosols. Dans le second cas, des informations très localisées sur des concentrations de différents type d'aérosols sont recueillies à l'aide de différents instruments (spectromètre de masse, compteur de particules,...). Ces informations permettent d'évaluer la capacité des modèles à reproduire la charge atmosphérique des aérosols très localement (typiquement à l'échelle d'une région).

Les mesures réalisées à bord des avions de recherche permettent de couvrir une surface réduite mais de façon très fine (plus de variables mesurées) alors que des inversions par satellites permettent de couvrir une surface plus large mais de façon plus grossière. Le plus souvent les observations in-situ sont organisées sur des missions d'une période de temps assez courte (semaine ou mois). L'objectif est de détecter les aérosols recherchés en identifiant la masse des particules dans l'atmosphère. Une problématique est l'hétérogénéité des territoires couverts. En ce sens, les données concernant l'Amérique du Nord et l'Europe sont très importantes en comparaison aux données disponibles caractérisant le continent africain. Nous pouvons voir cela sur la Figure 4 . Celle-ci représente quinze missions de détection d'aérosols organiques ayant eu lieu entre 2008 et 2017 [24]. Nous pouvons clairement observer le manque de couverture d'une importante partie du globe.

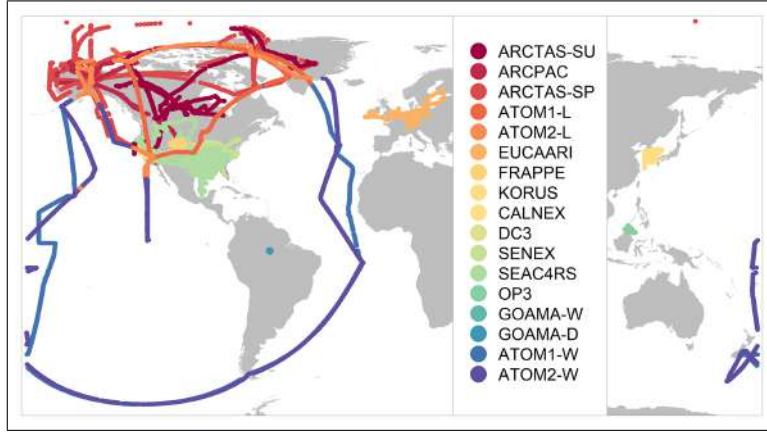


Figure 4: Trajets des principales missions aéroportées entre 2008 et 2017 d'après Pai et al [24].

Cette hétérogénéité dans l'observation crée des lacunes importantes quand à notre capacité à avoir accès à des événements précis.

Nous utilisons dans notre analyse l'inventaire d'émissions GFED qui est le standard dans ce champs de recherche. Il existe d'autres inventaires disponibles (GFAS, QFED, FINN,...) mais nous ne les avons pas utilisés lors de ce stage. GFED utilise un algorithme basé sur le modèle Carnegie-Ames-Stanford (CASA). Ce dernier est introduit en 1994 pour essayer de simuler la productivité primaire net sur la surface terrestre [14]. Ici, la quantité annuel de rayonnement absorbée par la végétation (APAR) est mis en relation avec un coefficient d'efficacité. Le résultat donne la croissance du stock de carbone de la plante. Ce calcul est réalisé pour chaque point de grille ce qui permet d'avoir une approche global. Au sein de l'inventaire GFED, le calcul a été transformé de telle sorte que la productivité primaire nette soit calculé tel que :

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \cdot \varepsilon(x, t)$$

Cette équation peut être réécrite comme suit [14]:

$$NPP(x, t) = S(x, t) \cdot FPAR(x, t) \cdot \varepsilon^* \cdot T_1(x, t) \cdot T_2(x, t) \cdot W(x, t).$$

où S est la surface irradié, et $FPAR$ la fraction de rayonnement absorbale par la végétation verte. De même, un scalaire ε a été ajouté pour représenter l'humidité et la température [65].

Il est intéressant d'utiliser la NPP puisqu'il s'agit de l'intégral dans le temps de la vitesse de croissance de la biomasse d'une plante. Il s'agit d'une variable qui permet de résumer les processus ayant lieu entre la plante et son environnement direct. Cette variable décrit à la fois l'extraction de carbone depuis l'atmosphère et également la quantité de biomasse disponible pour la chaîne trophique de la faune herbivore [14].

Une fois obtenu la biomasse souhaitée, il faut déterminer la quantité de biomasse et de litière exposée au feu à l'aide de l'expression suivante :

$$C(x, t) = \sum_{\text{No. of pools}} [AGBL_{\text{pool}}(x, t) \cdot M_{\text{tree}}(\text{FTC}) \cdot CC_{\text{pool}}(\varepsilon_{\text{SM}}(x, t))] \cdot BA(x, t) \cdot f_c$$

Ici, C est la quantité de carbone brûlé et libéré sous forme semi-volatile dans l'atmosphère. M_{tree} est un facteur de mortalité pour les différentes classes d'arbres. De même, CC est un coefficient représentant le pourcentage effectif de matière brûlée. Enfin, BA représente la fraction de la maille ayant brûlé et f_c la fraction de carbone contenue dans le combustible brûlé.

Enfin, la question de la résolution spatiale des inversions est importante dans le cadre des processus ayant lieu sous la maille considérée. En effet, dans le cadre des feux de biomasse de faibles tailles, leurs petites tailles les rend presque inexistantes "aux yeux d'un modèle de climat". Ce phénomène crée alors des incertitudes particulièrement forte entre l'ensemble des inventaires d'émission [27]. Cette problématique est centrale au sein des communautés travaillant sur des données spatiales, qu'il s'agisse d'économétrie ou de science du climat. En ce sens, la recherche sur la modélisation des surfaces brûlées au sein des modèles de climat tente d'augmenter la résolution spatiale des inventaires d'émissions et des surfaces brûlées [64] pour atteindre la résolution de cinq-cent mètres. Nous retrouvons ainsi des écarts importants dans les inventaires d'émissions développés actuellement, comme le montre la Figure 5.

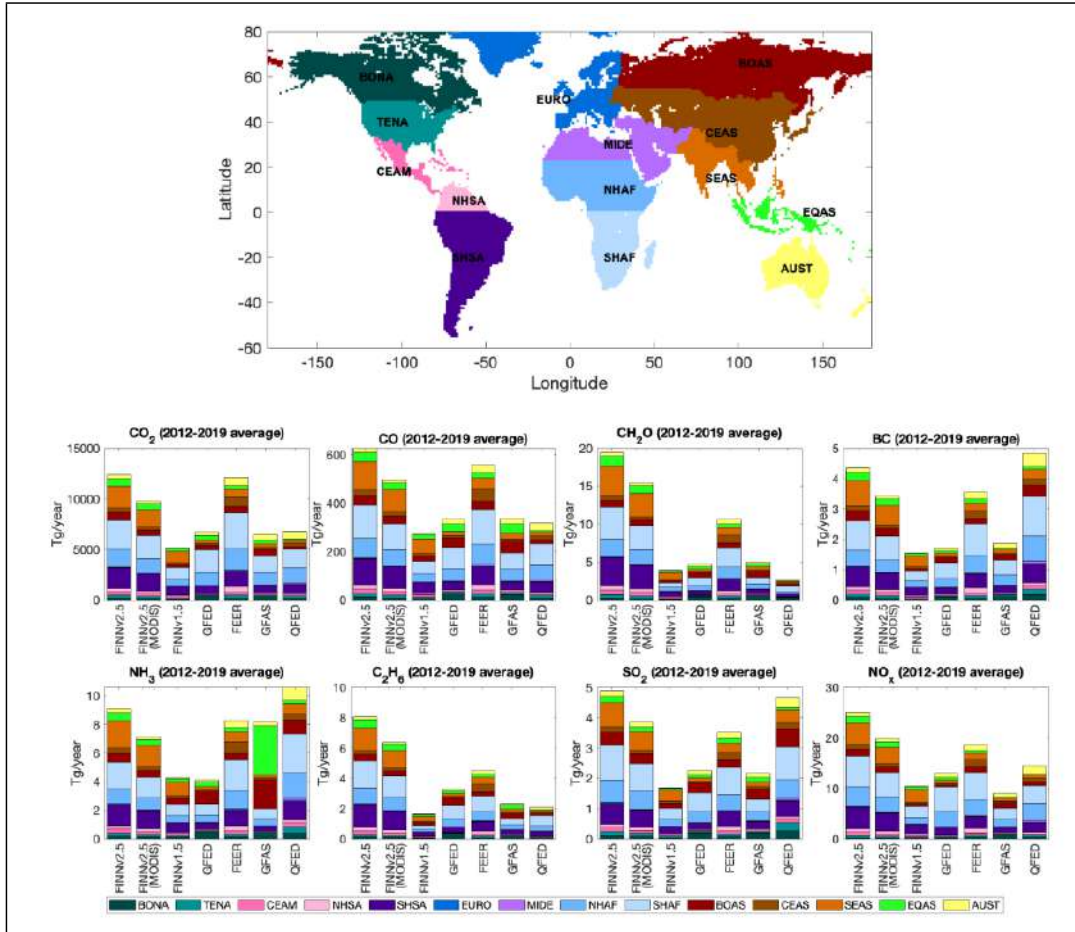


Figure 5: Comparaison des émissions ($\text{Tg}\cdot\text{year}^{-1}$) définies pour plusieurs inventaires d'après Wiedinmyer et al [39].

Celle-ci représente les émissions de gaz et d'aérosols proposés par différents inventaires. Ces émissions sont ici représentées en teragramme (Tg) par année. De même, nous pouvons remarquer une division régionale de l'ensemble des quantités présentées. Dans le cadre de l'étude de Wiedinmyer et al [39], nous pouvons observer que l'inventaire d'émissions FINNv2.5 est toujours l'inventaire représentant le plus d'émissions pour chaque espèce considérée à l'exception du carbone suie (BC) et de l'ammoniac (NH_3). De même, la version

1.5 de ce modèle représente systématiquement moins d'émissions d'espèces sauf pour le CH_2O , l'ammoniac et le protoxyde d'azote (NOx). Le produit GFED se situe généralement dans la moyenne sauf pour l'ammoniac. En effet, celui-ci présente les plus petites valeurs de la comparaison pour cette espèce ($4Tg.year^{-1}$).

Les données observées utilisées dans ce travail peuvent être décrite comme suit :

Type	Emissions	Surfaces brûlées
Produits	GFED4s	MODIS
Producteur initial	NCAR	NASA
Producteur final	–	ESA
Période couverte	1997 – 2022	2001 – 2014
Fréquence temporelle	mensuelle	mensuelle
Résolution spatiale initiale	0.25°	0.005°
Résolution spatiale d'utilisation	1°	1°

2.2 Simulations

Les données simulées proviennent principalement des deux modèles de climat global précédemment présentés. L'objectif d'évaluation de ce travail nous a poussé à télécharger de nombreuses variables caractéristiques de la surface et de l'atmosphère. Par ailleurs, la variabilité interne des modèles climatiques utilisés nécessite de réaliser plusieurs simulations, aussi appelés membres. Tous ces membres ont été standardisé puis transféré au projet CMIP6 pour être disponibles librement. Les fichiers récupérés sur la base de donnée du projet d'intercomparaison sont disponibles dans le format netCDF. Il s'agit du type de fichier standard lorsque l'on travail au sein des sciences du climat. Toutes les opérations réalisées sur ces fichiers ont été réalisées à l'aide de différentes commandes CDO ou grâce à la librairie Python *xarray*.

Les variables simulées l'ont été en fonction de diverses expériences. En ce sens, nous pouvons en différencier sept. La première est dite *historique*, il s'agit d'un jeu de simulation recouvrant la période allant de 1850 à 2014. La seconde est dénommée *land-historique*, il s'agit de l'ensemble des membres réalisés en forçant l'atmosphère du modèle de climat considéré. Enfin, nous pouvons différencier les quatre scénarios SSP utilisés (ssp126, ssp245, ssp370, ssp 585) avec un forçage extérieur respectif de : $2.6 W.m^{-2}$, $4.5 W.m^{-2}$, $7.0 W.m^{-2}$, $8.5 W.m^{-2}$. Ces différents scénarios couvrent une période temporelle allant de janvier 2015 à décembre 2100. Enfin, les données simulées utilisées ont toute été converties à une maille de 1° .

Les sorties des simulations utilisées dans ce travail peuvent être décrite comme suit :

Surface	Nom	Dimension	Atmosphère	Nom	Dimension
burntFractionAll	Surfaces brûlées	%	rh	Humidité relative	%
fFireAll	Emissions	$kgC.m^{-2}$	w	vitesse du vent	$km.h^{-1}$
mrsos	Humidité	$kgC.m^{-2}$	–	–	–
ts	Température de la surface	K	–	–	–
cLitter	carbone de la litière	$kgC.m^{-2}$	–	–	–
cVeg	carbone végétal	$kgC.m^{-2}$	–	–	–
landCoverFrac	Utilisation du sol	%	–	–	–

La visualisation de ces données sous forme de carte a été permise par l'utilisation de la librairie Python *cartopy*. De même, la taille des fichiers recueillis a posé des contraintes sur l'utilisation d'environnement de code tel que Spyder. Par conséquent, nous avons dû réaliser certaines opérations à l'aide du supercalculateur de Météo-France en utilisant le serveur *Belenos*.

La base de donnée CMIP6 contenant une quantité très importante de donnée il était inévitable que certains fichiers soient corrompus et par conséquent inutilisables. Pour contourner ce problème, nous avons utilisé le serveur SPIRIT de l'Institut Pierre Simon-Laplace.

Ce centre de recherche français a centralisé l'ensemble des données CMIP sur ces serveurs permettant de télécharger des fichiers autrement inaccessibles.

Voici le comportement des données principales décrites précédemment. D'abord, nous nous intéressons aux simulations annuelles des surfaces brûlées en Mha et des émissions carbonées en $kgC.s^{-1}$. Nous pouvons tout d'abord observer une incertitude importante concernant les surfaces brûlées. En effet, le modèle du CNRM modélise en moyenne globale, sur la période allant de janvier 2001 à décembre 2014, une surface brûlée totale de 967 millions d'hectares (Mha). Dans le cas du modèle du NCAR, les surfaces brûlées simulées en moyenne globale et sur la même période sont de 509 Mha. Ainsi, le modèle du CNRM simule deux fois plus de surface brûlée que le modèle du NCAR. De même, le modèle du CNRM modélise en moyenne globale sur la période allant de janvier 2001 à décembre 2014 des émissions carbonées de $67325 kgC.s^{-1}$. Dans le cas du modèle du NCAR les émissions simulées en moyenne globale sur la même période sont de $53908 kgC.s^{-1}$.

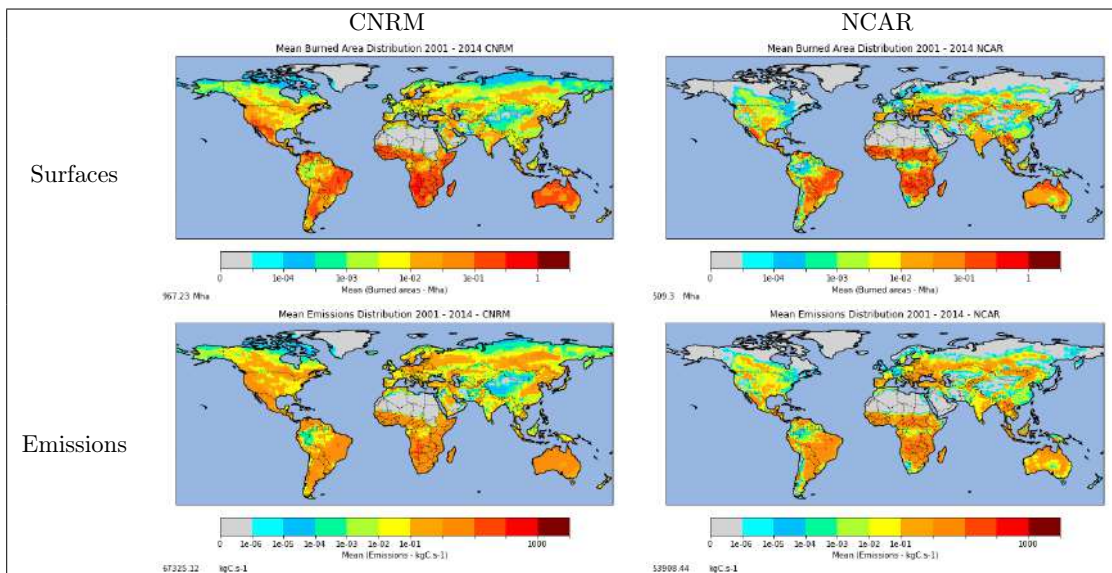


Figure 6: Moyenne globale annuelle pour les émissions carbonées et les surfaces brûlées par le modèle global du CNRM (gauche) et par le modèle global du NCAR (droite)

Lorsque nous avons regardé les autres variables d'intérêts, nous avons remarqué que la disponibilité des données CMIP6 était très hétérogène. Par exemple, les données de litière de surface sont disponibles pour le modèle du CNRM mais pas pour celui du NCAR. Il en va de même pour la végétation et l'usage du sol.

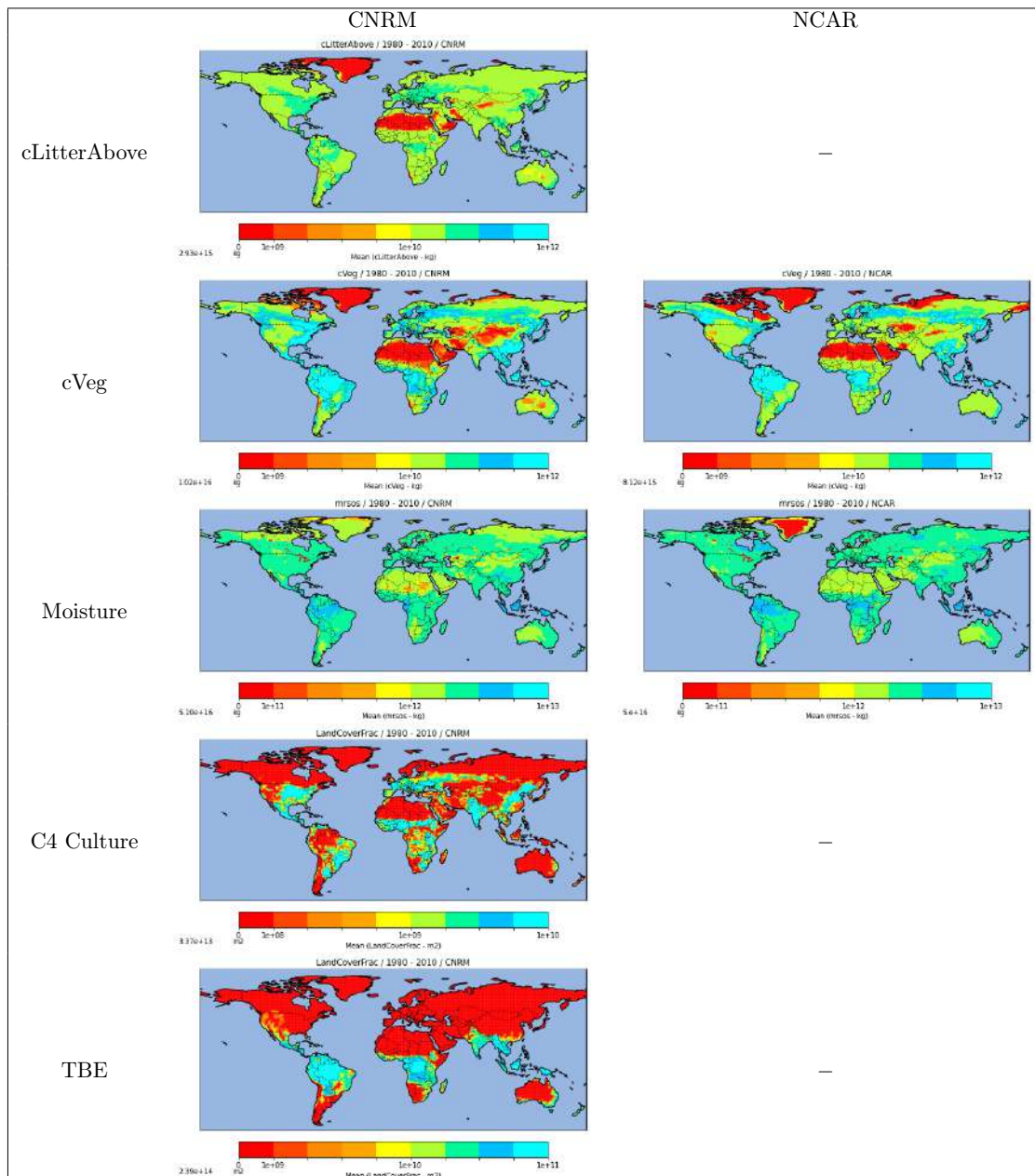


Figure 7: Moyennes globales sur la période présente pour différentes variables de CMIP6

Les projets d'intercomparaisons de modèle de climat ont émergé dans les années 1990 avec CMIP1. Il s'agit du premier essai de comparaison systématique des modèles climatiques existants (Meel, 1997). En effet, si chaque modèle climatique possède la même base physique pour représenter les parties du système terrestre, la manière de les paramétrer diffère. Dans l'étude présente nous utilisons deux modèles globaux à complexité variable : celui du CNRM dénommé CNRM-ESM2-1 et celui du NCAR dénommé CESM2. Nous voyons à l'aide des tableaux suivants plusieurs choses. D'abord, le tableau 1 représente macroscopiquement les deux modèles utilisés. Nous voyons qu'il existe des différences quand à la représentation du cycle de l'azote ou des surfaces brûlées. Ces modèles de climat peuvent être utilisés de façon couplés, c'est à dire en créant une dynamique entre l'ensemble des parties du modèle. Cependant, ils peuvent également être utilisé de manière découplée, pour cela il suffit de forcer l'ensemble des entrées du modèle considéré.

Connecter les différentes boîtes du système Terre n'est pas chose aisée. En effet, les incertitudes liées à la mise en relation s'additionne. Il est donc nécessaire lorsque l'on évalue les capacités explicatives d'un

modèle de prendre en compte cela. Dans le cas de l'étude des surfaces brûlées et de leurs émissions au sein des modèles de climat, les incertitudes concernant la modélisation de l'atmosphère sont centrales. Le tableau 2 présente la manière dont cette partie du système climatique est simulée. Nous pouvons là encore remarquer plusieurs différences entre le modèle français et le modèle américain.

Table 1. Model description.

Parent climate model	CESM2 [10]	CNRM-ES2-1 [32]
Terrestrial biosphere model	Community Land Model (CLM5) [11]	ISBA-CTRIP [12]
Simulation resolution	0.9° latitude x 1.25° longitude	T127 (1.4°)
Fire	Process based [21]	Simple [38]
Natural vegetation dynamics	No	No
Soil carbon decomposition	Yes	Yes
Soil hydrology	Multilayer	Multilayer

Table 2. Fire scheme description.

Parent climate model	CLM5	ISBA
Simulation resolution	0.9° x 1.25°	T127 (1.4°)
Non-peat fires outside cropland and tropical closed forest	Yes	Yes
Agricultural fire	Yes	No
Deforestation fire	Yes	No
Peat fires	Yes	No
Wind impact	Yes	No
Fire tras gas and aerosol emissions	Yes	Same idea

Nous pouvons décrire empiriquement une surface brûlée de la manière suivante :

$$A_b = A_{tot} \times I_g \times f_c \times f_v \times f_m \times P_v \times P_w \times (1 - E_s)$$

Ici :

A_b = Aire brûlée

A_{tot} = Aire totale

I_g = Ignition ou déclenchement (anthropique et naturel)

f_c = Combustibilité (humidité de l'air)

f_v = Combustibilité (quantité de litière)

f_m = Combustibilité (taux de sécheresse de la litière)

P_v = Propagation (Résistance au feu de la végétation)

P_w = Propagation (Intensité du vent)

E_s = Extinction (anthropique ou naturel)

Ainsi, chaque type de végétation dispose d'une résistance propre au feu. La première colonne du tableau suivant, tiré de Delire et al. [12], présente la manière dont chaque type de végétaux sera paramétré dans ISBA.

<i>PFT-Dependent Fire Parameters: Fire Resistance and Emissions Factors for Carbon Dioxide (CO₂) and Black Carbon (BC)</i>			
Vegetation type	ρ^{pft} (-)	$\epsilon_{\text{CO}_2}^{\text{pft}}$ (kg _{CO2} /kg _{DryMatter})	$\epsilon_{\text{BC}}^{\text{pft}}$ (g _{BC} /kg _{DryMatter})
Temperate broadleaf cold-deciduous	0.62	1.572	0.56
Boreal needleleaf evergreen	0.62	1.572	0.56
Tropical broadleaf evergreen	0.90	1.636	0.52
C3 crops	1.	1.646	0.46
C4 crops	1.	1.646	0.46
Irrigated crops	1.	1.646	0.46
C3 grass	0.	1.646	0.46
C4 grass	0.	1.646	0.46
wetlands	0.5	1.703	0.57
Tropical broadleaf dry-deciduous	0.90	1.636	0.52
Temperate broadleaf evergreen	0.62	1.572	0.56
Temperate needleleaf evergreen	0.62	1.572	0.56
Boreal broadleaf cold-deciduous	0.62	1.572	0.56
Boreal needleleaf cold-deciduous	0.62	1.572	0.56
Boreal grass	0.05	1.646	0.46
Deciduous shrub	0.60	1.572	0.56

Figure 8: Résistance au feu paramétré au sein du modèle de surface ISBA d'après Delire et al [12].

Enfin, si nous reprenons la formule précédente, nous pouvons ajouter que si le modèle du NCAR dispose de valeur pour chacun des coefficients ce n'est pas le cas pour le modèle du CNRM. En effet, y est seulement pris en compte le coefficient f_v et le coefficient f_m .

3 Le comportement du modèle global du CNRM sur la période présente

3.1 Simulations *vs.* observations

Au sein de cette section nous allons réaliser une évaluation du modèle via des comparaisons à des données observées. Il s'agit de s'assurer que le programme du modèle et que son implémentation sous la forme d'un algorithme sont correct [61]. Pour cela, nous allons confronter les surfaces brûlées et les émissions simulées en moyenne globale avec les observations décrites précédemment.

3.1.1 Les surfaces brûlées

D'abord, lorsque l'on regarde sur la Figure 6 la répartition spatiale annuelle des surfaces brûlées nous retrouvons globalement l'ensemble des zones brûlées. Par ailleurs, nous pouvons remarquer que la moyenne multi-modèle indique globalement plus de surfaces brûlées par rapport aux observations de l'instrument MODIS. Enfin, nous pouvons remarquer une moins bonne représentation concernant la simulation des surfaces brûlées sur la région de l'Afrique, en Amérique du Sud, sur le continent Nord Américain et sur la région de la Sibérie. Enfin, les surfaces brûlées boréales sont généralement sur-estimés en moyenne annuelle globale.

Lorsque nous regardons les moyennes saisonnières (Figure 9) nous remarquons une importante hétérogénéité entre les saisons concernant la qualité des simulations multi-modèles. En ce sens, certains des modèles de surfaces brûlées étudiés ici simulent plus de surfaces brûlées que les observations pour Mars-Avril-Mai (MAM), Juin-Juillet-Août (JJA) et Septembre-Octobre-Novembre (SON).

Pour la période Décembre-Janvier-Février (DJF), la moyenne globale multi-modèle est moins importante que celle issue des données MODIS utilisées. En ce sens, le multi-modèle donne environ 120 Mha contre environ 160 Mha dans le cas des observations. Spatialement et pour la saison DJF, nous remarquons que les surfaces brûlées d'Afrique centrale sont également sous-estimées. En effet, les incendies d'Afrique centrale démarrent avec le début de la saison sèche et terminent avec l'arrivée de la mousson en Afrique de l'Ouest. Leur période d'utilisation s'étend dès lors de fin février à début mars.

Concernant la période Mars-Avril-Mai (MAM), la moyenne globale multi-modèle est bien supérieure aux observations sur cette période. En ce sens, le multi-modèle donne environ 140 Mha contre environ 50 Mha. En ce sens, l'ensemble du territoire russe et nord-américain indique des surfaces brûlées non-négligeables dans la moyenne des deux modèles utilisés, contrairement aux données MODIS qui ne montrent aucun signal significatif. Par ailleurs, comme sur les observations MODIS, nous retrouvons la zone en Afrique du Sud même si elle s'étend beaucoup plus vers la pointe Sud du continent dans les modèles par rapport aux observations. Enfin, la zone d'Afrique centrale brûle également ce qui n'est pas le cas dans les données. Nous repérons également un biais positif sur l'Océanie. Enfin, c'est aussi une caractéristique que nous retrouvons sur l'Amérique du Sud.

Pour la période la période Juin-Juillet-Août (JJA), la moyenne globale multi-modèle est du même ordre de grandeur que les observations. En ce sens, le multi-modèle donne environ 190 Mha contre environ 180 Mha. Le problème tient ici à la mauvaise répartition spatiale des surfaces brûlées. En ce sens, si, dans les simulations, l'Afrique centrale n'est pas assez représentée, cela est compensé par l'apparition d'un signal fort en Amérique centrale ainsi qu'en Amérique du Nord et du Sud. De même, les espaces boréaux et l'Océanie sont sur-représentés dans les sorties de modèles.

Enfin, pour la période SON, les modèles simulent trop de surfaces brûlées à l'échelle globale. De même, la répartition spatiale est toujours très hétérogène puisque si certaines zones restent bien représentées comme celle concernant l'Afrique, d'autres à l'image de l'Ouest de l'Amérique du Nord sont sous-représentés. Ce commentaire peut également être réalisé pour l'Océanie puisqu'on remarque un gradient prononcé sur cette zone.

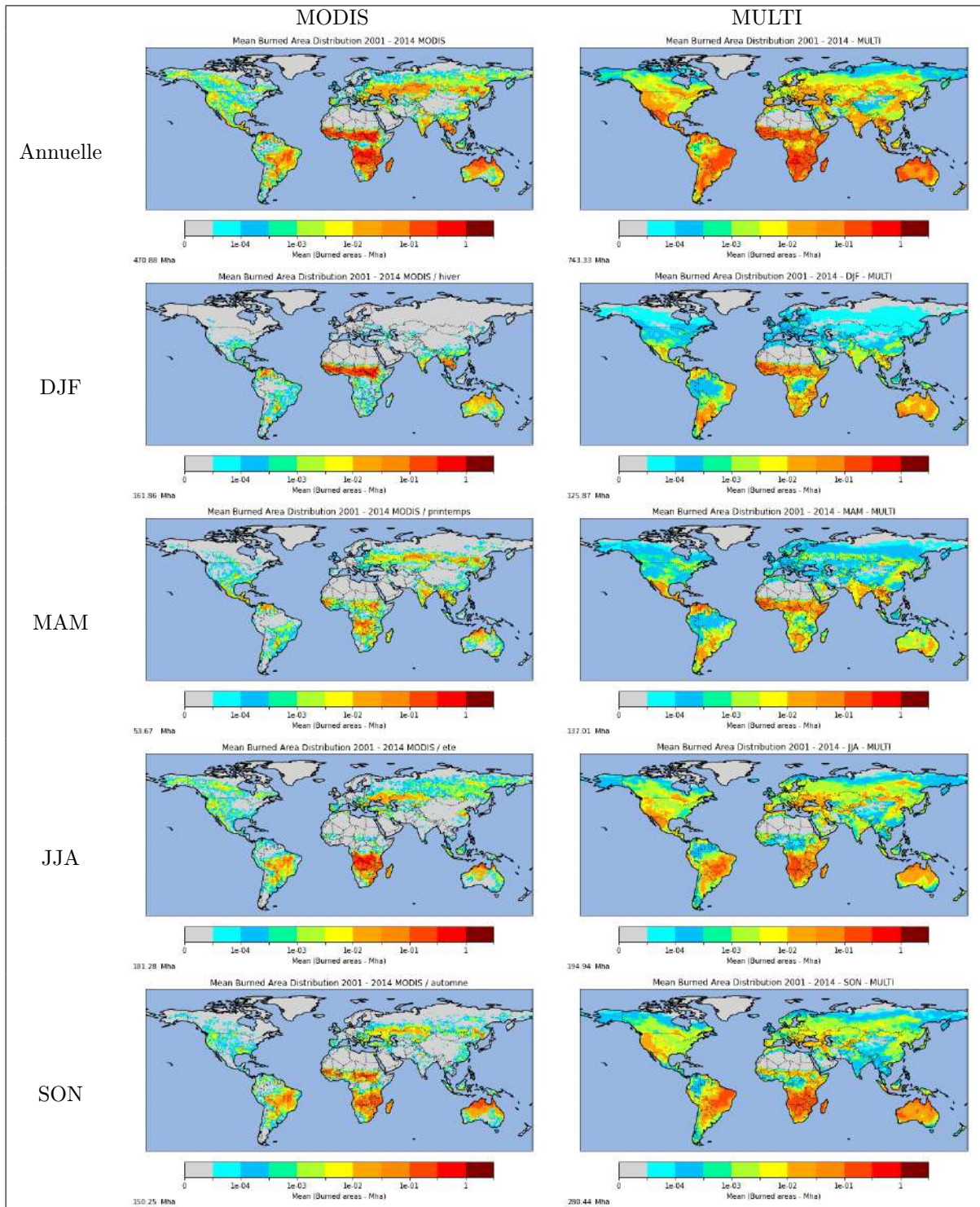


Figure 9: Moyenne globale saisonnière pour les surfaces brûlées inversées par l'instrument MODIS et simulées par le multi-modèle

3.1.2 Les émissions de CO₂

D’abord, lorsque l’on regarde (Figure 6) la répartition spatiale annuelle des émissions carbonées nous retrouvons globalement une répartition identique à celle des zones brûlées. Les sorties de modèle présentées ici sont exprimées en $kgC.s^{-1}$. De même, sont exposées les émissions carbonées par saisons. Nous pouvons remarquer que le multi-modèle simule globalement mieux les émissions que les surfaces brûlées puisque le biais absolu est moins important (Figure 6). Cependant, lorsque l’on regarde la répartition spatiale des émissions nous retrouvons globalement l’ensemble des zones brûlées. Ce fait est cohérent puisque la fraction brûlée apparaît dans les différentes formules d’émission.

Pour la période Décembre-Janvier-Février (DJF), nous pouvons remarquer que le multi-modèle donne environ $7350 kgC.s^{-1}$ contre environ $22835 kgC.s^{-1}$ dans le cas des observations. Par ailleurs, nous pouvons observer un signal fort des émissions carbonées issus d’Afrique centrale comme dans le cadre des surfaces brûlées. En parallèle, on peut noter une sur-estimation des émissions dans les modèles analysés sur la région de l’Amérique du Sud, de l’Afrique du Sud et sur une partie de l’Australie.

Concernant la période Mars-Avril-Mai (MAM), nous pouvons remarquer que le multi-modèle donne environ $10750 kgC.s^{-1}$ contre environ $4670 kgC.s^{-1}$ dans le cas des observations. En ce sens, l’ensemble du territoire russe et nord-américain présente un signal contrairement aux données issues de GFED qui ne montrent aucun signal, de même que pour les surfaces brûlées. Par ailleurs, comme sur les émissions issues des données GFED, nous retrouvons la zone sud-africaine dans les deux modèles utilisés même si celles-ci s’étendent beaucoup plus vers la pointe Sud du continent, comme présenté pour les surfaces brûlées.

Pour la période la période Juin-Juillet-Août (JJA), nous pouvons remarquer que le multi-modèle donne environ $14820 kgC.s^{-1}$ contre environ $25780 kgC.s^{-1}$ dans le cas des observations. Nous voyons que la moyenne globale multi-modèle est bien inférieure aux observations. Le problème tient ici à la mauvaise répartition spatiale des surfaces brûlées (Figure 6). Nous avons pour cette période une compensation d’erreur au niveau de l’Afrique, l’Amérique du Nord et du Sud et la Sibérie.

Enfin, pour la période SON, nous pouvons remarquer que le multi-modèle donne environ $27680 kgC.s^{-1}$ contre environ $15440 kgC.s^{-1}$ dans le cas des observations. Nous remarquons que les modèles simulent globalement trop d’émissions en accord avec les surfaces brûlées. Par ailleurs, la répartition spatiale est toujours très hétérogène puisque si certaines zones restent représentées comme celles concernant l’Afrique, d’autres, à l’image de l’Ouest de l’Amérique du Nord présentent des émissions trop importantes, comme dans le cadre des surfaces brûlées. Ce commentaire peut également être fait pour la région de l’Océanie puisqu’on remarque un biais positif prononcé sur cette zone.

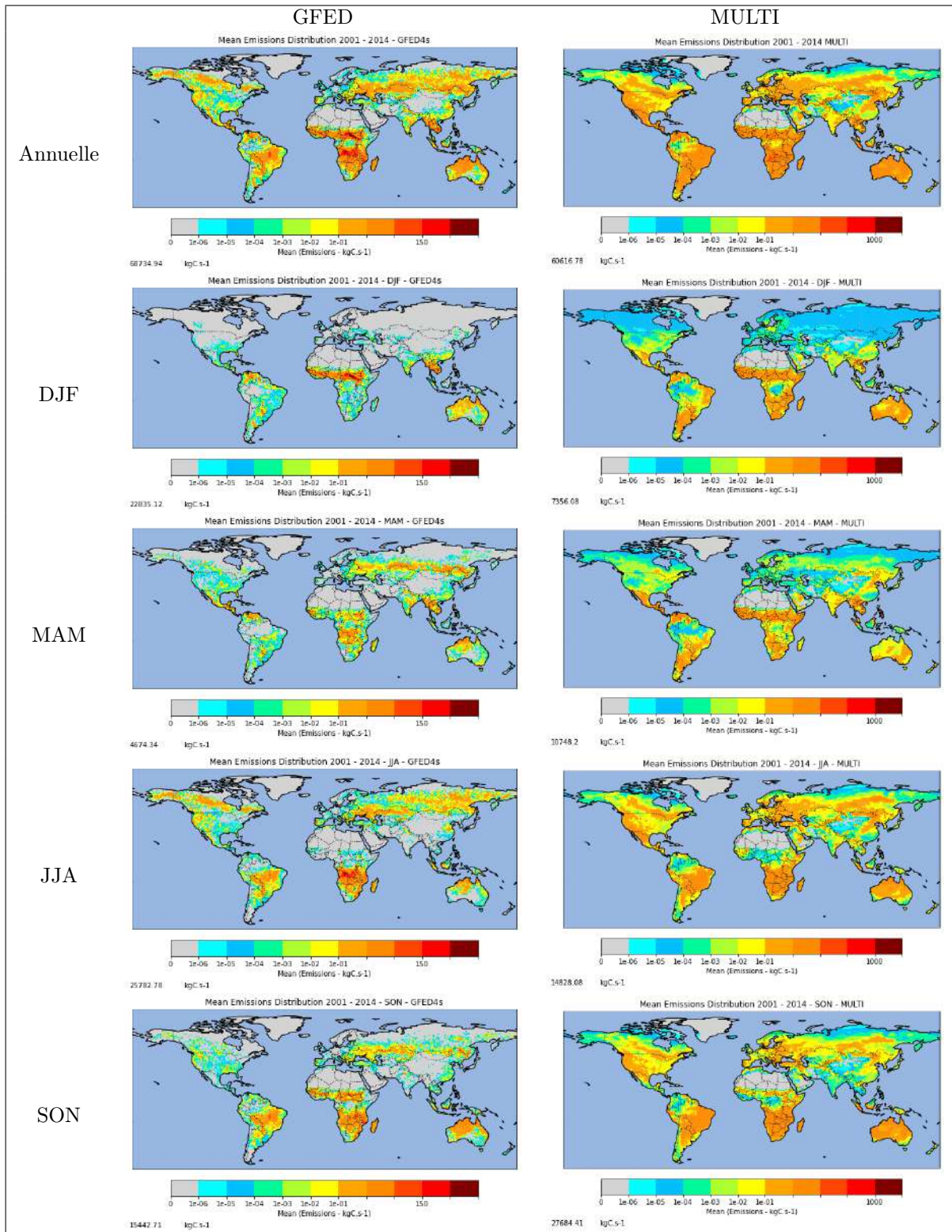


Figure 10: Moyenne globale saisonnière pour l'inventaire GFED et le multi-modèle

3.1.3 L'existence de biais

Les comparaisons précédentes permettent de mettre en évidence l'existence de biais entre les données simulées et les observations. Pour évaluer la significativité de ce biais nous avons utilisé la méthode du t-test. Dans le cadre d'une étude statistique où plusieurs tests sont réalisés, cette méthode n'est pas optimale comme le montre Wilks [69]. Dans cette même étude, il est proposé de rendre la technique du t-test beaucoup plus strict. Cette méthode est appelée test FDR. Pour le test FDR, dans un premier temps, la p-value de chaque maille est calculée via un test de Student. La p-value représente la probabilité de se tromper en attribuant de la significativité à un résultat qui n'est pourtant pas significatif. Un simple test de Student considère que toutes les mailles pour lesquelles la p-value est inférieure à une valeur seuil arbitraire α (habituellement définie au seuil de 0,05) sont significatives. Le test FDR, lui, détermine sa valeur seuil (p_{FDR}) en fonction de toutes les p-values de la grille. Pour cela, les p-values sont d'abord triées par ordre croissant puis la valeur seuil est déterminée par l'équation suivante :

$$p_{FDR} = \max_{i=1, \dots, N} [p(i) : p(i) \leq (i/N)\alpha_{FDR}] \quad (1)$$

Avec N le nombre de points sur la grille, $p(i)$ la p-value de chaque point et α_{FDR} le niveau de contrôle du test (égal à 0,1). La figure suivante (11) illustre la réalisation d'un test FDR. Nous pouvons observer que l'ensemble des valeurs se situant sous la courbe rouge sont significatives au seuil de 10%.

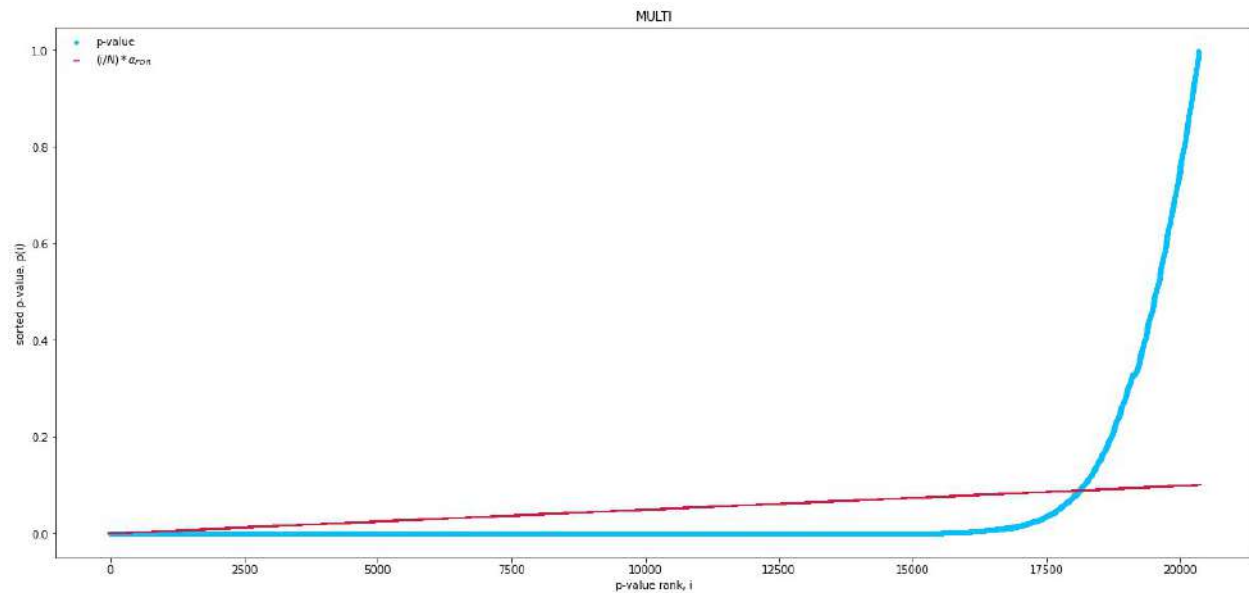


Figure 11: Exemple de test FDR réalisé au cours du stage

D'abord, nous pouvons remarquer que le biais global est toujours positif. De même, les biais sont répartis spatialement de façon identique entre le modèle du CNRM et le modèle du NCAR. Or, comme nous l'avons précédemment évoqué, ces modèles sont très différents dans la manière dont ils intègrent leur schéma de surfaces brûlées propre. Par conséquent, la présence d'un schéma très simplifié au sein du modèle CNRM-ESM2-1 n'est pas préjudiciable concernant la spatialisation des biais indiqués.

Par ailleurs, nous remarquons que chacun des deux modèles dispose d'une force propre. En ce sens, les simulations du modèle CNRM-ESM2 sont plus biaisées que les simulations issues du modèle du NCAR pour représenter les surfaces brûlées, notamment sur les régions de l'océanie, aux hautes latitudes ou en Amérique du Nord. Cependant, concernant les émissions, c'est le contraire qui émerge puisque le modèle du CNRM est moins biaisé (-1409 kgC.s^{-1}) que le modèle du NCAR ($-14826 \text{ kgC.s}^{-1}$) (Figure 12).

Concernant les surfaces brûlées, les simulations sous évaluent globalement les surfaces brûlées ayant lieu en Afrique centrale et en Afrique du Sud. Or, ces deux zones représentent 70% des surfaces brûlées mondiales. A l'inverse, les feux américains sont globalement sur-représentés.

Concernant les émissions carbonées liées aux surfaces brûlées, nous pouvons remarquer qu'elles reprennent la répartition spatiale des surfaces brûlées. Ceci est cohérent puisqu'elles sont issues d'un coefficient appliqué au ratio d'espace incendié.

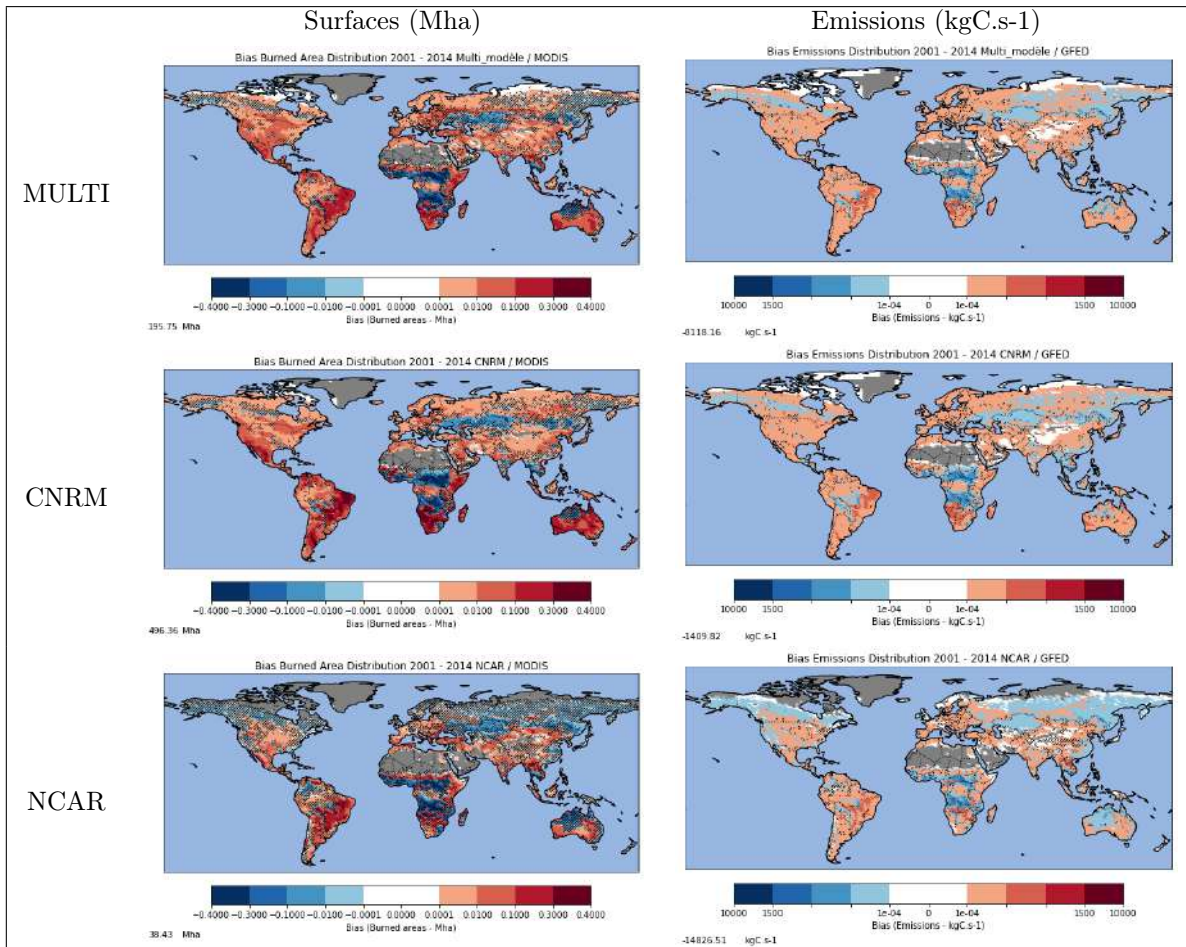


Figure 12: Biases de simulation au sein du modèle du CNRM, du modèle du NCAR et du multi modèle, les zones grises sont non-significatives au seuil de 10% en utilisant le test de Wilks

Malgré la présence de ces biais dans les simulations analysées, nous pouvons remarquer que le ratio (13) de surfaces brûlées par rapport à la quantité d'émission carbone est correctement respectée entre les

observations et les simulations. Cependant, nous pouvons remarquer une différence plus prononcée des données simulées pour l'année 2012.

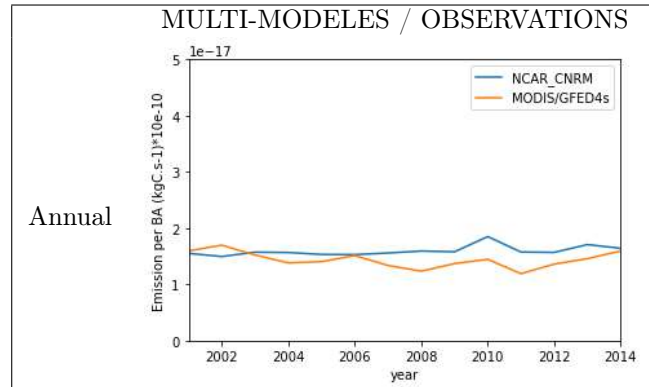


Figure 13: Série temporelle comparant la quantité d'émission carbonnée par surfaces brûlées entre les sorties multi-modèles et les observations

Enfin, il est légitime de se demander si ces biais ne proviennent pas de l'incertitude globale liée au couplage entre un modèle de surface et un modèle d'atmosphère. Pour vérifier cela, nous avons analysé les biais provenant de simulations non couplées. Nous pouvons remarquer sur la figure (14) que les écarts entre les observations et les simulations restent similaire. Nous pouvons par conséquent en conclure que les biais présents sont uniquement issus des différents schémas de surfaces brûlées proposés.

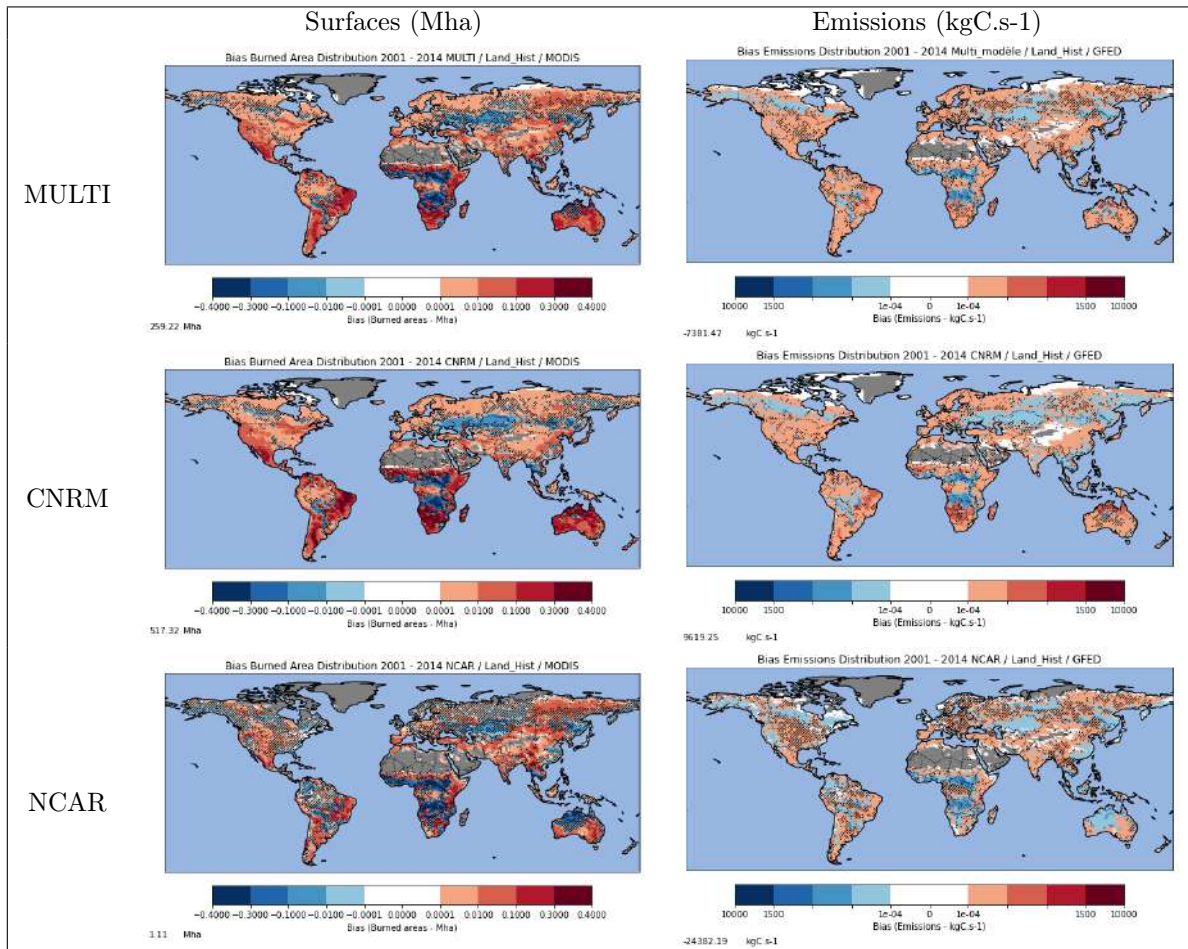


Figure 14: Biases de simulation land-hist au sein du modèle du CNRM, du modèle du NCAR et du multi modèle, les zones grises sont non-significatives au seuil de 10% en utilisant le test de Wilks

4 Les projections climatiques

4.1 Les projections en moyenne globale

La figure 15 représente pour chaque modèle étudié les séries temporelles exprimées en *Mha* pour les surfaces brûlées entre 1850 et 2100 et les séries temporelles exprimée en *Mha* pour les émissions carbonées exprimée en $kgC.s^{-1}$ qui leurs sont liées pour la même période. Nous pouvons tout d'abord remarquer que le modèle CNRM-ESM2-1 simule à la fois une diminution des surfaces brûlées mais également des émissions pour l'ensemble des SSP.

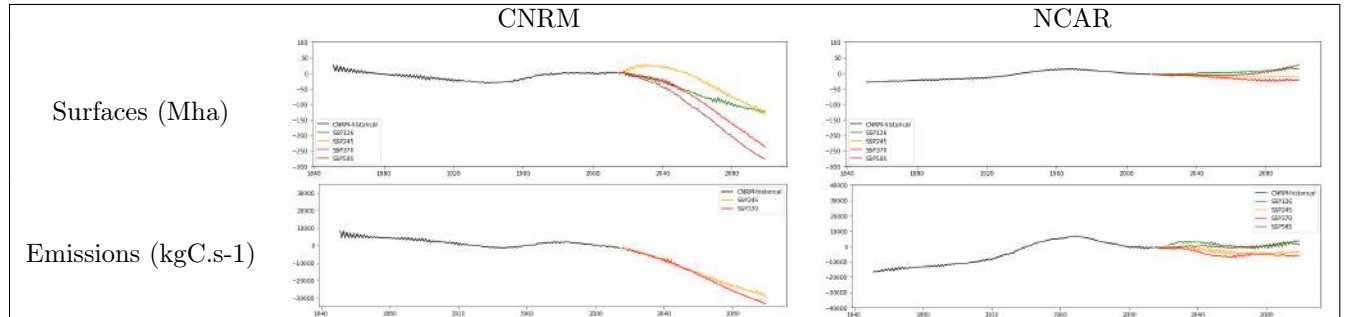


Figure 15: Série temporelles présentant la variables de surfaces brûlées entre 1850 et 2100 suivant différent scénarios SSP. Un filtre passe-bas est utilisé pour observer la tendance. La couleur verte représente le scénario SSP126, le jaune représente le scénario SSP245, le rouge représente le scénario SSP370 et la couleur violette représente le scénatio SSP585

Contrairement au modèle du CNRM, le modèle américain simule lui une augmentation très légère des surfaces brûlées et de leurs émissions associées par rapport à la période 1980 - 2010. Nous voyons pour le modèle du CNRM et pour les scénarios SSP245 et SSP370 les choses suivantes. D'abord, concernant les surfaces brûlées le scénario SSP245 montre une diminution de 156 Mha et le scénario SSP370 présente une diminution de -278 Mha. Ensuite, concernant les émissions carbonnées le scénario SSP245 montre une diminution de $-12\,300\,kgC.s^{-1}$ et le scénario SSP370 montre une diminution de $-18\,000\,kgC.s^{-1}$. Nous voyons pour le modèle du NCAR et pour les scénarios SSP245 et SSP370 les choses suivantes. D'abord, concernant les surfaces brûlées le scénario SSP245 montre une augmentation de 17 Mha et le scénario SSP370 présente une diminution de - 44 Mha. Ensuite, concernant les émissions carbonnées le scénario SSP245 montre une augmentation de $5200\,kgC.s^{-1}$ et le scénario SSP370 montre une augmentation de $1750\,kgC.s^{-1}$.

4.2 Les projections à l'échelle régionale

Les figures suivantes (16) et (17) montrent l'évolution futur des surfaces brûlées et des émissions carbonées liées aux surfaces brûlées simulée par le modèle du CNRM et celui du NCAR. Nous avons choisi de représenter ici les scénatios SSP 247 et 370.

Tout d'abord, nous observons sur la Figure (16) que le modèle du CNRM simule une décroissance des surfaces brûlées en fin de siècle par rapport à la période 1980 - 2010. En effet, il existe un gradient marqué entre l'hémisphère nord et l'hémisphère Sud. On remarque notamment que la croissance des surfaces brûlées est global au Nord de l'équateur et la décroissance est plus contrastée dans l'hémisphère Sud. En effet, si on remarque un signal de diminution sur le Nord de l'Océanie, sur l'Ouest africain et sur le Nord-Est de l'Amérique du Sud, on peut remarquer un signal contraire sur le l'Est de l'Amérique du Sud et le Sud de l'Océanie.

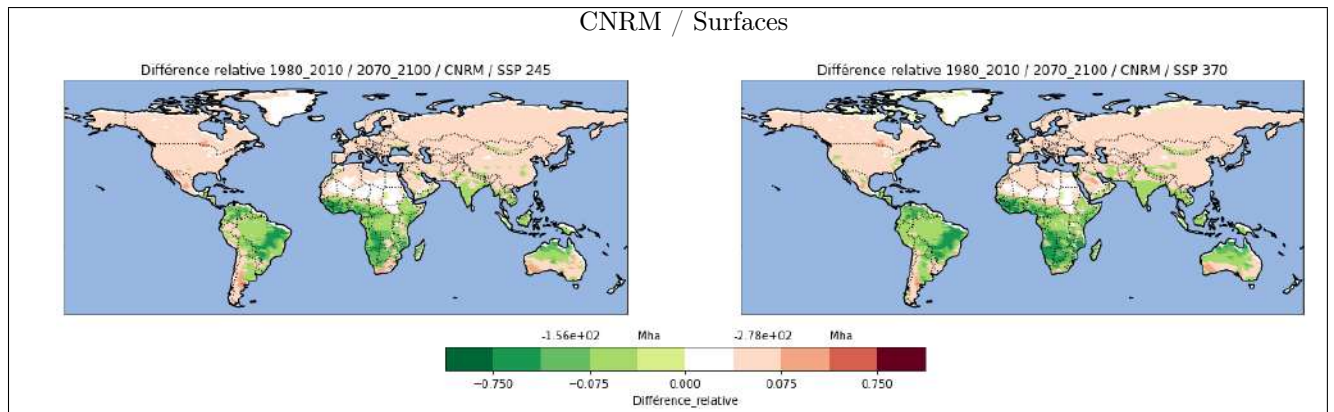


Figure 16: Différence relative de l'évolution des surfaces brûlées en fin de siècle dans le modèle du CNRM pour deux scénarios différents.

Deuxièmement, nous pouvons observer que, sous les mêmes conditions, la réponse du modèle du NCAR est beaucoup plus complexe (17). En effet, nous pouvons observer que le signal de décroissance des surfaces brûlées est beaucoup plus nuancé. En ce sens, nous remarquons qu'un couloir de croissance des surfaces brûlées apparaît en dessous du Sahara coupant le continent africain en deux. Ce couloir est beaucoup plus marqué dans le cadre du scénario SSP370 que dans le cadre du scénario SSP245. De même, ce couloir qui apparaît au sein des sorties du modèle du NCAR n'est pas présent au sein des sorties du modèle du CNRM.

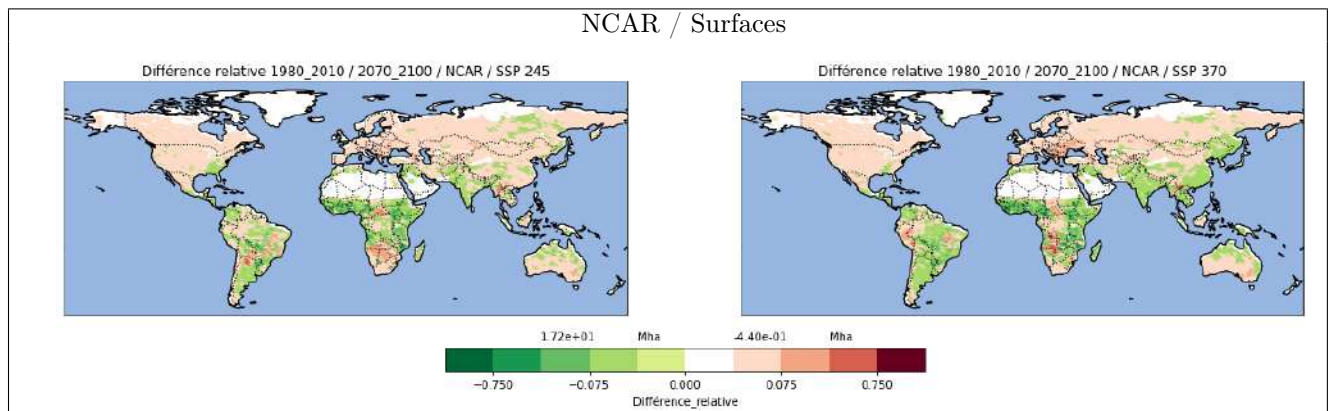


Figure 17: Différence relative de l'évolution des surfaces brûlées en fin de siècle dans le modèle du NCAR

Les figures suivantes (18) et (19) présentent l'évolution futur des émissions carbonées à l'échelle globale liées aux surfaces brûlées simulées dans le cadre des deux scénarios SSP précédemment utilisés.

Nous pouvons observer que pour le modèle du CNRM, les émissions suivent la même tendance décroissante que les surfaces brûlées. La répartition spatiale de l'évolution est également similaire à celle des surfaces brûlées simulés par le modèle. On note notamment une très forte diminution des émissions sur le continent Africain mais également en Amérique du Sud.

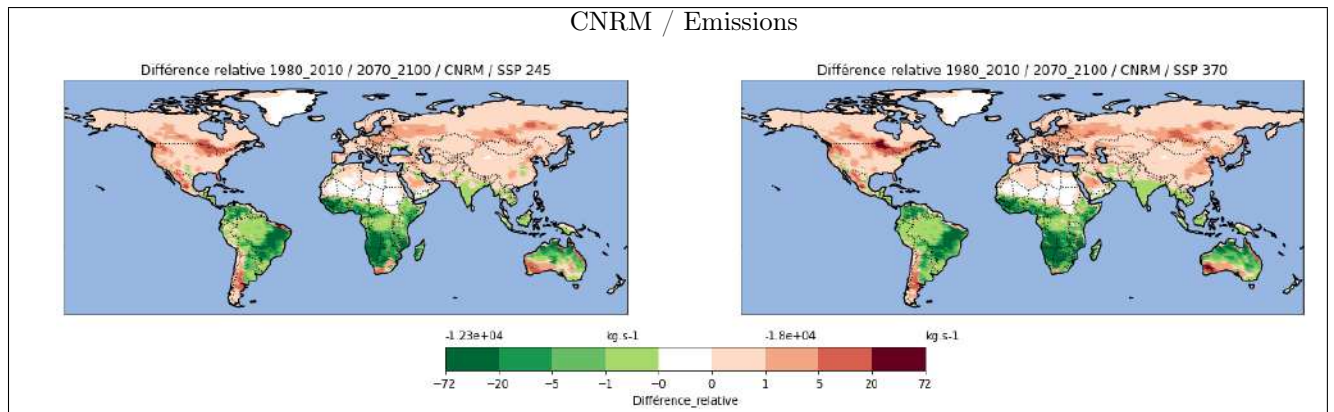


Figure 18: Différence relative de l'évolution des émissions carbonées issues des surfaces brûlées en fin de siècle dans le modèle du CNRM

Enfin, nous retrouvons une nouvelle fois la complexité observée précédemment dans la manière dont le modèle du NCAR simule les émissions en climat futur. Nous pouvons remarquer que la réponse pour la partie Nord de l'Amérique du Sud est différente en fonction du scénario observé. En ce sens, lorsque l'on s'intéresse au scénario SSP245, cette partie du globe voit ses émissions globalement augmenter. Or, le scénario SSP370 montre une évolution inversée sauf pour le Pérou.

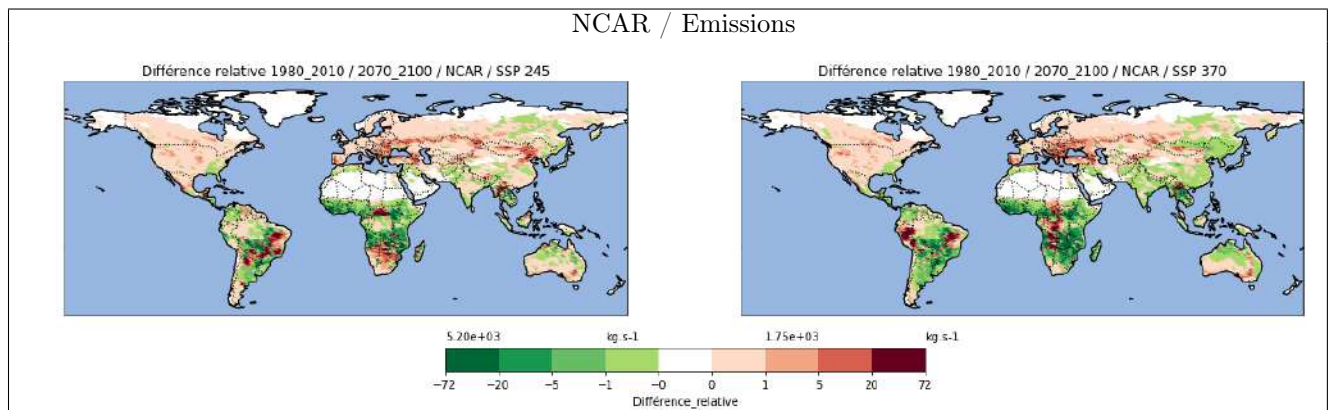


Figure 19: Différence relative de l'évolution des émissions carbonées issues des surfaces brûlées en fin de siècle pour le modèle du NCAR

4.3 Brève analyse de la réponse du modèle du CNRM

Cette diminution est en partie explicable par la façon dont est codé le modèle ISBA. En effet, nous savons que globalement l'humidité du sol diminue fortement en climat futur (20). La carte suivante présente la différence d'humidité dans les premières couches de la surface entre la période 1980 - 2010 et 2070 - 2100. Ici, nous avons multiplié la variable par la surface en m² de la maille sous-jacente.

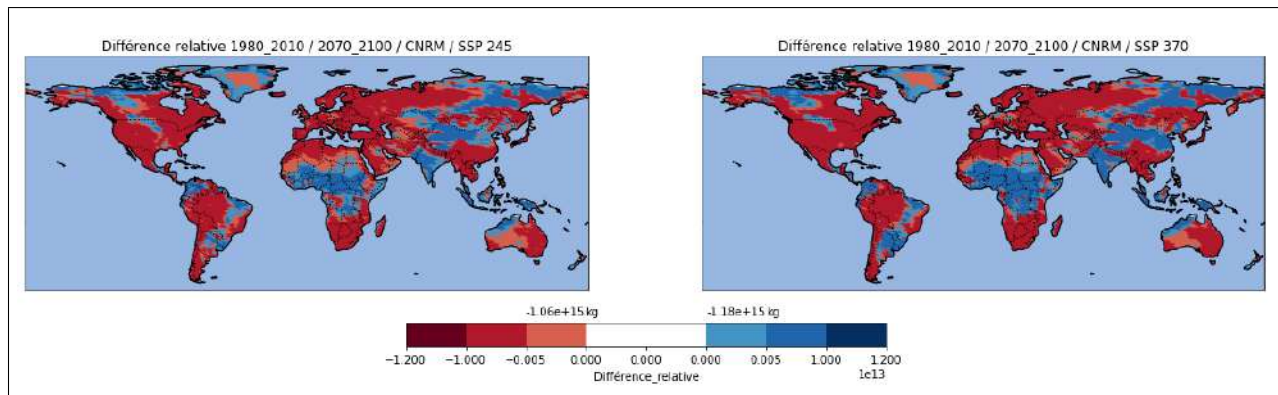


Figure 20: Différence relative de l'évolution de l'humidité de surface en fin de siècle dans le modèle du CNRM

Par ailleurs, les sorties du modèles du CNRM indiquent une augmentation globale positive de la litière comme nous pouvons le constater sur la carte ci-joint (21).

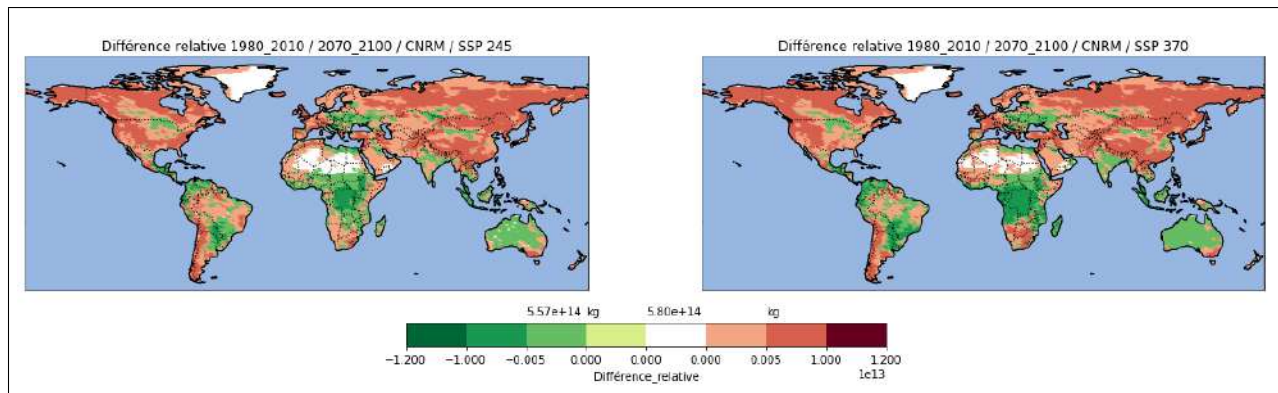


Figure 21: Différence relative de la litière en fin de siècle dans le modèle du CNRM

D'après la formule que nous avons précédemment commentée, la réponse attendue suite à l'accroissement de la quantité de litière et à la diminution de l'humidité de surface devrait être une augmentation des surfaces brûlées. Nous savons qu'il existe des biais importants sur la zone de l'Afrique centrale, de l'Afrique du Sud et de l'Amérique du Sud. Or, ce sont des zones où le modèle du CNRM simule une diminution du couvert végétal et une augmentation des différents types de culture (C3, C4 et irriguée). Nous pouvons observer cela sur les figures suivantes (22 , 23 :

D'abord, nous pouvons voir qu'il y a un accroissement des cultures de type C3 (riz,...) au niveau de l'Afrique et de l'Amérique du Sud. De même, nous observons une diminution de ce type d'agriculture dans l'hémisphère Nord sauf au niveau des latitudes boréales. En effet, dans ces zones, le scénario SSP245 montre une extension des zones agricoles de ce type.

CNRM / Culture cover

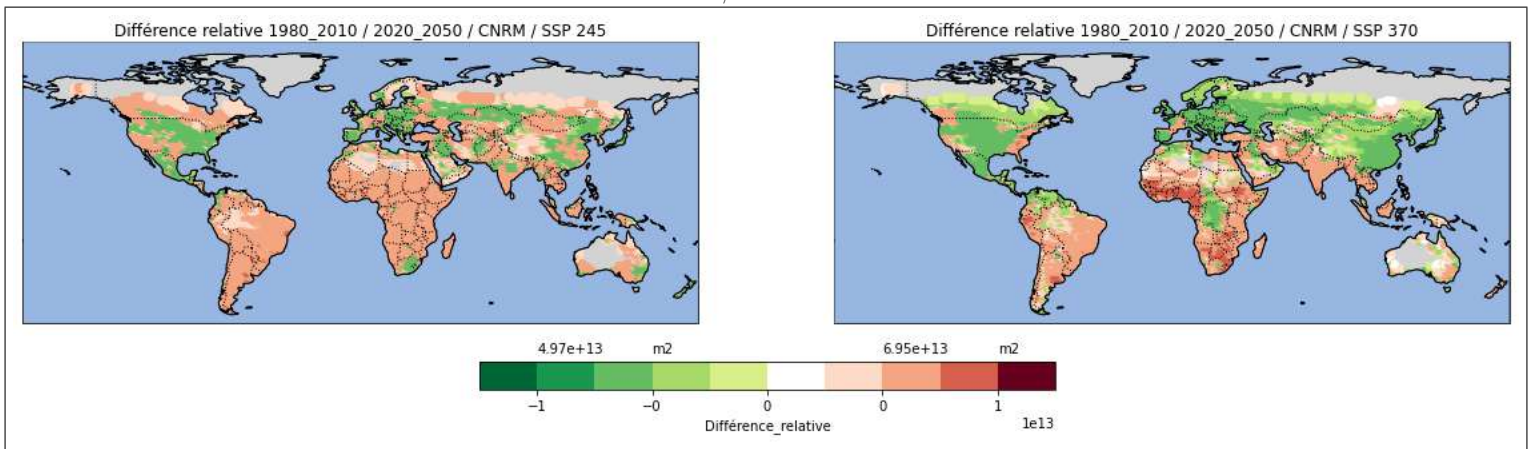


Figure 22: Différence relative de la quantité de surface cultivée en fin de siècle dans le modèle du CNRM

Ensuite, nous pouvons voir qu'il y a un accroissement des cultures de type C4 (maïs, sorgho, canne à sucre) au niveau de l'Afrique et de l'Amérique du Sud. De même, nous observons une diminution de ce type d'agriculture dans l'hémisphère Nord sauf au niveau des latitudes boréales. En effet, dans ces zones, le scénario SSP245 montre une extension des zones agricoles de ce type. Nous retrouvons des résultats identiques pour les cultures C4 et les cultures irriguées.

De même, nous pouvons remarquer que le couvert forestier tropical feuillu diminue très largement dans toute l'Afrique subsaharienne et dans une grande majorité de l'Amérique du Sud. Cette tendance continue également en fin de siècle pour ces mêmes régions. Nous retrouvons des résultats identiques pour l'ensemble des surfaces boisées tropicales du modèle ISBA.

CNRM / Tropical Forest cover

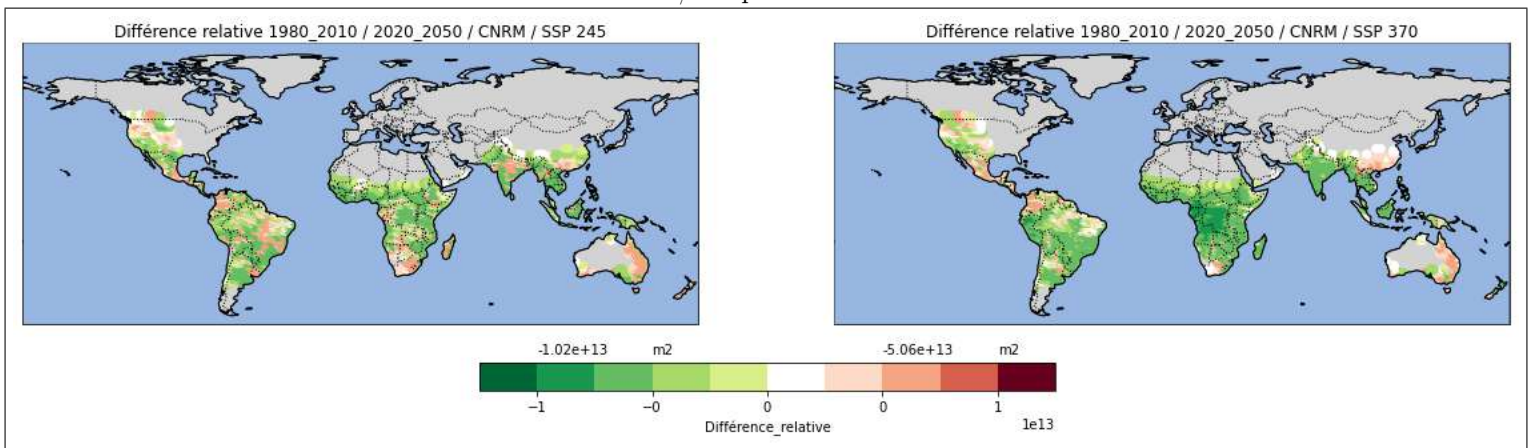


Figure 23: Différence relative de la quantité de couverture forestière tropicale en fin de siècle dans le modèle du CNRM

Conclusion

D’abord, il est un fait indéniable, seul l’inventaire d’émissions GFED est utilisé au cours de ce travail. En dépit de sa performance, il n’en demeure pas moins soumis à ses incertitudes propres. Aussi, une suite de ce mémoire pourrait être de continuer cette analyse en ajoutant des bases de données de références différentes. Nous pensons par exemple à l’inventaire GFAS qui est le produit d’émission des feux issu du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme.

Comme nous l’avons montré au cours de ce travail, simuler des surfaces brûlées dans les modèles de climat n’est pas chose aisée. En effet, de nombreux déterminants sont à prendre en compte pour les simuler. L’intérêt central de mon stage est d’avoir réaliser une évaluation de la représentation des surfaces brûlées et de leurs émissions carbonées au sein du modèle de surface ISBA. Nous avons montré l’existence de biais dans les simulations entre les données observées et les sorties de modèles. De même, nous avons remarqué qu’il existe aussi de grandes incertitudes entre le modèle du CNRM simulant les surfaces brûlées et le modèle développé au NCAR. Par ailleurs, nous avons pu relever le fait que l’un des facteurs pour lequel nous pouvons attribuer la décroissance des surfaces brûlées au sein du modèle du CNRM. Celle-ci serait attribuable pour partie à l’évolution du land-use vers un accroissement des surfaces agricoles qui ont une inflammabilité nulle au sein du modèle ISBA. Enfin, de part la relation mathématique existant entre les surfaces brûlées et les émissions carbonées, au sein du modèle ISBA, la cause de la diminution de ces dernières en climat futur est à incomber à la diminution des surfaces brûlées.

Une autre partie du problème réside dans l’impossibilité de donner une équation exacte pour représenter les comportements humains. Ceci accroît les incertitudes inhérentes à la modélisation. Or, si les modèles biophysiques mécanistes permettent de s’interroger sur la réponse du système Terre, ils ne permettent pas de prendre en compte la manière dont les comportements de la population vont évoluer par rapport aux feux. C’est ici que les modèles économiques trouvent leur principale raison d’être.

Les modèles économiques s’intéressant aux feux sont notamment issus de la communauté de l’économie forestière. Ce champ d’étude cherche à répondre à des questions différentes de celles que nous pourrions retrouver au sein des sciences du climat. Ainsi, une première question à laquelle ils tentent d’apporter une réponse est : comment les acteurs forestiers anticipent le futur ? Une seconde question à laquelle ils répondent est : devant ces anticipations quelles comportements économiques les acteurs forestiers vont-ils suivre ?

Ce sont des problématiques intéressantes puisque de leurs réponses découle une utilisation particulière de la ressource forestière. La ressource forestière mondiale est sous le coup de multiples législations et d’autant de status. Par conséquent, il est important de prendre en compte le mode de propriété de l’espace forestier considéré. En ce sens, une gestion publique aura des objectifs différents d’une gestion privée de la forêt. Dans le premier cas, la valeur des services écosystémiques attribués à l’espace pourra être considérée comme c’est le cas en France. Dans le second cas, la gestion de la forêt aura un cap multiple et varié [13] allant de l’usage économique pur au non-usage.

De même, les modèles climatiques standards ne peuvent pas simuler prospectivement l’impact du changement climatique sur l’industrie forestière et l’ensemble de sa chaîne de valeur. En France, l’INRAE (Institut national de recherche pour l’agriculture, l’alimentation et l’environnement) développe depuis 2010 [45] le modèle French Forest Sector Model (FFSM) pour tenter de répondre aux problématiques précédemment introduites. Des modèles de ce type sont absolument nécessaire pour mettre en place les politiques publiques adéquates.

Dans le cadre des feux de biomasse, deux papiers ont pu retenir notre attention. Tout d’abord, un article dirigé par l’INRAE [30] dont l’objectif est de quantifier l’impact des feux dans le contexte de changement climatique sur la filière bois dans le Sud de la France. Deuxièmement, un article sino-américain [62] qui traite de l’impact de plusieurs phénomènes météorologiques sur la filière bois en contexte de changement climatique et à l’échelle globale.

Ces deux études diffèrent des grandes études historiques sur la question. En effet, l'approche classique se concentre principalement sur les États-Unis en utilisant un modèle économique statique. Les premières conclusions étaient assez similaires aux travaux ultérieurs puisqu'elles modélisaient une augmentation de la production de bois en climat futur [53].

L'article sino-américain montre que l'évolution de la ressource en bois dans un contexte de changement climatique est spatialement différenciée. L'utilisation d'un modèle de dynamique végétal global permet de rendre cette analyse encore plus fine. Ainsi, la conclusion est ici que la production forestière augmente grâce à deux facteurs principaux. D'une part le modèle de végétation simule une augmentation naturelle de la biomasse forestière. D'autre part, la chute du prix du bois accroît l'activité économique forestière. Ici, l'impact des feux n'affecte pas négativement la masse globale de bois.

L'article de l'INRAE est très différent dans ces conclusions puisqu'il s'intéresse à une échelle beaucoup plus restreinte. En ce sens, le Sud-Est français connaît une augmentation des feux de biomasse qui impacte négativement la quantité de biomasse disponible. Contrairement à l'article sino-américain, les chercheurs abordent ici la question du stock de carbone mais également de la quantité de biomasse transformée en gaz à effet de serre.

Par conséquent, si la résolution d'étude diffère le résultat principal de ces papiers est qu'il est possible de coupler des modèles économiques et des modèles de végétation [62] ou de climat/feux [30] pour aborder la question des interactions entre phénomènes naturels et comportement des agents.

Bibliographie

- [1] Andela et al. “A human-driven decline in global burned area.” **in***Science*: (2017).
- [2] Arora et al. “Fire as an interactive component of dynamic vegetation models.” **in***Biogeosciences*: (2005).
- [3] Attiwill et al. “Exploring the mega-fire reality: A ‘Forest Ecology and Management’ conference.” **in***Forest Ecology and Management*: (2013).
- [4] Ausset et al. “Qu’est-ce qu’une particule ?.” **in**<https://www.ineris.fr/fr/risques/dossiers-thematiques/qualite-air/qualite-air-ambiant/pollution-atmospherique-particules>: (2021).
- [5] Bond et al. “The global distribution of ecosystems in a world without fire.” **in***New Phytologist*: (2004).
- [6] Buma et al. “Short-interval fires increasing in the Alaskan boreal forest as fire self-regulation decays across forest types.” **in***Nature*: (2022).
- [7] Carvalho et al. “A Tropical Rain-Forest Clearing Experiment By Biomass Burning in the Manaus Region.” **in***Atmospheric Environment*: (1995).
- [8] Cattau et al. “Anthropogenic and lightning-started fires are becoming larger and more frequent over a longer season length in the U.S.A..” **in***Global Ecology and Biogeography*: (2020).
- [9] D’antonio et al. “Biological Invasions by Exotic Grasses, the Grass/Fire Cycle, and Global Change.” **in***Annual Review of Ecology and Systematics*: (1992).
- [10] Danabasoglu et al. “The Community Earth System Model Version 2 (CESM2).” **in***Journal of Advances in Modeling Earth Systems*: (2020).
- [11] Danabasoglu et al. “The Community Land Model Version 5: Description of New Features, Benchmarking, and Impact of Forcing Uncertainty.” **in***Journal of Advances in Modeling Earth Systems*: (2019).
- [12] Delire et al. “The Global Land Carbon Cycle Simulated With ISBA-CTRIP: Improvements Over the Last Decade.” **in***Journal of Advances in Modeling Earth Systems*: (2020).
- [13] Ficko et al. “European private forest owner typologies: A review of methods and use.” **in***Forest Policy and Economics*: (2019).
- [14] Field et al. “Global Net Primary Production: Combining Ecology and Remote Sensing.” **in***Remote Sensing of Environment*: (1994).
- [15] Forster et al. “Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing.” **in***IPCC*: (2007).
- [16] Grant et al. “What do you mean, ‘megafire’?.” **in***Global ecology and biogeography*: (2022).
- [17] Jin et al. “Fire-induced albedo change and its radiative forcing at the surface in northern Australia.” **in***Annalen der Physik*: (2005).
- [18] Kelley et al. “How contemporary bioclimatic and human controls change global fire regimes.” **in***Nature Climate Change*: (2019).
- [19] Krylov et al. “Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011.” **in***Earth System Science Data*: (2014).
- [20] Li et al. “A process-based fire parameterization of intermediate complexity in a Dynamic Global Vegetation Model.” **in***Biogeosciences*: (2012).
- [21] Li et al. “Role of fire in the global land water budget during the twentieth century due to changing ecosystems.” **in***Journal of Climate*: (2017).
- [22] Mallet et al. “Direct and semi-direct radiative forcing of biomass burning aerosols over the Southeast Atlantic (SEA) and its sensitivity to absorbing properties : a regional climate modeling study.” **in***Atmospheric Chemistry Physics*: (2020).

- [23] Menut et al. “Impact of Landes forest fires on air quality in France during the summer 2022.” **in***EGUsphere*: (2023).
- [24] Pai et al. “An evaluation of global organic aerosol schemes using airborne observations.” **in***Atmospheric Chemistry and Physics*: (2020).
- [25] Pauw et al. “Quantification of an efficiency–sovereignty trade-off in climate policy.” **in***Nature*: (2020).
- [26] Pauw et al. “Subtle differentiation of countries’ responsibilities under the Paris Agreement.” **in***Nature*: (2019).
- [27] Pogson et al. “Effect of spatial data resolution on uncertainty.” **in***Environmental Modelling Software*: (2015).
- [28] Ramanathan et al. “Effects of Aerosol–Induced Snow Albedo Feedback on the Seasonal Snowmelt Over the Himalayan Region.” **in***Water Resources Research*: (2022).
- [29] Riahi et al. “The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview.” **in***Global Environmental Change*: (2017).
- [30] Rivière et al. “A Bioeconomic Projection of Climate-Induced Wildfire Risk in the Forest Sector.” **in***Earth’s Future*: (2022).
- [31] Rivière et al. “Mapping territorial vulnerability to wildfires: A participative multi-criteria analysis.” **in***Forest Ecology and Management*: (2023).
- [32] Séférian et al. “Evaluation of CNRM Earth System Model, CNRM-ESM2-1: Role of Earth System Processes in Present-Day and Future Climate.” **in***Journal of Advances in Modeling Earth Systems*: (2019).
- [33] Solmon et al. “West African monsoon precipitation impacted by the South Eastern Atlantic biomass burning aerosol outflow.” **in***Nature*: (2021).
- [34] Stief et al. “Slash and Burn Agriculture Explained .” **in***ThoughtCo.*: (2019).
- [35] Su et al. “Global all-sky shortwave direct radiative forcing of anthropogenic aerosols from combined satellite observations and GOCART simulations.” **in***Journal of Geophysical Research*: (2013).
- [36] Tang et al. “Biomass-burning-induced surface darkening and its impact on regional meteorology in eastern China.” **in***Atmospheric Chemistry and Physics*: (2019).
- [37] Thonicke et al. “The influence of vegetation, fire spread and fire behaviour on biomass burning and trace gas emissions: results from a process-based model.” **in***Biogeosciences*: (1991).
- [38] Thonicke et al. “The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into a Dynamic Global Vegetation Model.” **in***Global Ecology Biogeography*: (2001).
- [39] Wiedinmyer et al. “The Fire Inventory from NCAR version 2.5: an updated global fire emissions model for climate and chemistry applications.” **in***EGUsphere*: (2023).
- [40] Williams et al. “FINDINGS AND IMPLICATIONS FROM A COARSE-SCALE GLOBAL ASSESSMENT OF RECENT SELECTED MEGA-FIRES.” **in***5th INTERNATIONAL WILDLAND FIRE CONFERENCE*: (2011).
- [41] Xie et al. “Tripling of western US particulate pollution from wildfires in a warming climate.” **in***PNAS*: (2022).
- [42] Zubkova et al. “Is global burned area declining due to cropland expansion? How much do we know based on remotely sensed data?.” **in***Remote sensing*: (2022).
- [43] Nakata et Ashina. “Analysis of the impact of technological innovation to reduce CO2 emission for global environment.” **in**(2003).

- [44] Cattiaux. “Climat et Changement Climatique.” **in**(2021).
- [45] Caurla. “The French forest sector model: version 1.0. Presentation and theoretical foundations.” **in***Laboratoire d’Economie Forestière*: (2010).
- [46] Demir. “Basic Concepts of Public Policy.” **in***Springer Link*: (2021).
- [47] Frazier. “MODIS Data Product Non-Technical Description - MOD 14 + <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/non>” **in**(2023).
- [48] IPCC. “AR2: The Science of Climate Change.” **in**(1995).
- [49] IPCC. “AR4: The Science of Climate Change.” **in**(2007).
- [50] IPCC. “AR5: The Science of Climate Change.” **in**(2013).
- [51] Koechlin. “Flora and vegetation of Madagascar.” **in***Annual Review of Ecology and Systematics*: (1972).
- [52] Magne. “Paléo-incendies et changements climatiques dans les forêts boréales nord-européennes au cours de l’Holocène.” **in**(2022).
- [53] Sohngen et Mendelsohn. “Valuing the Impact of Large-Scale Ecological Change in a Market: The Effect of Climate Change on U.S. Timber.” **in***American Economic Review*: (1998).
- [54] Morissey. “International Encyclopedia of Human Geography (Second Edition).” **in**(2020).
- [55] Mucina. “Biome: evolution of a crucial ecological and biogeographical concept.” **in***New Physiologist*: (2018).
- [56] Nordhaus. “An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases.” **in**(1992).
- [57] Pascual. “Valuing nature’s contributions to people: the IPBES approach.” **in***Mcmillan*: (2017).
- [58] Pearce. “An Intellectual History of Environmental Economics.” **in***Annual Review of Energy and the Environment*: (2002).
- [59] Pigou. “The economics of welfare.” **in***Mcmillan*: (1932).
- [60] Ramanathan. “Trace gas trends and their potential role in climate change.” **in**(1985).
- [61] Sargent. “Verification and validation of simulation models.” **in***Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*: (2011).
- [62] Tian. “Global climate change impacts on forests and markets.” **in***IOPScience*: (2015).
- [63] Delattre et Veron. “Taux d’actualisation public et calcul économique.” **in***Diagnostics Prévisions et Analyses Économiques*: (2005).
- [64] van Wees et al. “Model data for “Global biomass burning fuel consumption and emissions at 500-m spatial resolution based on the Global Fire Emissions Database (GFED).” **in**(2022).
- [65] van Wees et al. “Modelling biomass burning emissions and the effect of spatial resolution: a case study for Africa based on the Global Fire Emissions Database (GFED).” **in***Geoscientific Model Development*: (2019).
- [66] van Wees et al. “West African monsoon precipitation impacted by the South Eastern Atlantic biomass burning aerosol outflow.” **in***Climate and Atmospheric Science*: (2019).
- [67] van der Werf et al. “Global fire emissions estimates during 1997–2016.” **in***Earth System Science Data*: (2017).
- [68] Whittaker. “Communities and ecosystems.” **in***Macmillan*: (1970).
- [69] Wilks. “A process-based fire parameterization of intermediate complexity in a Dynamic Global Vegetation Model.” **in***Bulletin of the American Meteorological Society*: (2016).
- [70] Zheng. “Increasing forest fire emissions despite the decline in global burned area.” **in**(2021).