



L'AGRICULTURE ET LES SYSTÈMES ALIMENTAIRES DU MONDE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Enjeux pour les Suds

Vincent Blanfort, Julien Demenois,
Marie Hrabanski, coord.

éditions
Quæ

L'agriculture et les systèmes alimentaires du monde face au changement climatique

Enjeux pour les Suds

Vincent Blanfort, Julien Demenois,
Marie Hrabanski, coordinateurs

Éditions Quæ

Sur la même thématique aux Éditions Quæ

Agriculture et changement climatique. Impacts, adaptation et atténuation

Philippe Debaeke, Nina Graveline, Barbara Lacor, Sylvain Pellerin, David Renaudeau, Éric Sauquet, coord. Collection Synthèses, 2025, 398 p.

Forêts et changement climatique.

Comprendre et modéliser le fonctionnement hydrique des arbres

François Courbet, Claude Doussan, Jean-Marc Limousin, Nicolas Martin-StPaul, Guillaume Simioni. Collection Synthèses, 2022, 144 p.

Les productions fruitières à l'heure du changement climatique.

Risques et opportunités en régions tempérées

Jean-Michel Legave, coord. Collection Synthèses, 2022, 464 p.

Pour citer cet ouvrage :

Blanfort V., Demenois J., Hrabanski M., 2025. *L'agriculture et les systèmes alimentaires du monde face au changement climatique. Enjeux pour les Suds*, Versailles, éditions Quæ, 416 p. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-4009-8>

Les éditions Quæ réalisent une évaluation scientifique des manuscrits avant publication (<https://www.quae.com/store/page/199/processus-d-evaluation>).

La procédure d'évaluation est décrite dans Prism

(<https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/25780>).

Le processus éditorial s'appuie également sur un logiciel de détection des similitudes et des textes potentiellement générés par IA.

Les versions numériques de cet ouvrage sont diffusées sous licence CC-by-NC-ND 4.0

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

La diffusion en accès ouvert de cet ouvrage a été soutenue par la Direction générale à la recherche et à la stratégie (DGD-RS) du Cirad.

Éditions Quæ
RD 10, 78026 Versailles cedex
www.quae.com – www.quae-open.com

© Éditions Quæ, 2025

ISBN papier : 978-2-7592-4008-1

ISBN epub : 978-2-7592-4010-4

ISBN PDF : 978-2-7592-4009-8

Chapitre 4

Atlas des agricultures du monde et des systèmes alimentaires face au changement climatique

*Vincent Blanfort¹, Julien Demenois¹, Marie Hrabanski¹, Nicolas Viovy^{2,5},
Jacques André Ndione², Moussa Waongo², Maguette Kaire², Lilian Blanc³,
Sylvain Schmitt³, Séverine Bouard⁴, Catherine Sabinot⁴, Pierre-François Duyck⁴,
Philippe Birnbaum⁴, Audrey Leopold⁴, Julien Drouin⁴, Fabian Carriconde⁴,
Laurent L'Huillier⁴, Christophe Menkès⁴*

¹ Atlas ; ² Afrique ; ³ Amérique centrale et du Sud ; ⁴ Petits États et territoires insulaires d'Océanie ; ⁵ Europe et Amérique du Nord.

1. Introduction et méthodes

Vincent Blanfort, Julien Demenois, Marie Hrabanski

L'atlas présenté dans cet ouvrage analyse les enjeux du changement climatique pour les systèmes agri-alimentaires au prisme d'abord (1) des émissions de GES, puis (2) des impacts du changement climatique sur le secteur des terres, ensuite (3) de la question des effets du changement climatique et des enjeux d'atténuation et enfin (4) en adoptant une analyse par grandes régions.

1.1. Les émissions de GES des systèmes agri-alimentaires

Nous avons d'abord souhaité rappeler que si les systèmes agri-alimentaires sont responsables de près d'un tiers des émissions de GES (Crippa *et al.*, 2021 ; Rosenzweig *et al.*, 2020 ; Tubiello *et al.*, 2022), ce chiffre global recouvre des disparités fortes et parfois contre-intuitives comme l'illustre la figure 4.1. Celle-ci rappelle en effet que le principal continent émetteur de GES d'origine agricole est bien l'Asie avec près de 39 % de l'ensemble des GES d'origine agricole. La riziculture y génère d'importantes quantités de méthane ainsi que l'utilisation intensive d'engrais azotés. Les exportations de produits agricoles entraînent des émissions supplémentaires dues au transport. Les Amériques constituent le deuxième continent émetteur de GES (30 %). Au sein de ce continent américain, les systèmes agricoles intensifs des États-Unis et du Canada (notamment tournés vers la culture du maïs et du soja) pour l'alimentation animale sont à l'origine d'une empreinte carbone élevée, qui s'explique aussi par le transport sur de longues distances de ces produits et par la forte consommation de produits transformés. En Amérique latine, 50 % à 60 % des émissions proviennent du secteur agricole, notamment au Brésil et en Argentine, grands exportateurs de bœuf et de soja.

En Afrique, l'empreinte carbone des systèmes agricoles et alimentaires, au regard de la population et de la production alimentaire, est étonnamment élevée (15 % des émissions mondiales du secteur), et s'explique principalement par le changement d'usage des terres (déforestation en Afrique centrale) et par la faible productivité de l'agriculture. Ces chiffres globaux masquent toutefois une grande diversité géographique. L'Afrique centrale est responsable de 35 % des émissions de GES liées aux systèmes alimentaires du continent, devant l'Afrique de l'Ouest, responsable de 28 % de celles-ci. L'Afrique du Nord ne représente que 12 % du total. Bien que les pratiques agricoles en Europe soient plus efficaces (13,7 % des émissions d'origine agricole) et que l'UE mette l'accent sur les politiques climatiques, l'élevage reste une source majeure d'émissions également liées à la transformation alimentaire et à ses chaînes de transport. Enfin, en Océanie, l'utilisation des terres pour le pâturage extensif est une source d'émissions, bien que la population relativement faible en limite l'impact global.

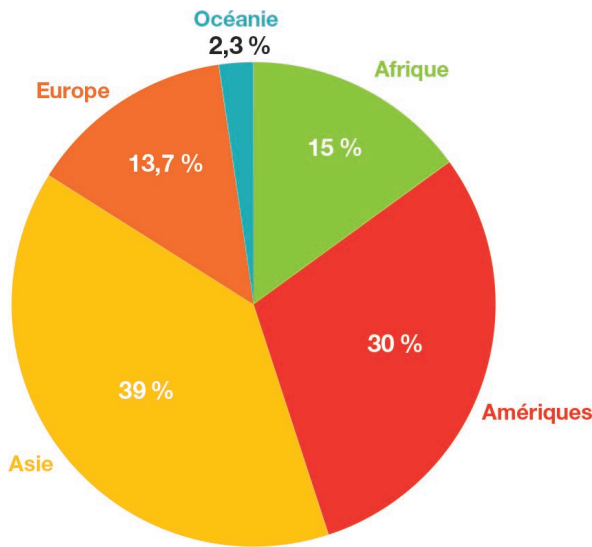


Figure 4.1. Part des émissions moyennes d'éqCO₂ (AR5) des systèmes agricoles et alimentaires par continent entre 1990 et 2021. Source : FAO (2024).

Une fois ces chiffres globaux précisés, nous avons souhaité prolonger l'analyse dans la section suivante afin d'appréhender plus précisément les différents enjeux liés aux émissions des systèmes agri-alimentaires. Les dix premières cartes proposées (cartes 1 à 10) sont issues de la base de données FAOSTAT (FAO, 2024) et représentent la moyenne des émissions de la période 1990-2021 par pays. Elles visent à préciser les enjeux liés aux émissions du secteur agri-alimentaire (des étapes de préproduction, aux étapes de production et de postproduction) en utilisant des variables différentes (émissions par pays, par habitant, à chacune des étapes du système agri-alimentaire, etc.).

Les émissions proviennent en effet de multiples sources (encadré 4.1) et varient en fonction des facteurs biophysiques, biogéographiques, des systèmes de production, des pratiques agricoles, des types d'aliments produits et consommés et des systèmes de gestion des déchets. Comme le rappelle le graphique de la FAO ci-dessous

(figure 4.2), la moitié des émissions est imputable aux activités de production au sein de la ferme (*farm gate*). Additionnées aux émissions de GES liées au changement d'utilisation des terres, les émissions sur les terres agricoles produisent près des deux tiers des émissions des systèmes agri-alimentaires. Les activités de préproduction et de postproduction constituent toutefois une part croissante des émissions de ces systèmes.

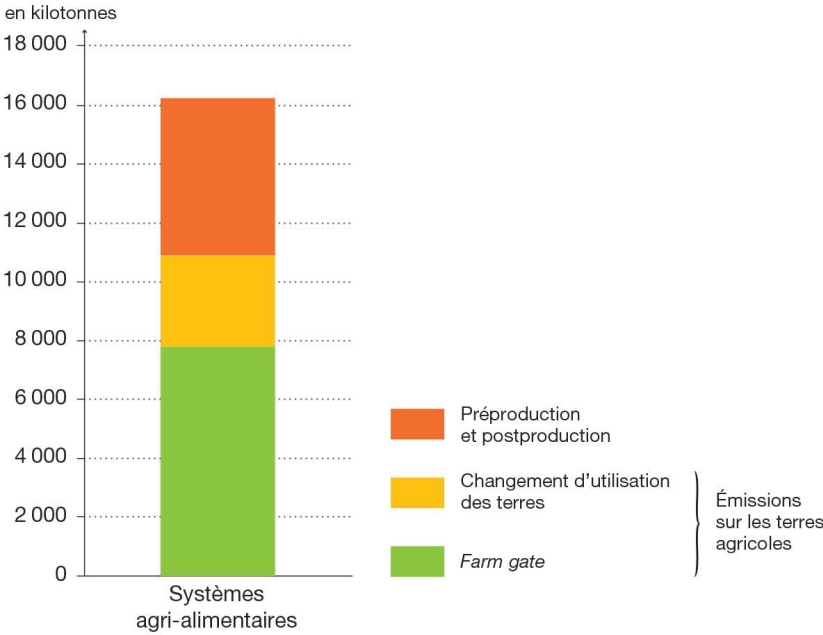


Figure 4.2. Moyennes des émissions de CO₂ par secteur (en kt eqCO₂), entre 1990 et 2021.
Source : FAO (2024).

Les catégories utilisées pour distinguer les émissions produites par le changement d'utilisation des terres, les émissions produites à l'échelle de la ferme ou encore les émissions relatives aux étapes de préproduction et de postproduction sont issues des découpages utilisés par la FAO (voir chapitre introductif, tableau 0.1).

1.2. Les impacts du changement climatique sur le secteur des terres

La section suivante, portant sur les impacts du changement climatique sur le secteur des terres, propose par le biais de la carte 11 construite à partir du rapport 2023 du Giec d'appréhender plus précisément les impacts du changement climatique sur la productivité agricole et sur les vulnérabilités climatiques.

1.3. Le stockage du carbone

Dans la section suivante, c'est la question du carbone, de son stockage, de ses flux et de sa séquestration par le secteur des terres qui est abordée au travers de six cartes distinctes (cartes 12 à 17), réalisées à partir des données du Partenariat mondial pour les sols, des plateformes Impact4Soil et Global Forest Watch.

Encadré 4.1. Types de GES et potentiels de réchauffement global

La tonne équivalent CO_2 (eqCO_2) est une unité introduite dans l'AR1 du Giec (IPCC, 1990) permettant de cumuler, après conversion, les émissions des différents gaz à effet de serre (GES).

Cette unité se fonde sur le potentiel de réchauffement global (PRG) qui est un indice de comparaison associé à un GES, qui quantifie sa contribution marginale au réchauffement climatique comparativement à celle du dioxyde de carbone (CO_2), cela sur une certaine période choisie. En d'autres termes, le PRG d'un gaz est le rapport entre les effets causés par la libération en début de période d'une masse donnée de ce gaz et ceux causés par la même masse de dioxyde de carbone (CO_2). Par définition, le PRG du CO_2 est donc toujours égal à 1. Les effets respectifs sont volontairement calculés sur une période choisie au-delà de laquelle les effets résiduels sont ignorés. La période la plus fréquemment utilisée est celle de cent ans. On parle alors de PRG100.

D'autres gaz, comme le méthane (CH_4) ou le protoxyde d'azote (N_2O), ont un PRG beaucoup plus élevé que celui du CO_2 , car ils sont plus efficaces pour piéger la chaleur dans l'atmosphère, même s'ils y sont moins abondants :

- le méthane (CH_4) : PRG ≈ 28 fois plus élevé que celui du CO_2 sur cent ans (selon le 6^e rapport du Giec). En d'autres termes, l'émission d'une tonne de CH_4 équivaut à l'émission de 28 tonnes de CO_2 . Par rapport aux principaux GES, le CH_4 a une durée de vie dans l'atmosphère courte. Ainsi, dans son 6^e rapport d'évaluation (2021), le Giec l'estime à 11,8 ans ;
- le protoxyde d'azote (N_2O) : PRG ≈ 273 fois plus élevé que celui du CO_2 sur cent ans (selon le 6^e rapport du Giec). En d'autres termes, l'émission d'une tonne de N_2O équivaut à l'émission de 273 tonnes de CO_2 . Le N_2O a une durée de vie longue dans l'atmosphère, le Giec l'estime à 109 ans.

Par ailleurs, les émissions de GES peuvent être exprimées en kilotonnes (kt), en mégatonnes (Mt ou million de tonnes), en gigatonnes (Gt ou milliard de tonnes), voire en pétagrammes (Pg) équivalents à des Gt.

1.4. Évolution et impacts du changement climatique sur le secteur des terres par continent

Enfin, dans la dernière section de ce chapitre, six analyses à l'échelle des continents sont proposées. Pour l'Afrique, l'Asie du Sud-Est, l'Amérique centrale et du Sud, les petits États et territoires insulaires d'Océanie, l'Europe et l'Amérique du Nord, l'atlas analyse les évolutions passées, actuelles et futures des paramètres climatiques (température, précipitations, occurrence des feux, niveau des mers). Il aborde aussi très synthétiquement les conséquences sur l'agriculture, les forêts, l'élevage ou encore sur les ressources halieutiques. On comprend alors que si l'ensemble des continents est affecté par une hausse globale des températures, des territoires au sein de ces continents seront impactés plus durement que d'autres, et les productions agricoles qui s'y trouvent également.

2. Atlas des émissions de gaz à effet de serre des systèmes agri-alimentaires

Marie Hrabanski, Vincent Blanfort, Julien Demenois

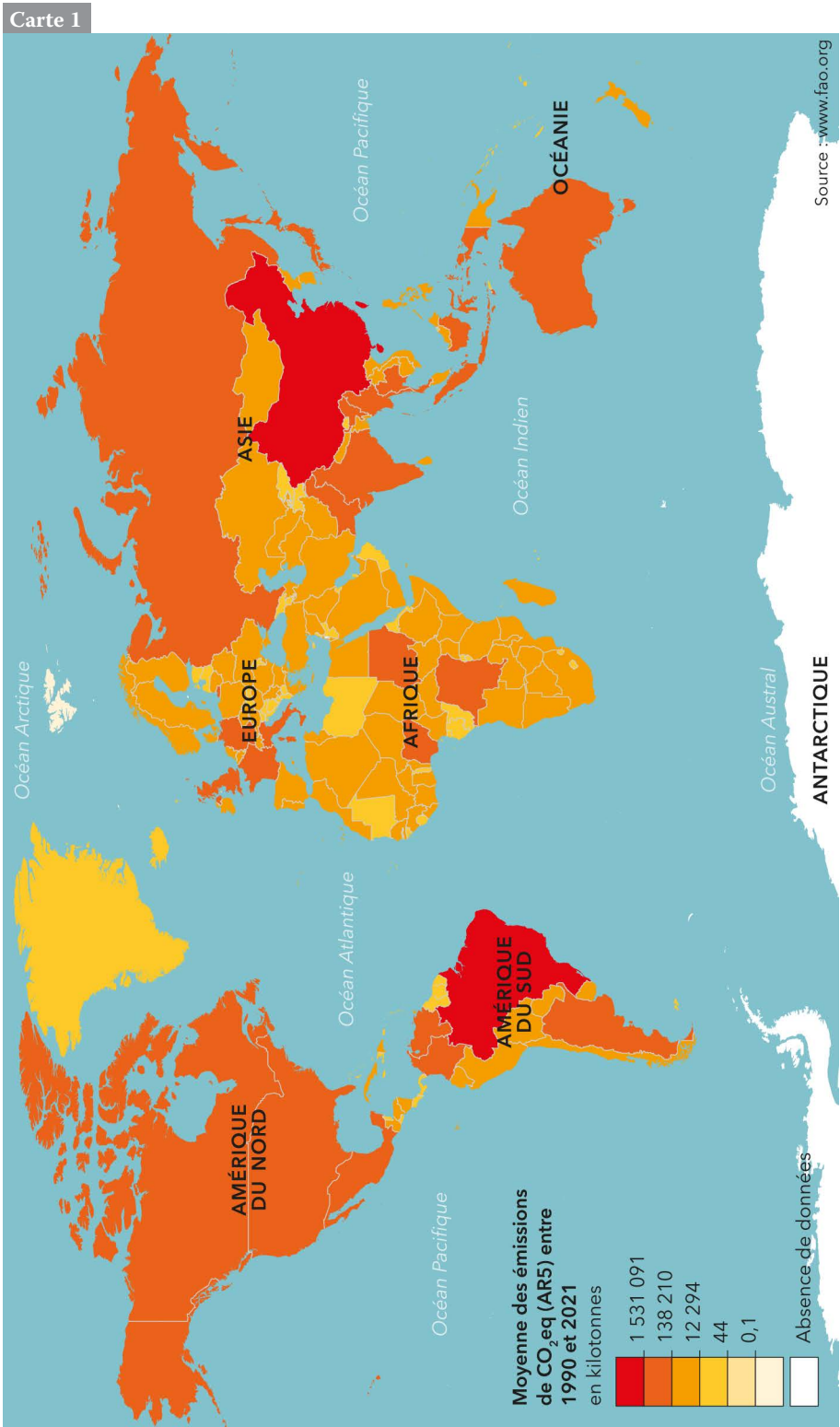
2.1. Carte des émissions du système agri-alimentaire par pays entre 2019 et 2021

Les émissions du secteur agri-alimentaire renvoient à trois postes différents : les émissions émises à l'échelle de la parcelle (*farm gate*), les émissions liées au changement d'utilisation des terres et les émissions liées aux activités de préproduction et de postproduction. Cette représentation des émissions de GES du secteur agri-alimentaire regroupe le cumul de tous les GES par pays exprimé en effectuant la moyenne de la période 1990-2021 (carte 1). On constate de fortes disparités entre les pays industrialisés et les autres. Les systèmes agri-alimentaires chinois et brésiliens sont les plus émetteurs de GES. Les émissions produites par la Chine sont particulièrement élevées en raison de sa production agricole intensive (premier producteur de riz au monde) et de son industrie de l'élevage (40 % des émissions agricoles). Au Brésil, c'est également la production agro-alimentaire intensive (environ 70 % des émissions totales du Brésil) et la conversion de vastes zones de forêts en terres agricoles qui expliquent ces fortes émissions.

En deuxième position viennent l'Indonésie, les États-Unis, l'Union européenne (UE), l'Inde, la Russie et l'Australie. Les systèmes agri-alimentaires de ces pays (ou groupe de pays) sont également particulièrement émetteurs, du fait du volume de leurs productions agricoles et des secteurs associés.

En Afrique, la situation est variable, mais la plupart des pays sont dans des niveaux d'émission moyens à faibles. Toutefois, l'Afrique était à l'origine, en 2019, de 17 % (15 % pour l'Afrique subsaharienne et 2 % pour l'Afrique du Nord) des émissions mondiales de GES liées aux systèmes agri-alimentaires, soit plus que les États-Unis (9 %) et l'UE (7 %). Toutefois, on observe de grandes disparités d'une région ou même d'un pays à l'autre. En Afrique subsaharienne, ces systèmes émettent, par habitant, un peu moins de GES (2,3 t eqCO₂) que dans l'UE (2,6 t eqCO₂). Mais la production alimentaire par habitant y est aussi beaucoup moins élevée (ce qui explique en partie l'insécurité alimentaire de la sous-région). En proportion de la valeur de la production alimentaire, les quantités de GES émis, au sud du Sahara, sont donc plus de deux fois plus élevées que dans l'UE. Elles sont même cinq fois supérieures si l'on tient compte du changement d'utilisation des terres (déforestation au Nigeria et dans le bassin du Congo et mise en culture des zones de pâturages).

Cette première analyse globale est complétée par la comparaison des émissions mondiales par grand secteur (figure 4.3). Les activités d'élevage (chapitres 10, 16 et 24), et la conversion nette des forêts (chapitre 9) s'avèrent largement les plus impactantes, mais d'autres secteurs peuvent également augmenter significativement ces émissions si on cumule les sous-secteurs qui les concernent (exemple des cultures avec la fabrication d'engrais, la consommation d'énergie, etc.).



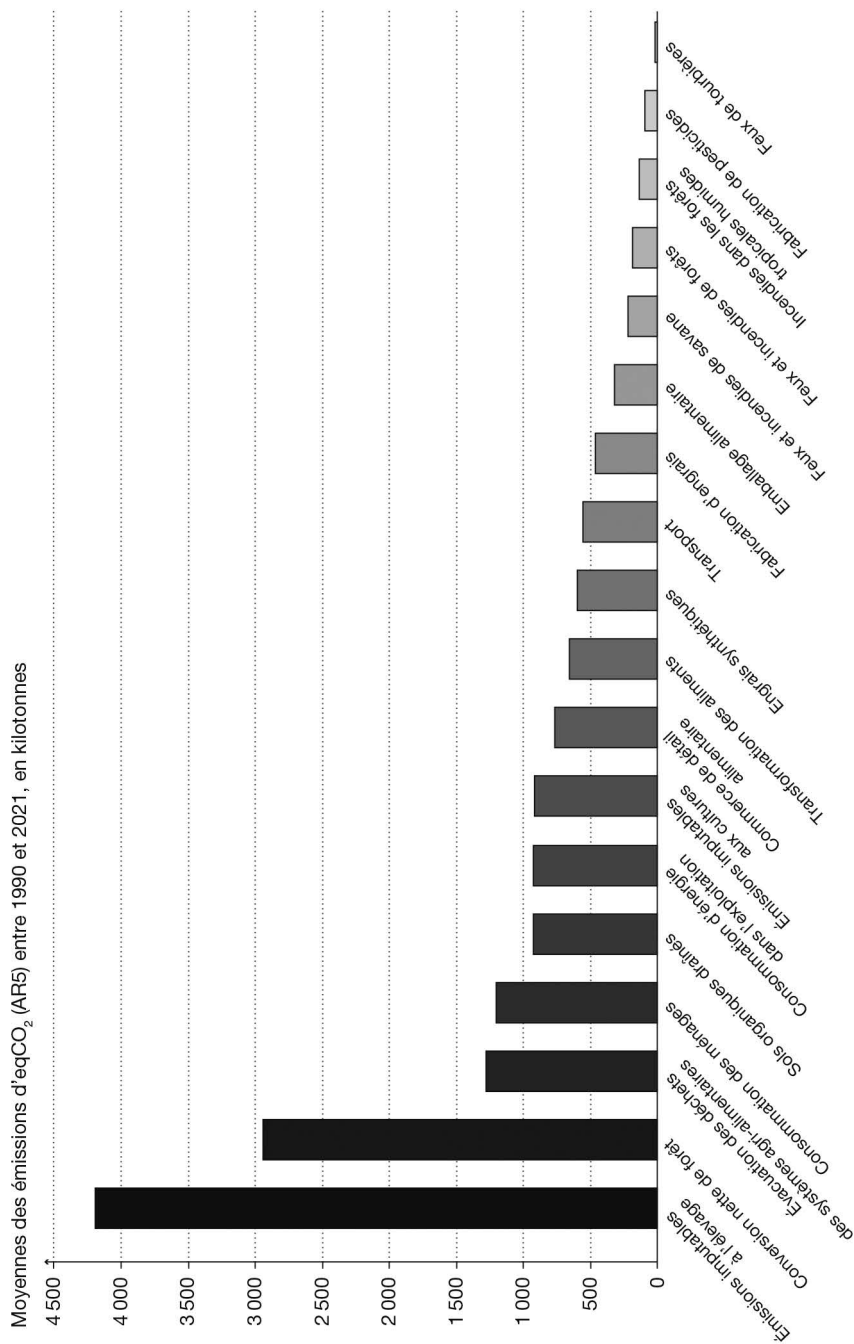


Figure 4.3. Comparaison des émissions mondiales par grand secteur. Source : www.fao.org.

2.2. Carte des émissions du secteur agro-alimentaire par habitant

Il est essentiel de relativiser les chiffres des émissions nationales au prisme du nombre d'habitants de chaque pays. La carte des émissions du secteur agro-alimentaire par habitant (carte 2) exprime ainsi une tout autre vision que la précédente : les pays les plus émetteurs en volume ne sont plus en tête de classement. L'Amérique du Sud, le Canada, l'Europe du Nord présentent encore un ratio élevé en raison de l'impact de l'expansion agricole et de l'exploitation forestière au détriment des forêts. L'Europe de l'Ouest, l'Asie et l'Afrique présentent des scores par habitant plus faibles que leur volume d'émission brut du fait de leur densité de population élevée.

Quelques pays dans la moyenne basse des émissions nationales se trouvent propulsés en tête de classement en raison d'une très faible population. On note en particulier la Mongolie, du fait d'un ratio du nombre de têtes de bétail par habitant très élevé. Pour les mêmes raisons, le Botswana et la Namibie se caractérisent par un secteur agricole (notamment l'élevage) qui représente 10 % à 15 % de leurs émissions totales de GES.

2.3. Carte et graphique des émissions des terres agricoles

En référence à la figure 4.2 (voir l'introduction de ce chapitre), la définition synthétique des terres agricoles intègre : les émissions émises aux portes de la ferme (de l'entrée à la sortie de celle-ci, sans inclure les étapes antérieures et ultérieures) en excluant donc les processus de prérécolte et de postrécolte ; et le changement d'utilisation des terres.

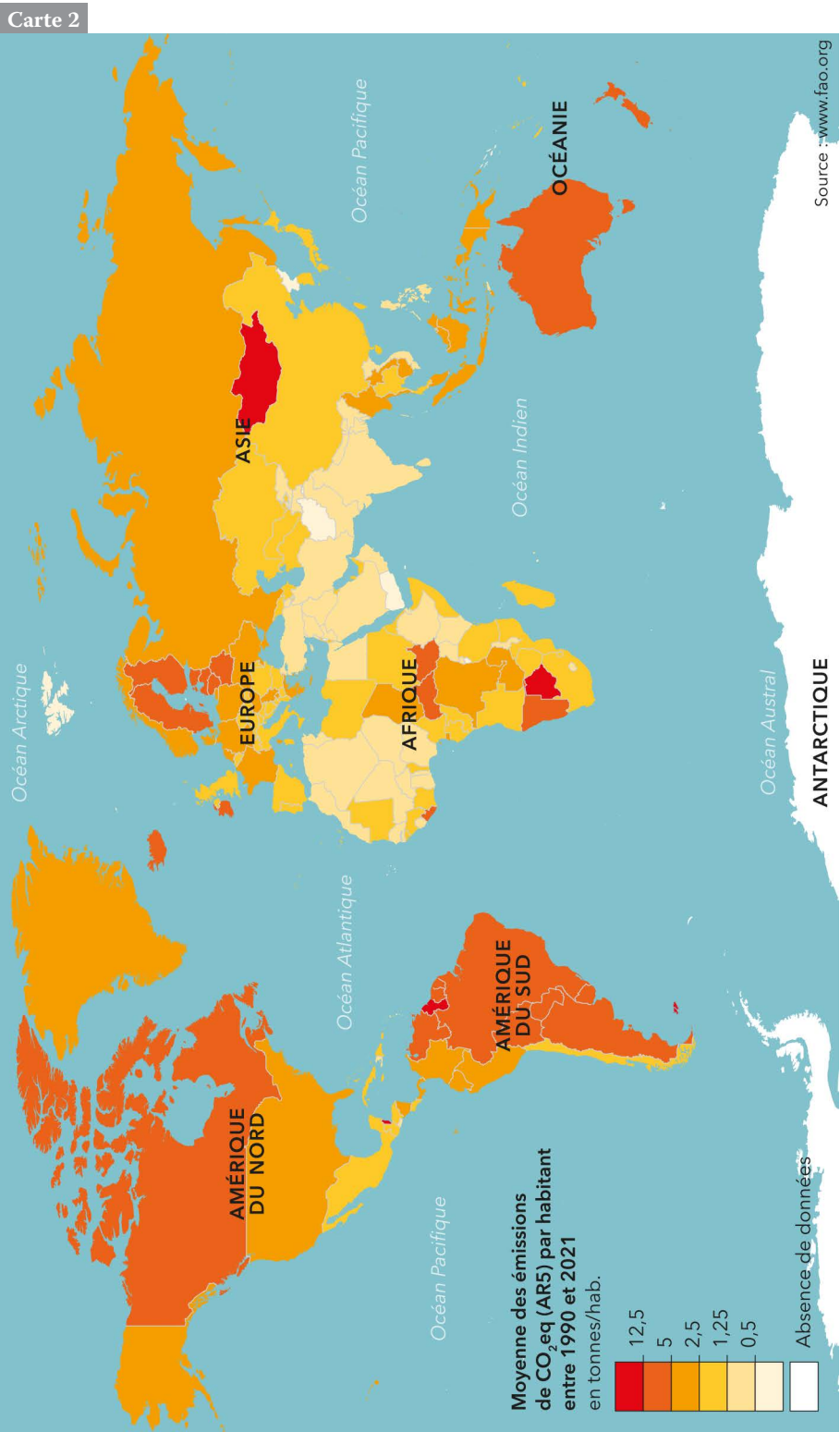
Les émissions de ce secteur reflètent donc les impacts des activités de production à la ferme au sens stricte cumulés avec les changements d'usage des sols visant l'extension de surfaces agricoles.

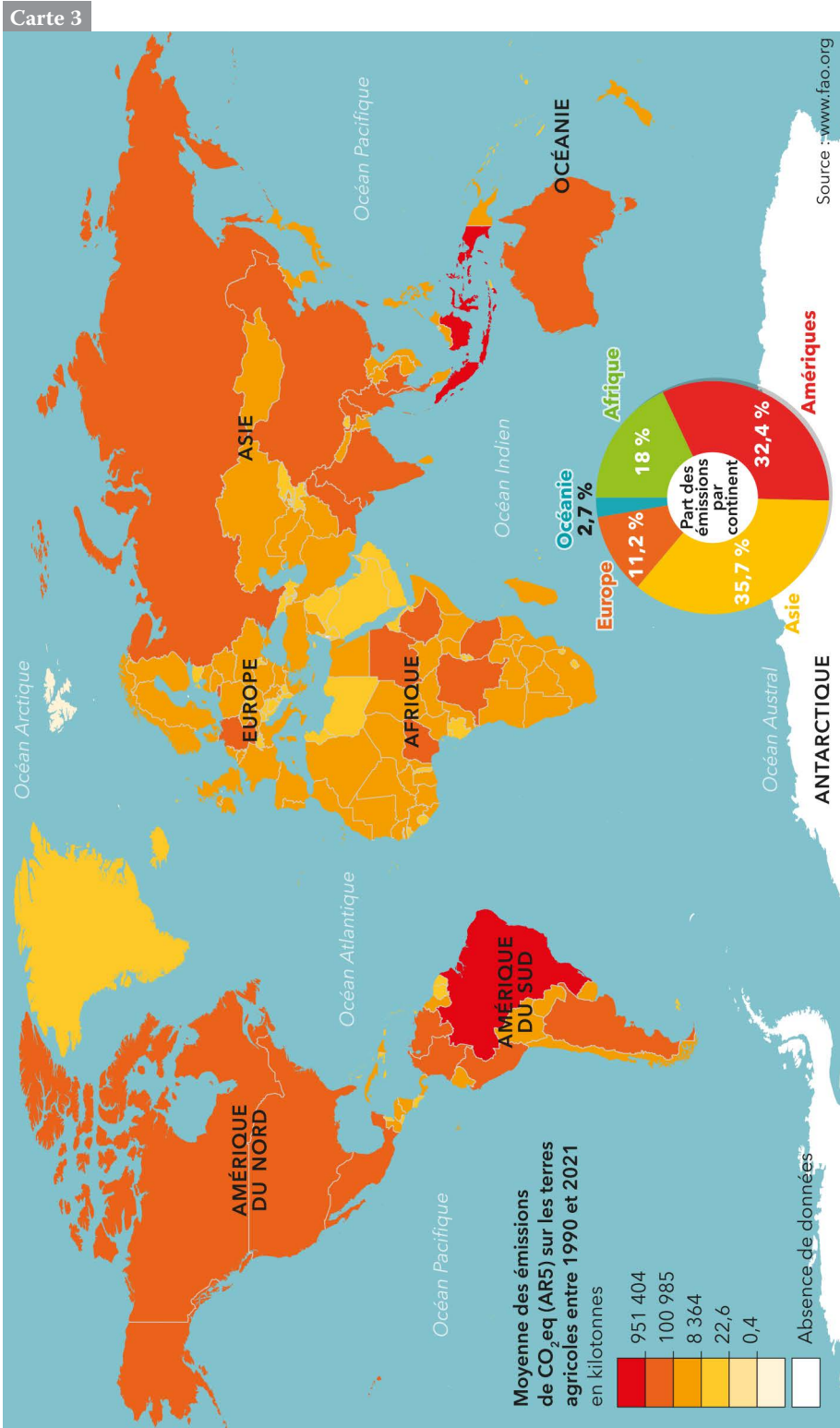
Selon la FAO, les terres agricoles comprennent les zones utilisées pour la culture, pour les pâturages et pour les activités agricoles connexes. Elles incluent les terres arables (cultures temporaires, terres en jachère), les surfaces affectées aux cultures pérennes (arbres fruitiers, plantations) et les prairies permanentes utilisées pour l'élevage. Ces terres peuvent varier selon les systèmes agricoles et les conditions locales, englobant aussi les ressources naturelles essentielles à la productivité agricole, comme les sols, la végétation et les ressources en eau.

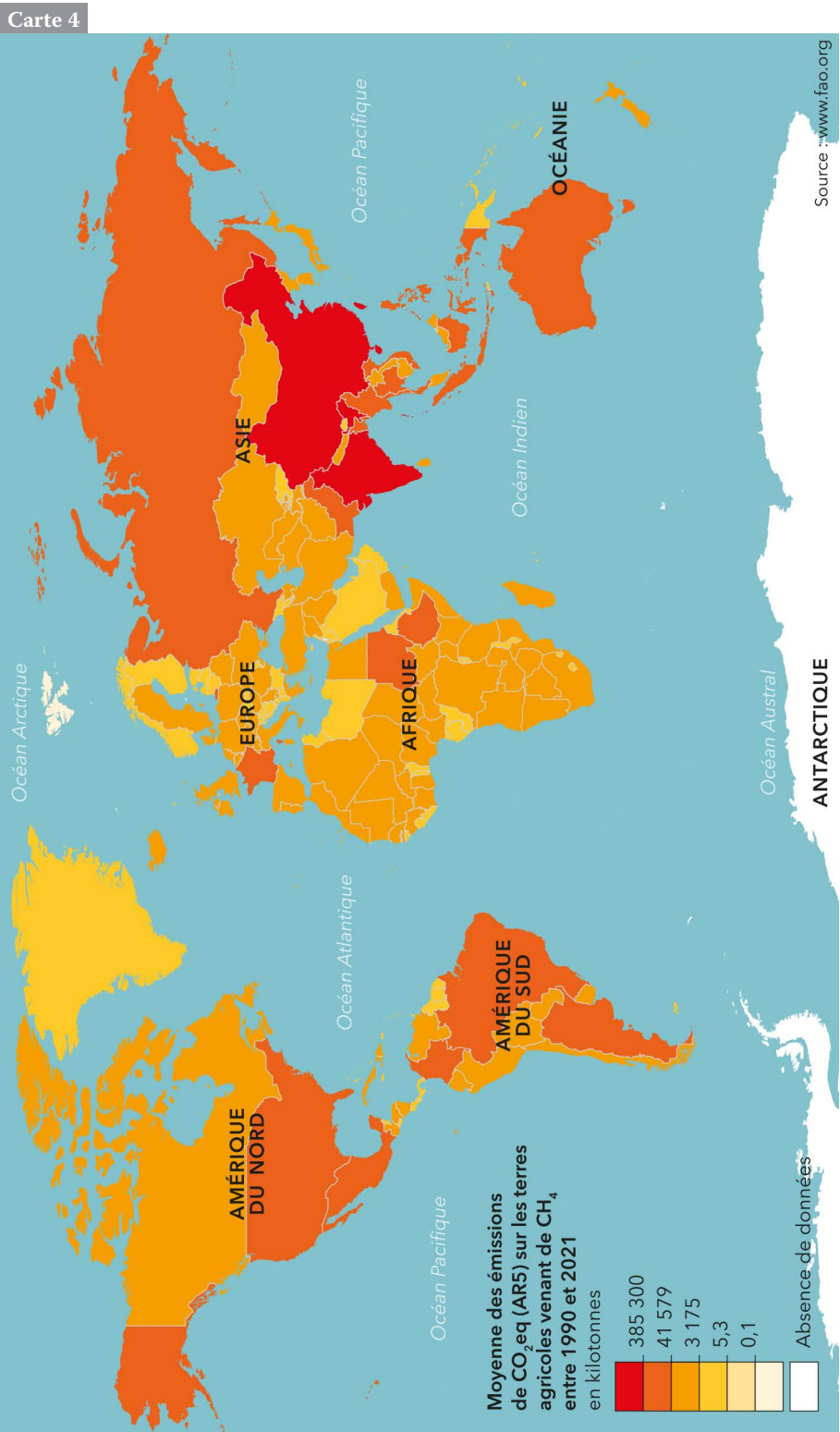
Cette définition reflète une approche intégrée, prenant en compte non seulement les sols, mais aussi les facteurs environnementaux et socio-économiques liés à l'utilisation durable des terres. Les terres agricoles jouent un rôle clé dans l'alimentation mondiale, la conservation des écosystèmes et le développement rural.

La région Asie contribue à elle seule à près de 36 % des émissions des terres agricoles, principalement du fait des émissions de méthane, en raison de la culture du riz et de l'élevage intensif (cartes 3 et 4). On note des émissions très élevées en Asie du Sud-Est insulaire liées à la déforestation pour la production d'huile de palme.

Elle est suivie de près par le continent américain avec un fort impact de la déforestation pour les cultures et pour les pâturages en Amazonie. Les États-Unis et le Canada disposent de systèmes agricoles hautement mécanisés, ce qui entraîne des émissions de CO₂ liées à l'utilisation de carburants fossiles. La production de viande bovine, porcine et de volaille est intensive, ce qui augmente les émissions de méthane associées à l'utilisation intensive d'engrais synthétiques pour les grandes cultures comme le maïs, le soja et le blé.







L'Afrique avec 18% des émissions se caractérise par des tendances régionales. En Afrique de l'Ouest et de l'Est, les activités d'élevage sont une source de méthane et les pratiques agricoles extensives telles que la culture sur brûlis, une source majeure de N_2O et de CO_2 . En Afrique de l'Est, l'élevage est dominant, avec des émissions élevées de méthane dues à la fermentation entérique. La déforestation en Afrique centrale est une source importante d'émissions. Les monocultures et l'utilisation accrue des engrais en Afrique australe contribuent aux émissions de protoxyde d'azote (carte 5).

L'analyse des émissions de gaz à effet de serre (GES) des terres agricoles en Europe (11,2%) reflète des dynamiques spécifiques à cette région industrialisée et technologiquement avancée en particulier en Europe du Nord. L'utilisation intensive des terres et une forte mécanisation sont contrôlées par des politiques de durabilité avancées (PAC, politique agricole commune) et des pratiques telles que l'agriculture biologique et l'agriculture de conservation.

L'Europe de l'Est est encore dans une transition postsoviétique caractérisée par une augmentation progressive de l'intensité agricole. Les pratiques intensives dans les cultures horticoles et viticoles peuvent être associées à des émissions élevées d'intrants en Europe du Sud.

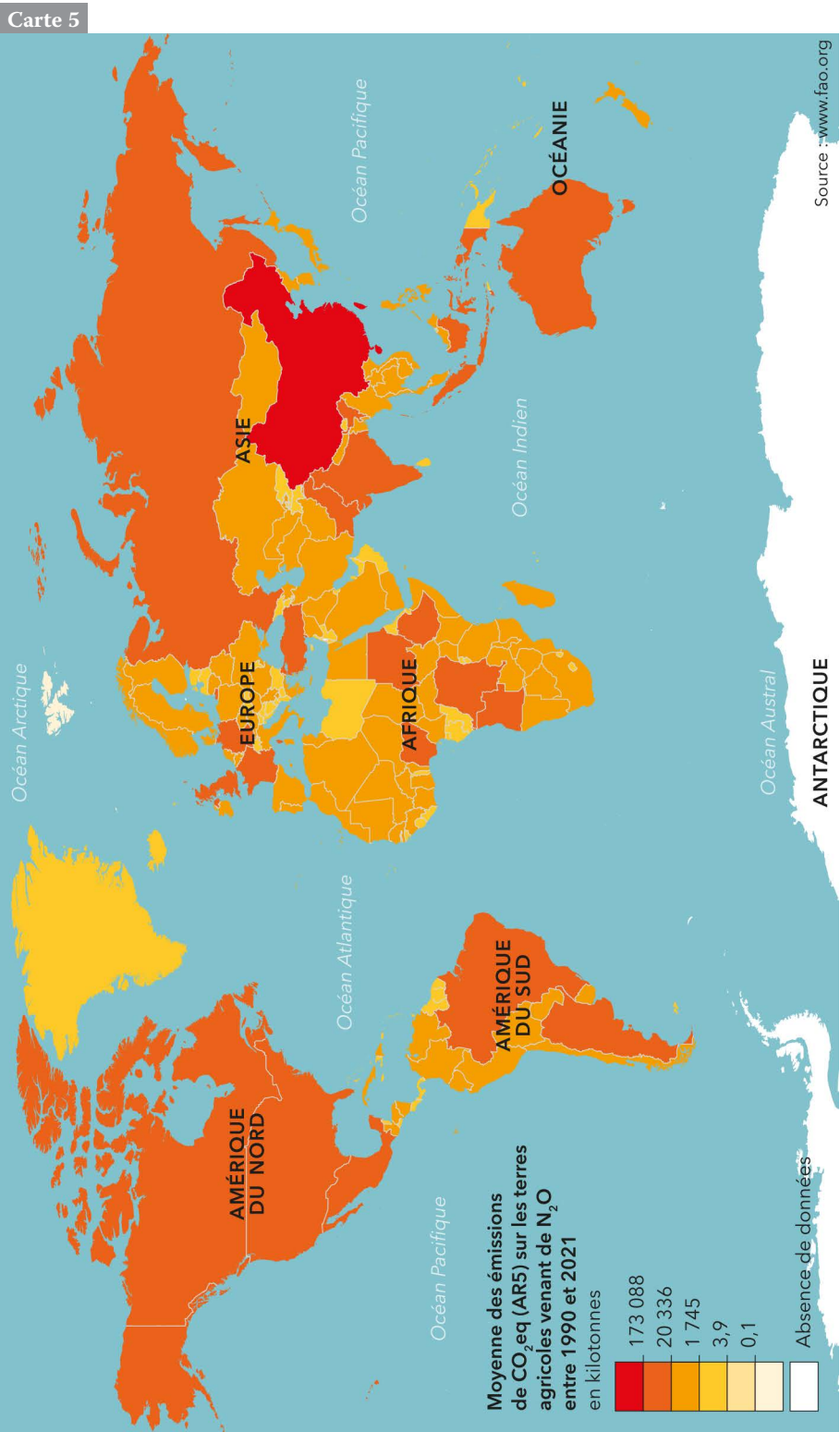
2.4. Carte et graphique des émissions imputables aux cultures dans le monde, entre 1990 et 2021

La carte 6 analyse les émissions de GES produites entre 1990 et 2021 par les cultures agricoles, et notamment par les productions suivantes : blé, orge, avoine, soja, pomme de terre, riz, maïs, canne à sucre, millet, sorgho, haricot sec, seigle.

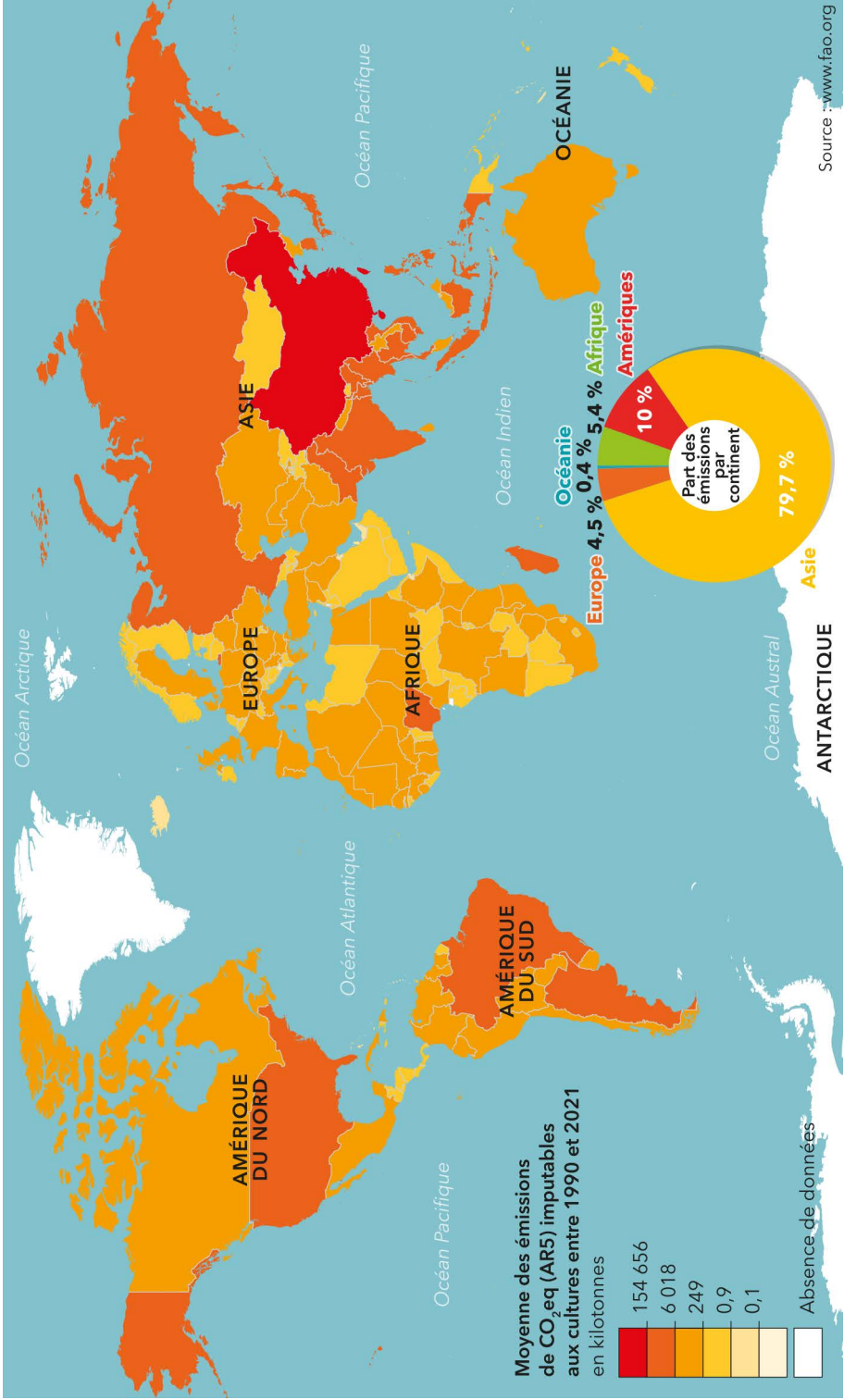
Près de 80% des émissions de GES issues des cultures sont imputables à l'Asie. L'ensemble des types de GES étant pris en compte, les émissions de méthane issues de la culture du riz expliquent en partie ce chiffre particulièrement élevé. Les Amériques constituent le deuxième continent émetteur, avec 10% des émissions (soja, maïs, blé). L'Europe et l'Afrique sont respectivement responsables d'environ 5% des émissions de GES issues des cultures; ces émissions rapportées au nombre d'habitants sur chacun de ces deux continents permettent de préciser que les émissions de GES issues des cultures en Afrique sont particulièrement faibles. Enfin, seules 0,4% des émissions de GES issues des cultures sont imputables à l'Océanie.

2.5. Carte et graphique des émissions imputables à l'élevage

Selon une évaluation de la FAO (2023), l'élevage représente 40% des émissions totales des systèmes agro-alimentaires, soit environ 12% des émissions de GES totales d'origine anthropique à l'échelle mondiale (voir chapitres 10 et 16). C'est le méthane (CH_4), issu principalement de la fermentation entérique des ruminants (vaches, chèvres, moutons) et de la gestion des déjections animales, qui en est la principale cause avec plus de la moitié des émissions liées aux productions animales. Il est suivi par le dioxyde de carbone (CO_2 , 31%), attribuable aux changements d'affectation des terres (déforestation pour pâturages ou cultures fourragères) ainsi qu'à la consommation d'énergie pour la production et le transport. Enfin, 15% de ces émissions sont imputables à l'oxyde nitreux (N_2O) produit par l'utilisation d'engrais et par la gestion des sols.



Carte 6



Au-delà de ces chiffres globaux, les émissions de GES du secteur de l'élevage sont très différentes selon les régions du monde (carte 7).

L'analyse par grande région du monde montre que ce sont l'Asie et les Amériques qui contribuent aux deux tiers des émissions mondiales. L'Asie émet un tiers des émissions en raison de la croissance rapide de la demande en produits animaux liée à l'augmentation démographique et à l'urbanisation. La Chine est ainsi le premier producteur mondial de porc et l'Inde, le premier producteur de lait au monde. Le continent américain contribue également à plus de 30 % des émissions mondiales en raison notamment des effectifs importants de ruminants (le Brésil en particulier, avec une conversion des forêts primaires en pâturage et en cultures destinées à l'alimentation animale).

En Afrique, la production animale joue un rôle crucial dans la sécurité alimentaire, dans les moyens de subsistance et dans l'économie, en particulier dans les zones pastorales : le continent contribue en conséquence à 15,6 % des émissions de GES mondiales. Ces émissions représentent environ 10 % des émissions totales de GES du continent. L'Europe fait quasiment jeu égal, malgré un secteur de l'élevage plus encadré au niveau des réglementations et des pratiques agricoles. Le secteur représente une part dominante des émissions agricoles en Europe estimée à plus de 70 %, soit 10 % des émissions totales de GES de l'Union européenne.

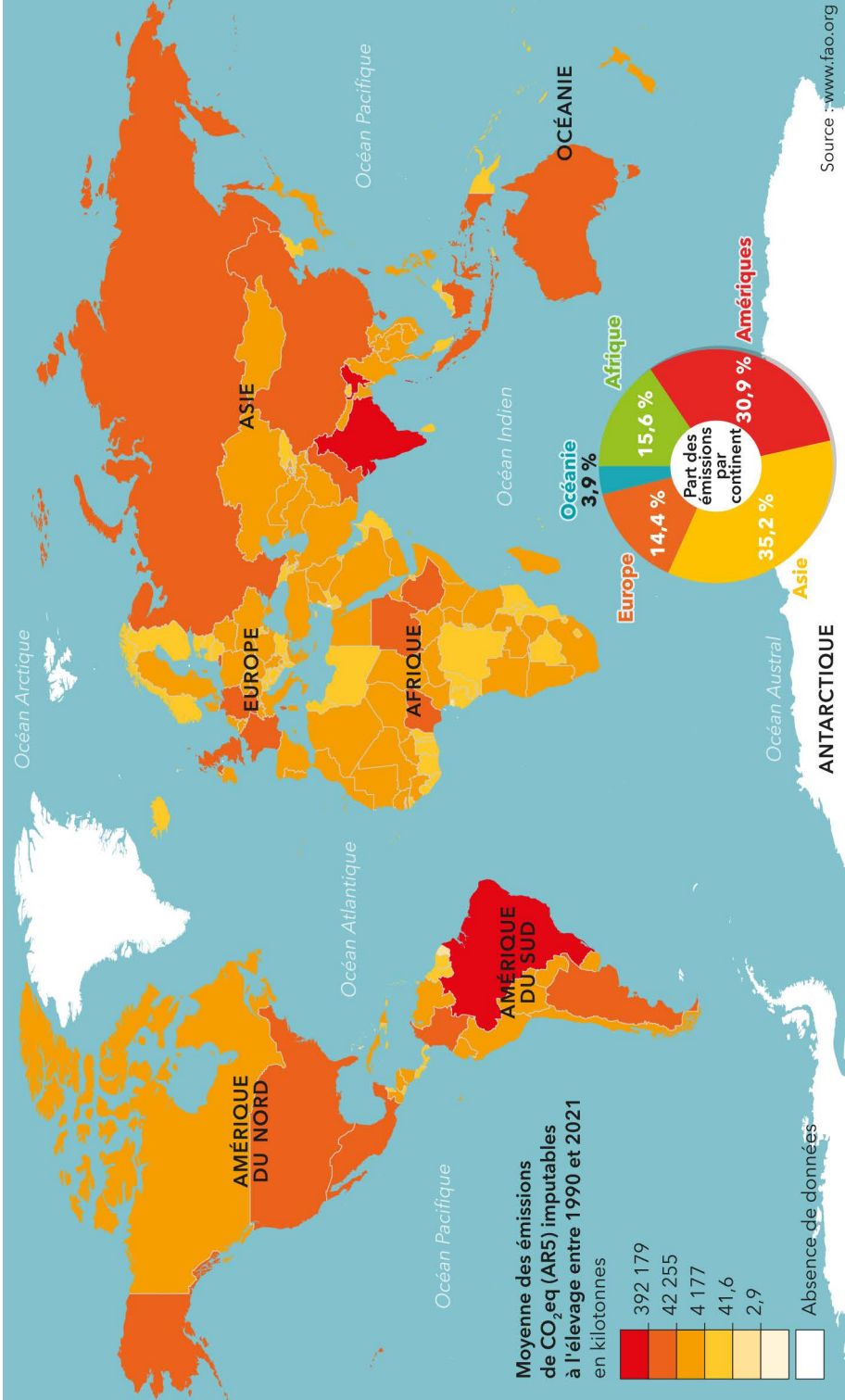
Les principales sources d'émissions liées à l'élevage sont :

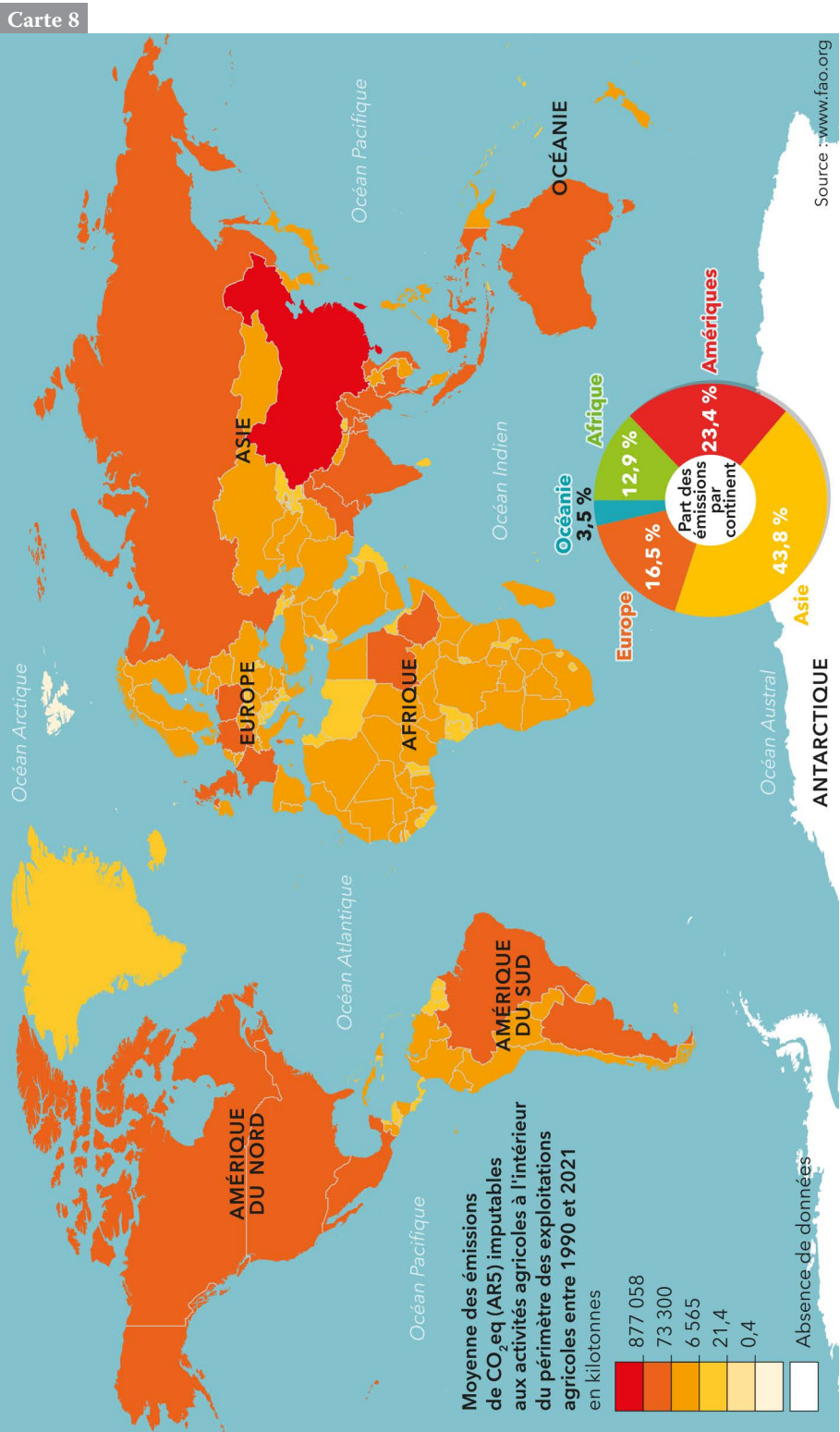
- la fermentation entérique : les ruminants (vaches, moutons, chèvres) produisent du méthane (CH_4) lors de leur digestion ;
- la gestion du fumier : les déjections animales émettent du méthane (CH_4) et du protoxyde d'azote (N_2O) lorsqu'elles se décomposent ;
- la production d'aliments pour animaux : la culture des céréales et des fourrages utilisés pour nourrir les animaux engendre des émissions de GES (CO_2 lié à la mécanisation et à l'utilisation d'engrais synthétiques, N_2O libéré par les sols traités avec des fertilisants) ;
- le changement d'utilisation des terres : la déforestation pour créer des pâturages ou des terres cultivées pour produire des aliments pour animaux libère du CO_2 ;
- le transport et la transformation : le transport des aliments, des animaux vivants et des produits transformés contribue aux émissions de CO_2 .

2.6. Carte des émissions des productions à la ferme ou *farm gate*

Les émissions du secteur agri-alimentaire renvoient à trois postes différents : les émissions émises à l'échelle de la parcelle (*farm gate*), les émissions liées au changement d'utilisation des terres et les émissions liées aux activités de préproduction et de postproduction. La carte proposée ici (carte 8) se concentre uniquement sur les émissions produites aux étapes de préproduction et de postproduction entre 1990 et 2021. Les étapes de prérécolte renvoient notamment à la production de fertilisants et à l'irrigation, et les étapes de postrécolte aux cinq postes suivants : le transport, la transformation, la distribution, la consommation et enfin la gestion des déchets. Pour rappel, l'étude de Tubiello (2022) démontre que, depuis 2019, les processus de préproduction et de postproduction ont dépassé les processus à la ferme pour devenir la plus grande composante des émissions de GES des systèmes agri-alimentaires, comme le confirme la carte 8. Le premier pays émetteur de GES agricole à l'échelle de la parcelle est la Chine. Un second groupe de pays rassemble les grands pays producteurs agricoles tels que l'Amérique du Nord (États-Unis et Canada), les grands pays

Carte 7





agricoles européens (France, Allemagne, Pologne), le Brésil et l'Argentine, et une partie de l'Asie (Inde, Indonésie), la Russie et plus étonnamment le Soudan et l'Éthiopie (en raison notamment des émissions de méthane agricole lié à l'élevage).

2.7. Émission du secteur agri-alimentaire

La carte proposée (carte 9) se base sur les mêmes secteurs que la carte 8 et se concentre uniquement sur les émissions produites aux étapes de préproduction et de postproduction émises entre 1990 et 2021. Pour rappel, depuis 2019, les émissions pendant les étapes de préproduction et de postproduction ont désormais dépassé les émissions à l'échelle de la ferme (Tubiello, 2022), comme le confirme la carte ci-dessous. Celle-ci montre que, comme à l'échelle des émissions produites à l'échelle de la parcelle, la Chine et les États-Unis sont les premiers producteurs de GES aux étapes de préproduction et de postproduction. Un second groupe de pays rassemble la plupart des pays européens (davantage de pays que lorsqu'on ne prend en compte que les émissions à l'échelle de la parcelle), ce qui s'explique notamment par le transport des produits agricoles. Le Brésil et l'Australie appartiennent également à ce second groupe, ainsi qu'une grande partie de l'Asie et la Russie. En Afrique, seul le Nigeria fait partie de ce second groupe.

2.8. Émissions de GES liées au changement d'usage des sols

Par changement d'usage des sols, on entend ici le brûlage de biomasse forestière et la conversion de terres forestières (en terres agricoles notamment). Entre 1990 et 2021, on observe ici (carte 10) que près de la moitié des émissions liées au changement d'usage des sols sont issues des Amériques, et en substance de l'Amérique latine, du fait notamment de la déforestation dans le bassin amazonien. Les émissions induites par le changement d'usage des sols sont également élevées en Asie (21,6 %) et en Afrique (27 %), du fait également de la déforestation en Afrique centrale et en Asie du Sud-Est, notamment en Indonésie. La période étudiée (1990-2021) explique pourquoi l'Europe fait office d'exception avec des émissions liées au changement d'usage des sols, dans la mesure où les émissions liées au changement d'usage des terres datent majoritairement du XIX^e et du XX^e siècle.

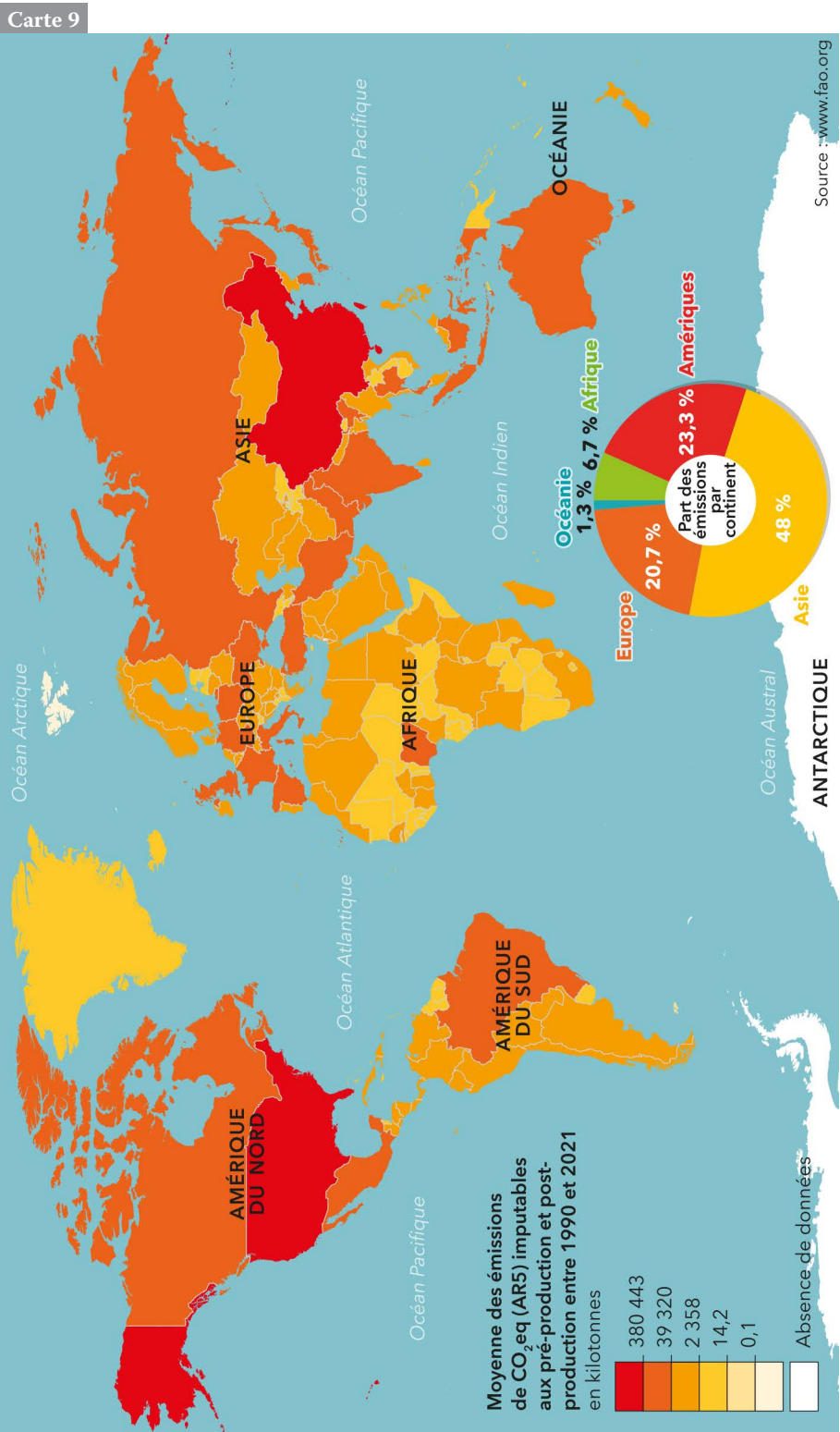
3. Carte des impacts du changement climatique sur le secteur des terres

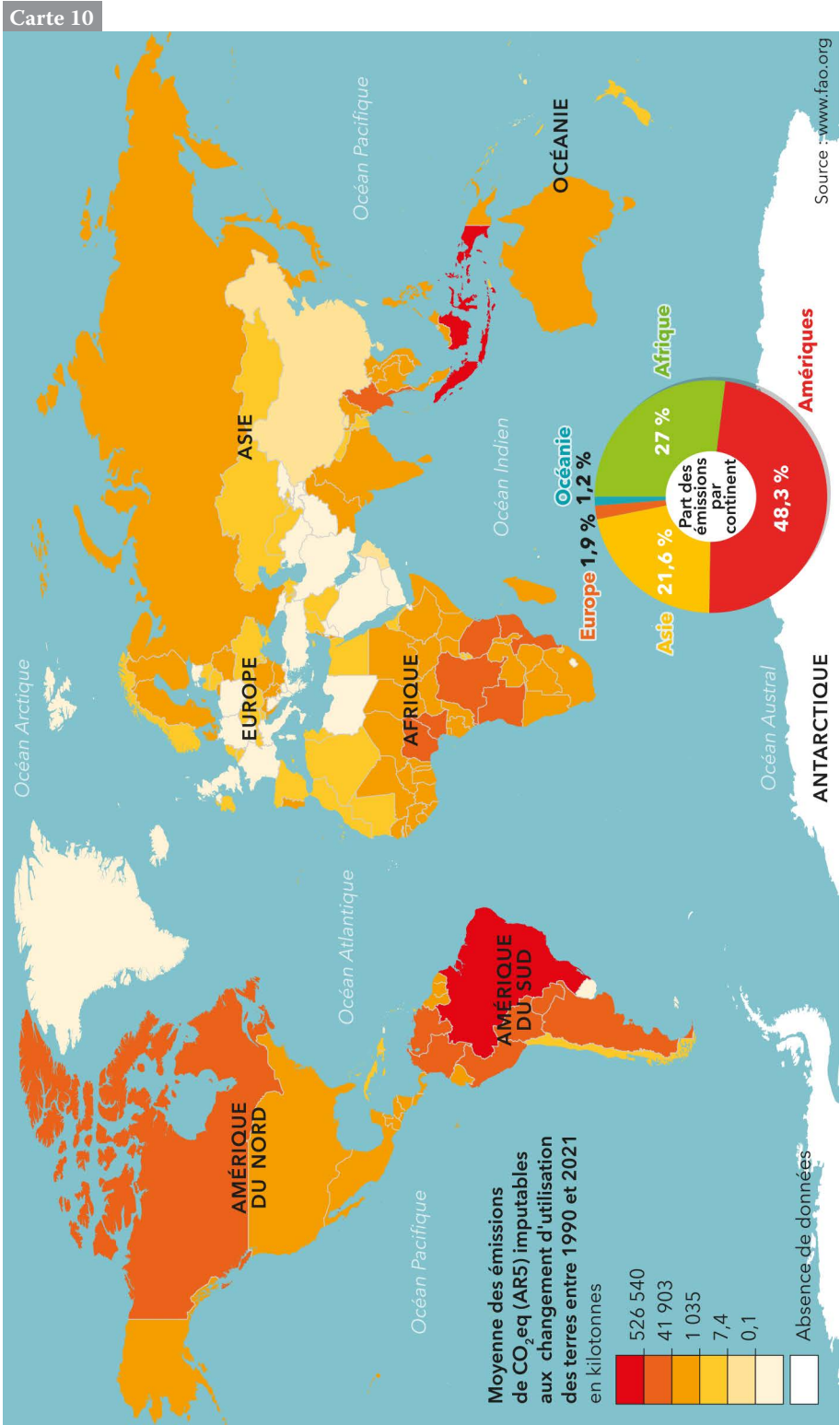
Vincent Blanfort, Marie Hrabanski, Julien Demenois

Cette carte (carte 11) a été établie à partir du rapport de synthèse du Giec paru en 2023 (AR6). Elle porte :

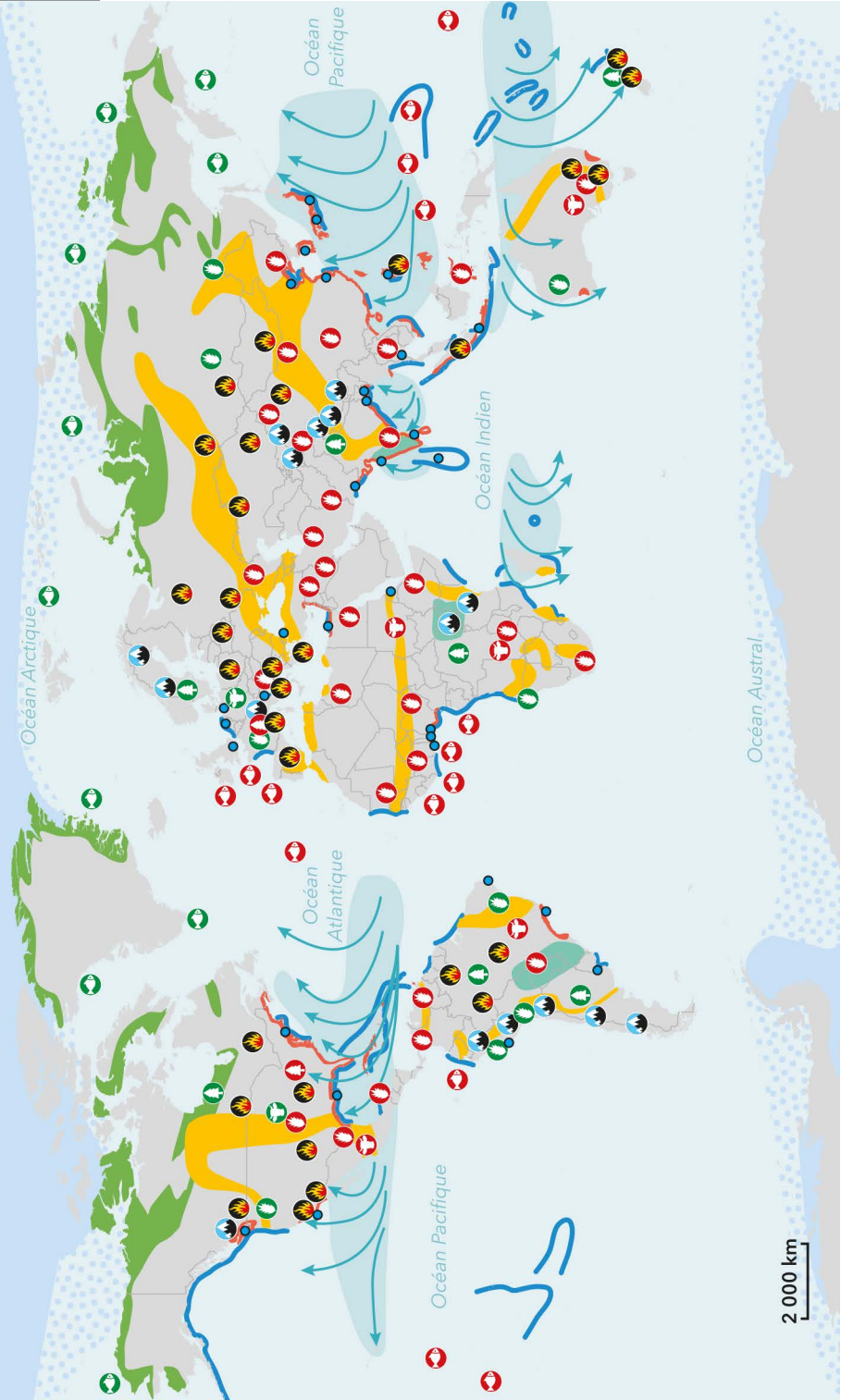
- sur les impacts attendus du changement climatique en 2050 sur la productivité agricole, forestière et halieutique (secteur forestier, élevage, cultures, pêche) ;
- sur les facteurs de vulnérabilités climatiques (zones côtières vulnérables face à l'élévation du niveau des mers et aux inondations, zones exposées à la désertification à des risques accrus d'incendies, etc.) ;
- et sur la vulnérabilité des populations côtières (régions à forte densité de population et villes menacées par la montée des eaux).

La carte souligne sans surprise l'étendue des impacts du changement climatique sur la productivité agricole et l'accroissement accrue des vulnérabilités climatiques sur de nombreuses zones de la planète.





Carte 11



© Légendes Cartographie

Les facteurs de vulnérabilités climatiques

- 

Zones côtières vulnérables face à l'élévation du niveau des mers et aux inondations
- 

Zones exposées à la désertification
- 

Risque accru d'incendie
- 

Fonte de la banquise
- 

Zones avec des hausses de précipitations
- 

Régions de formation et trajectoires moyennes des cyclones tropicaux
- 

Fonte des glaciers
- 

Fonte du pergélisol

Impacts sur la productivité agricole, forestière et halieutique en 2050

	Hausse	Baisse
Secteur forestier		
Élevage		
Cultures		
Pêche		

Vulnérabilité des populations côtières

- 

Régions à forte densité de populations côtières
- 

Principales villes menacées par la montée de la mer

Sources : Atlas historique de la Terre (Éditions Les Arènes).
Changement climatique 2023 rapport de synthèse AR6 (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat).

De façon plus précise, ce qui frappe d'abord à la lecture de cette carte, c'est une baisse de la productivité attendue dans les secteurs de l'élevage et des cultures sur de nombreuses zones et sur l'ensemble des continents. Toutefois, des zones vont également être affectées positivement puisque le nord-ouest des États-Unis, le nord-ouest du Brésil, la Namibie, le Pérou et la Bolivie ou encore l'est de la Russie vont connaître une hausse de leur productivité agricole dans le secteur des cultures. Concernant l'élevage, une hausse de la productivité est aussi attendue dans le centre des États-Unis et en Europe centrale. Pour ce qui est de la pêche, la situation est très contrastée géographiquement : dans toute la zone de pêche au nord du cercle polaire arctique, on prévoit une augmentation de la productivité halieutique, tandis que celle-ci va baisser dans les zones tempérées et tropicales, notamment en Europe, sur la côte ouest de l'Afrique, dans le bassin océanien et dans la zone pacifique tempérée. Concernant la productivité forestière, on s'attend à une augmentation de la productivité en Afrique centrale et en Amazonie, au Canada et dans les pays scandinaves, tandis qu'une baisse est prévue dans l'Est des États-Unis. Au delà de ce premier constat, on remarque la multiplication des vulnérabilités climatiques, et notamment la multiplication des régions de formation des cyclones tropicaux, lesquels auront un impact sur les zones à forte densité de population côtière, et ce, tant à l'est et à l'ouest des États-Unis qu'au large de la Chine, du Japon et de l'Afrique australe ou encore dans le nord-est de l'Australie. Une multiplication des incendies est très probable sur l'ensemble des continents exceptés en Afrique. Enfin, une extension des zones exposées aux sécheresses et à la désertification est attendue.

4. Atlas du carbone des terres émergées et de ses évolutions

Julien Demenois, Vincent Blanfort, Marie Hrabanski

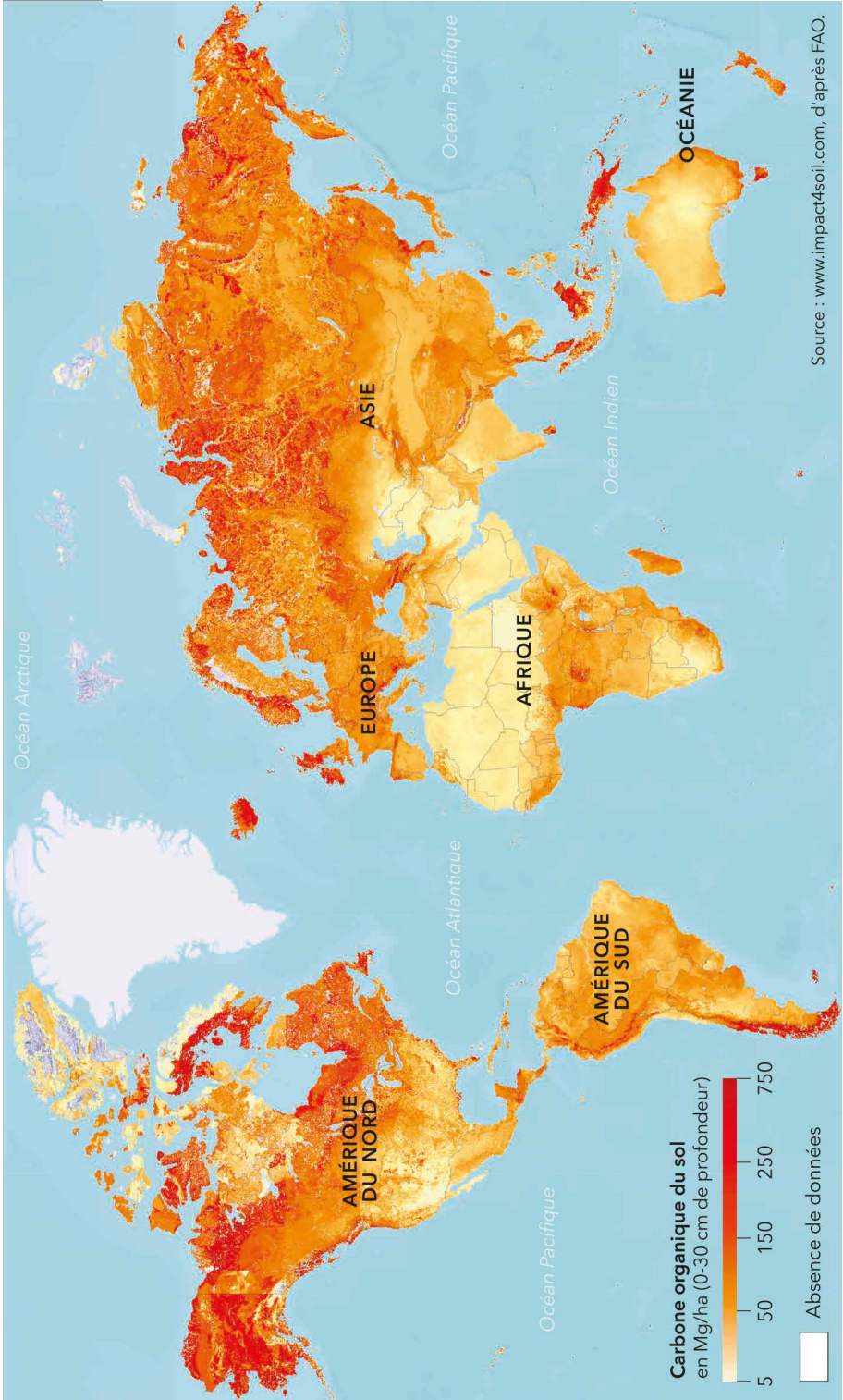
4.1. Carte des stocks de carbone organique

Le sol est le plus grand réservoir de carbone terrestre : 2 400 Gt de carbone entre 0 et 2 m de profondeur à l'échelle du globe (voir chapitre 17). Ce stock se trouve majoritairement dans le sol des forêts (30 %) et des prairies (30 % à 35 %), et dans une moindre mesure dans le sol des terres cultivées (15 %). À cela s'ajoute le carbone du pergélisol (plus de 1 600 Gt entre 0 et 3 m de profondeur).

La carte des stocks de carbone organique du sol (COS, SOC en anglais) entre 0 et 30 cm de profondeur est issue du travail du Partenariat mondial pour les sols (GSOCmap, *global soil organic carbon map*). Cette carte (carte 12) est la première carte mondiale du carbone organique des sols jamais produite dans le cadre d'un processus consultatif et participatif impliquant les pays membres, ce qui rend celle-ci absolument nouvelle et unique. Les cartes 12 à 14 sont consultables en version numérique et interactive sur la plateforme Impact4Soil (www.impact4soil.com) développée par le Cirad et Vizzuality dans le cadre du projet européen ORCaSa.

Les stocks de COS sont les plus élevés dans les zones de hautes ou de basses latitudes (supérieures à 40°) et dans la zone intertropicale. Dix pays abritent plus de 60 % de ces stocks, la Russie arrivant en tête. Le Brésil, l'Indonésie et la République démocratique du Congo figurent également dans cette liste. *A contrario*, les régions sèches du nord de l'Afrique, du Proche-Orient ou du centre de l'Australie présentent des niveaux de stocks de COS plus faibles.

Carte 12



© Légendes Cartographie

4.2. Carte des évolutions passées des stocks de carbone organique du sol

Les changements d'usage des terres sont une source majeure d'émissions nettes de GES. Ainsi, la conversion d'écosystèmes naturels en terres agricoles a entraîné depuis le Néolithique une perte cumulée de 116 Gt de carbone dans les deux premiers mètres du sol (voir chapitre 17).

La carte des évolutions passées des stocks de carbone organique du sol (COS) entre 0 et 30 cm de profondeur (carte 13) est issue de l'analyse de Sanderman *et al.* (2017). Elle présente les différences de stocks de COS entre les niveaux historiques (– 12 000 ans) et les niveaux actuels. Cette carte est une représentation statistique de la quantité de carbone organique du sol qui a pu être perdue à cause de l'agriculture. Il s'agit d'un produit mondial dérivé à une résolution d'environ 10 km.

Les pertes de stocks de COS (en rouge sur la carte) ont été les plus élevées en Europe, aux États-Unis et en Chine. *A contrario*, quelques régions ont vu leurs stocks de COS s'accroître (en vert sur la carte), notamment dans le sud de la Mongolie ou dans le delta du Nil.

4.3. Carte des évolutions futures des stocks de carbone organique du sol

Au sujet de la régulation du climat, la séquestration de carbone dans les sols, grâce à une augmentation des stocks de carbone organique du sol (COS), représenterait 47 % du potentiel d'atténuation de l'agriculture et des prairies (voir chapitre 17).

En utilisant l'approche comptable de niveau 1¹ du Giec, la carte des évolutions futures des stocks de COS (carte 14) permet de visualiser les différences de stocks de COS entre 2018 et 2038 entre 0 et 30 cm de profondeur, si des pratiques de restauration des terres cultivées et des prairies étaient mises en œuvre. L'approche comptable de niveau 1 du Giec utilise des fonctions de réponse moyennes régionales pour estimer les variations du carbone organique du sol dues à des changements dans l'utilisation des terres. En tant que telle, cette approche ne tient pas compte des variations à plus petite échelle de l'évolution du carbone organique du sol, qui seront probablement observées en fonction des types de sols locaux, du climat local et de la mise en œuvre locale de stratégies de gestion particulières. La carte ne tient pas compte de la faisabilité locale ou des taux d'adoption actuels. Cette analyse repose sur l'hypothèse d'une adoption instantanée sur toutes les terres, même si en réalité, le changement se fera progressivement au fil du temps.

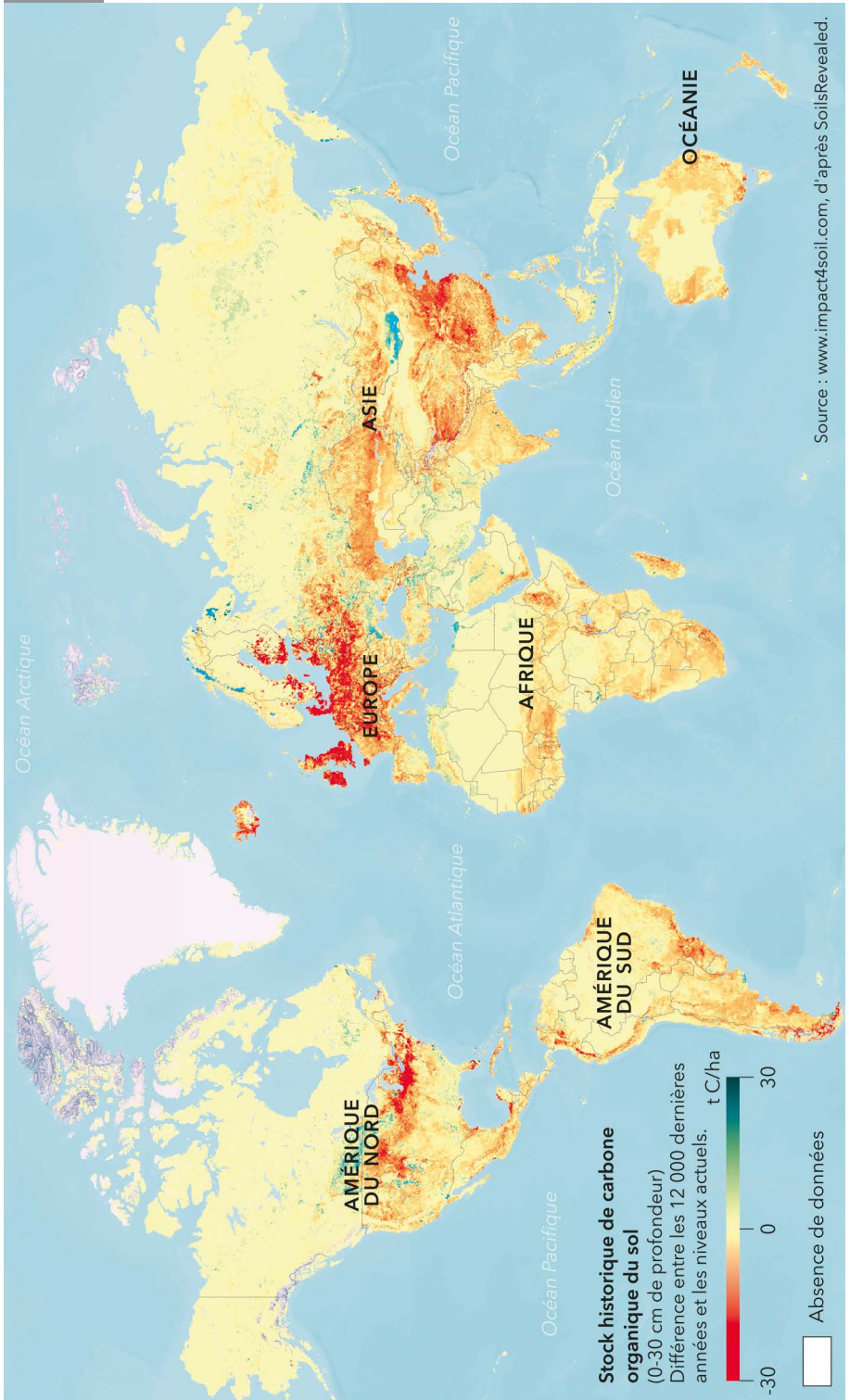
Cette carte permet de mettre en évidence le potentiel important d'augmentation des stocks de COS (en vert sur la carte), en particulier en Amérique du Sud, en Afrique et en Asie du Sud-Est, grâce à la restauration des terres cultivées et des prairies.

4.4. Stock actuel de carbone de la biomasse aérienne

Les stocks de carbone des terres émergées se trouvent majoritairement dans les sols et dans la végétation arbustive et arborée. Les forêts couvrent la planète sur 3 900 Mha

1. Glossaire du Giec : « Un niveau représente un degré de complexité méthodologique. En général, trois niveaux sont proposés. Le niveau 1 est la méthode de base, le niveau 2 est intermédiaire et le niveau 3 est le plus exigeant en termes de complexité et de données requises. » https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/12/19R_V0_02_Glossary.pdf.

Carte 13





(millions d'hectares) et représentent de l'ordre de 860 Gt de carbone (Gt : milliards de tonnes), dont plus de 40 % dans la biomasse vivante (voir chapitre 9). La forêt tropicale représente plus de la moitié des stocks. Les forêts jouent donc un rôle crucial dans l'évolution du climat.

La carte des stocks de biomasse aérienne (carte 15) est représentative des stocks de carbone dans la biomasse aérienne, celle-ci étant en moyenne composée de 50 % de carbone. Cette carte s'appuie sur la méthodologie présentée dans Baccini *et al.* (2012) pour générer une carte mondiale de la densité de la biomasse ligneuse vivante aérienne à une résolution d'environ 30 m pour l'année 2000. La carte est consultable en version numérique et interactive sur la plateforme Global Forest Watch (www.globalforestwatch.org).

Les trois grands massifs forestiers tropicaux que sont l'Amazonie, l'Afrique centrale et le bassin du Bornéo-Mékong concentrent la majorité de ces stocks de biomasse aérienne.

4.5. Les flux nets actuels de GES au niveau des forêts

Les forêts constituent le principal puits de carbone en milieu continental, second puits après les océans. Elles jouent de fait un rôle crucial dans l'évolution du climat. Elles capteraient, selon les estimations, entre 70 % et 100 % de la 1,8 Gt de carbone par an absorbée au niveau des surfaces continentales (voir chapitre 9).

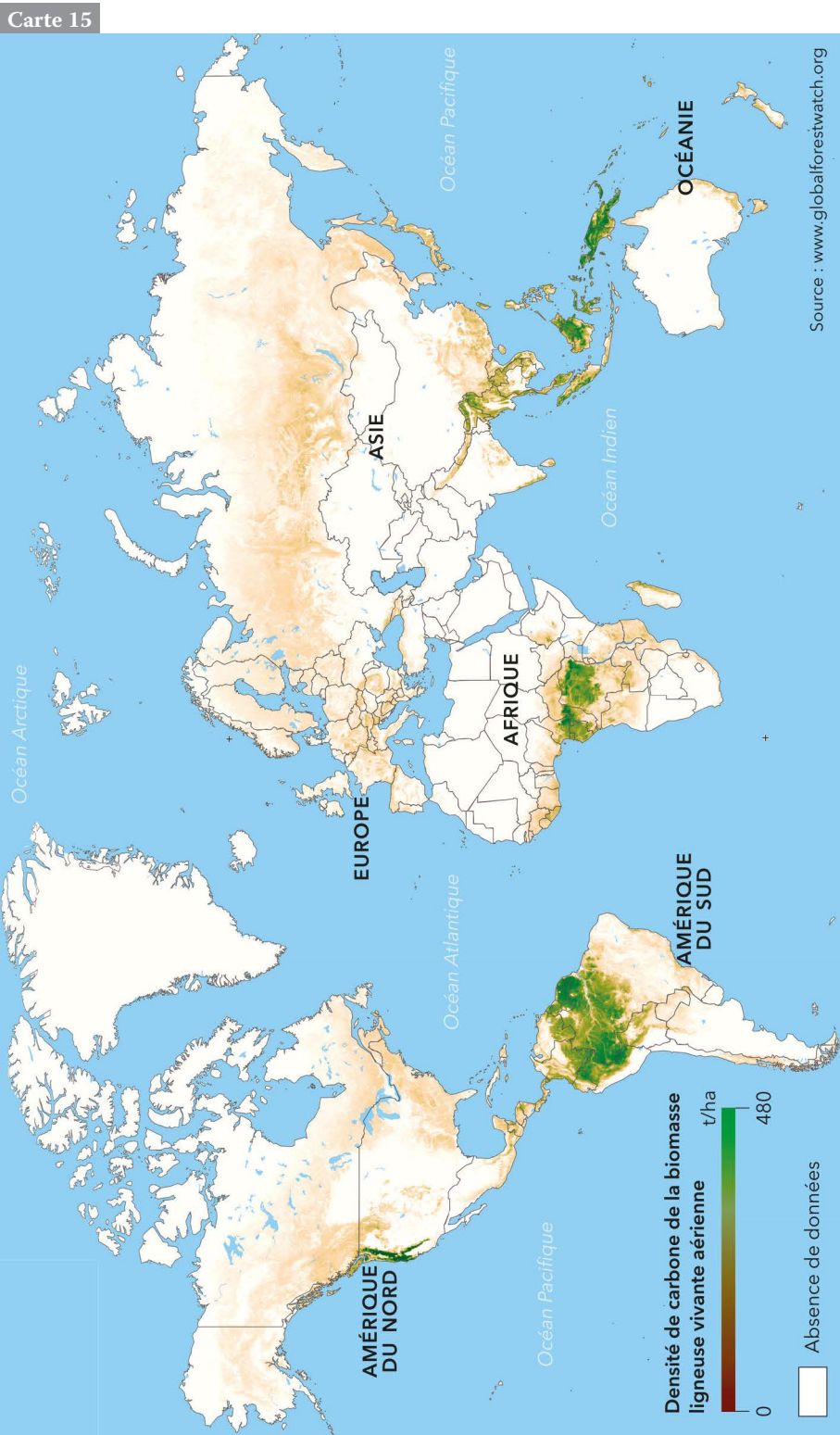
La carte des flux nets actuels de GES au niveau des forêts (carte 16) présente la différence entre le carbone émis par les forêts et le carbone absorbé par les forêts entre 2001 et 2023. Les valeurs négatives (en vert sur la carte) correspondent à des puits nets de carbone et les valeurs positives (en violet sur la carte) à des sources nettes de carbone. Les flux nets sont calculés sur la base des lignes directrices du Giec pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. La carte est consultable en version numérique et interactive sur la plateforme Global Forest Watch (www.globalforestwatch.org).

Cette carte fait clairement ressortir les émissions de GES dues à la déforestation et à la dégradation des forêts en Amérique du Nord (par les mégafeux notamment), en Amazonie ou encore en Indonésie. À l'inverse, on constate des absorptions de GES grâce aux forêts en Europe ou encore en Chine.

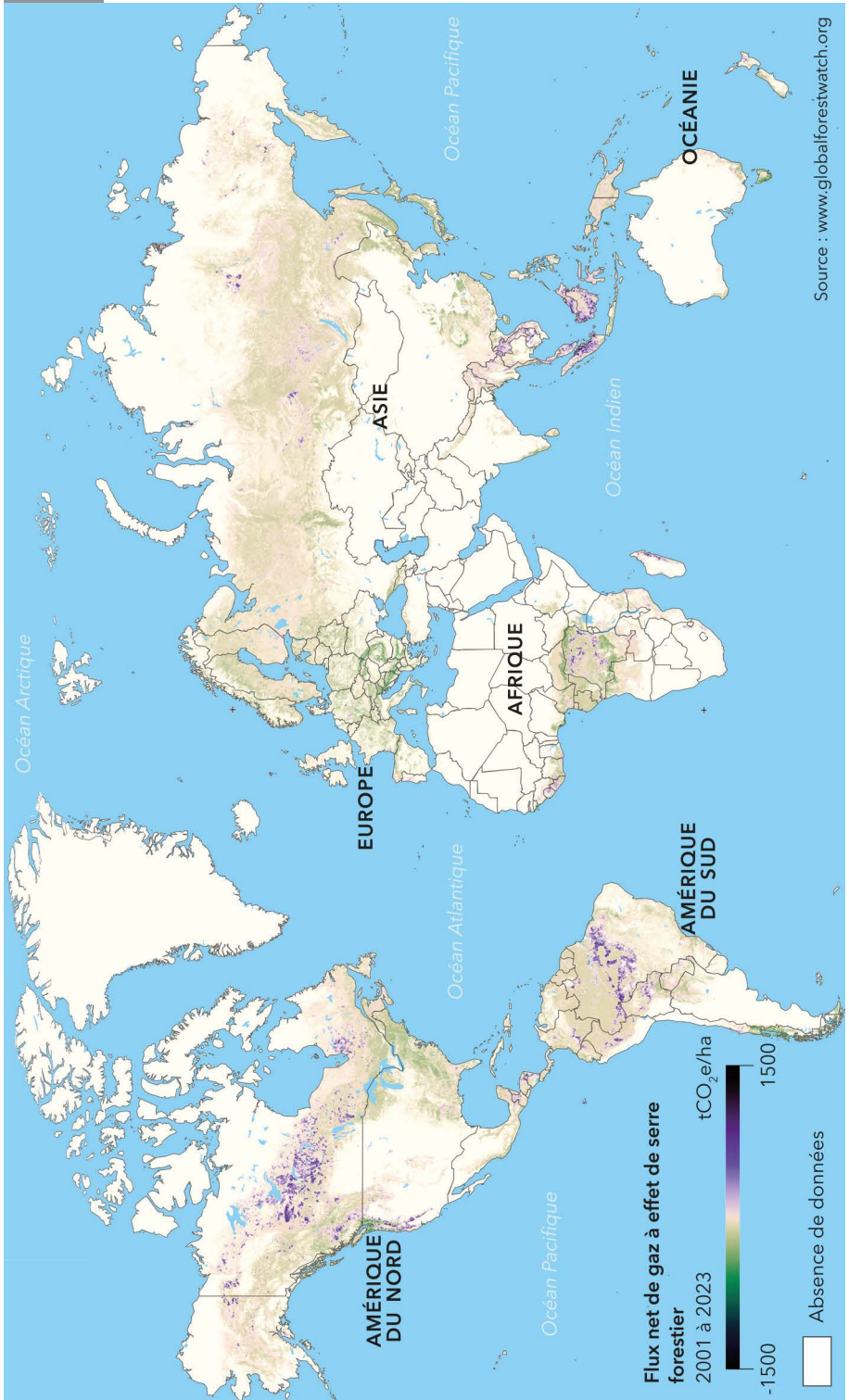
4.6. Le potentiel de séquestration de GES au niveau des forêts

Les forêts pourraient stocker 226 Gt de carbone de plus qu'actuellement, si on les laissait se reconstituer, dans des zones souvent en marge des grands massifs forestiers tropicaux, qui ne sont plus utilisées pour l'agriculture et qui restent libres de toute urbanisation (voir chapitre 9).

La carte du potentiel de séquestration de GES au niveau des forêts (carte 17) affiche le taux auquel les forêts pourraient capter le carbone de l'atmosphère et le stocker dans la biomasse vivante aérienne au cours des trente premières années de repousse de la forêt naturelle. Ces taux sont présentés pour les zones reboisables et excluent les zones de prairies et de cultures indigènes afin de préserver la production d'aliments et de fibres ainsi que l'habitat de la biodiversité. La carte est consultable en version numérique et interactive sur la plateforme Global Forest Watch (www.globalforestwatch.org).



Carte 16





Cette carte met en lumière l'importance de ce potentiel en Amérique centrale et dans les Caraïbes, ainsi qu'en Amérique du Sud, en Asie du Sud-Est et en Europe. En revanche, le potentiel paraît plus limité en Afrique, à l'exception de l'Afrique de l'Ouest.

5. Évolutions et impacts du changement climatique par grande région sur le secteur des terres

5.1. Les évolutions et les impacts du climat prévus en Afrique

Nicolas Viovy, Jacques André Ndione, Moussa Waongo, Maguette Kaire

5.1.1. Les évolutions du climat prévues en Afrique

5.1.1.1. Température

Comme sur l'ensemble des continents, la température en Afrique va augmenter, mais moins fortement, en moyenne, que sur les continents eurasiens et nord-américains. En outre, le changement climatique affectera de manière hétérogène les différentes régions africaines : dans les hautes latitudes, l'augmentation des températures sera plus importante que dans les zones tropicales, à l'exception du Sahel (figure 4.4). Par conséquent, cette augmentation (d'environ 0,8°C) sera plus importante dans le nord et dans le sud du continent que dans la zone équatoriale. Cependant, la température étant déjà élevée, en particulier dans les zones de savanes et semi-désertiques, de nombreuses régions vont atteindre des pics de température supérieurs à 50°C, un seuil critique pour les humains et l'ensemble des espèces.

5.1.1.2. Précipitations

L'incertitude sur l'évolution des précipitations en Afrique est importante. Les projections indiquent de forts contrastes avec une aridification de tout le pourtour méditerranéen ainsi que sur une partie de la côte atlantique et dans tout le sud du continent (figure 4.4). En revanche le reste du continent devrait voir ses précipitations augmenter. Contrairement à d'autres régions, comme l'Inde, la durée de la période de mousson ne devrait pas varier fortement. La variabilité interannuelle devrait augmenter conduisant à la fois à une augmentation des épisodes de précipitations intenses, mais également des périodes de sécheresse durant la saison des pluies. Ces effets pourraient malheureusement contrebalancer l'effet positif de l'augmentation moyenne des précipitations sur une partie du continent.

5.1.1.3. Vents

Comme dans toute la zone tropicale, s'il n'y a pas de tendance nette sur le changement de la fréquence des cyclones (qui pourrait même diminuer légèrement), leur intensité a en revanche augmenté et devrait continuer à croître dans le futur. Ce phénomène est lié à l'augmentation de la température des océans et de l'atmosphère dont la teneur en eau s'accroît.

5.1.1.4. Niveau marin

Comme pour le reste du globe, on attend une augmentation du niveau des mers qui affectera les zones côtières. La montée des eaux continuera, même si l'on parvient à stabiliser le CO₂ atmosphérique, et cela bien après que celui-ci commencera à diminuer. Le niveau marin a augmenté d'environ 23 cm depuis 1880 et devrait gagner encore 30 cm d'ici à 2050 (IPCC, 2014). Cet effet, combiné à l'augmentation de

l'intensité des cyclones, fait craindre des risques accrus de submersion de certaines régions côtières fortement peuplées (comme le delta du Nil, la ville de Lagos au Nigeria ou de Dakar au Sénégal).

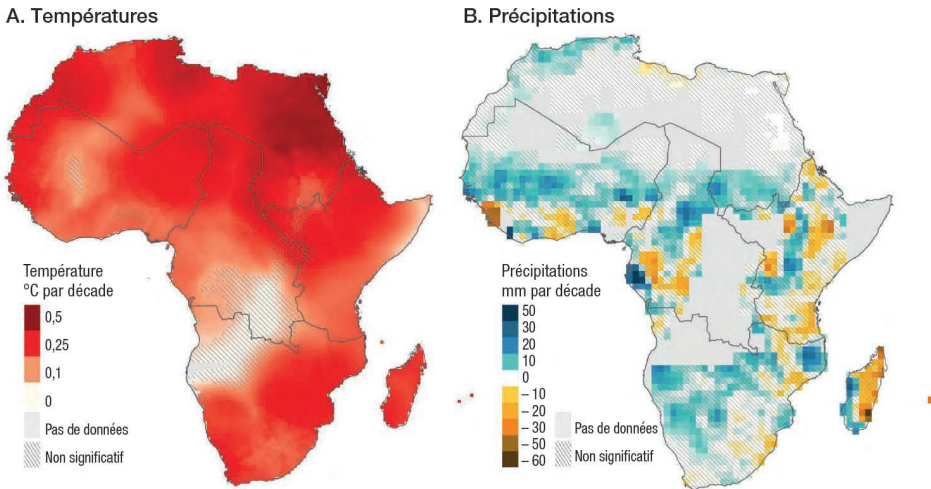


Figure 4.4. Tendances de l'évolution des températures et des précipitations sur les dernières décennies (1980-2015) en Afrique. Source : IPCC AR6 (2022).

5.1.2. Les conséquences du changement climatique sur les différents secteurs de l'agriculture en Afrique

Le changement climatique pose des défis complexes pour l'agriculture en Afrique, nécessitant des stratégies d'adaptation robustes pour assurer la résilience des systèmes agricoles et la sécurité alimentaire. L'augmentation de la variabilité des précipitations est un problème majeur, en particulier dans les zones fortement dépendantes du régime de précipitation telles que le Sahel (encadré 4.2), l'Afrique australe et la corne de l'Afrique. D'une part, l'imprévisibilité des précipitations par endroit complique la planification des cycles de culture, et les pluies tardives ou irrégulières peuvent entraîner une baisse des rendements ou la perte totale de certaines récoltes. D'autre part, le risque de sécheresses prolongées va augmenter et aura des impacts sur la production agricole. À noter que l'augmentation des températures accentue l'évapotranspiration et donc le risque de sécheresse agricole. Cette augmentation représente également un risque direct sur les cultures en renforçant le risque de stress thermique et donc de baisses de rendements. Le changement climatique risque également d'induire une extension des maladies et des ravageurs affectant à la fois les cultures et le bétail. Dans le même temps, les événements météorologiques extrêmes tels que les pluies torrentielles et les sécheresses accélèrent l'érosion des sols et la dégradation des terres, réduisant la fertilité des sols et la capacité de production agricole à long terme. L'augmentation de l'irrégularité des précipitations ainsi que l'augmentation des besoins en denrées agricoles liée à celle de la population (et à une éventuelle évolution du régime alimentaire) augmentent les besoins en irrigation, ce qui peut exacerber les conflits entre les agriculteurs, les éleveurs et les autres utilisateurs de l'eau, compliquant la gestion durable des ressources hydriques. Enfin, les contraintes climatiques forcent parfois les agriculteurs à abandonner des cultures traditionnelles diversifiées

Encadré 4.2. L'Afrique de l'Ouest sera fortement affectée par le changement climatique

Représentant actuellement seulement 1,8 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES), les pays de l'espace Cedeao (Communauté économique des États de l'Afrique de l'Ouest) contribuent de façon très faible aux changements climatiques. Selon les scénarios les plus pessimistes, l'Afrique de l'Ouest connaîtra, d'ici à 2060, une augmentation de température de +2,3 °C, soit un réchauffement de +0,6 °C par décennie. En effet, en Afrique de l'Ouest, le nombre de jours de chaleur potentiellement létale pourrait atteindre 50 à 150 jours par an pour un réchauffement climatique de 1,6 °C et 100 à 250 jours par an pour un réchauffement climatique de 2,5 °C, avec les augmentations les plus fortes dans les zones côtières. Les enfants nés en Afrique de l'Ouest en 2020 seront, en cas de réchauffement climatique de 1,5 °C, exposés à 4 à 6 fois plus de vagues de chaleur au cours de leur vie que ceux nés en 1960. Pour la zone tropicale de l'Afrique de l'Ouest, le risque de mortalité lié à la chaleur est 6 à 9 fois plus élevé que la moyenne des années 1950-2005 à 2 °C de réchauffement climatique. Avec l'urbanisation croissante, les villes comme Lagos, Niamey, Kano et Dakar sont particulièrement exposées (Trisos *et al.*, 2022). Quant à la pluviométrie, il est attendu qu'elle soit plus erratique et devrait entraîner un accroissement de la fréquence et de l'intensité des aléas climatiques extrêmes déjà connus dans la région : inondations, variabilité pluviométrique accrue (translation des isohyètes), poches de sécheresse extrêmement longues, entre autres corollaires, avec des conséquences humaines (dégradations des écosystèmes) et économiques dramatiques sur l'ensemble des secteurs économiques et sur les populations les plus vulnérables, dont notamment les femmes, les jeunes et les personnes âgées. Concernant la région emblématique du Sahel, les analyses récentes sur l'évolution actuelle du climat montrent une intensification encore plus aiguë des extrêmes. Les sécheresses sont de plus en plus intenses tout comme les inondations, au point que les chercheurs parlent de l'avènement d'une nouvelle ère climatique (Panthou *et al.*, 2018).

Les conséquences sont déjà dramatiques. En octobre 2022, des pluies intenses et des inondations ont tué des centaines de personnes, déplacé des milliers d'autres et détruit plus d'un million d'hectares de terres cultivées au Niger, au Mali et au Burkina Faso (UN News*). Par rapport à la période 1986-2005, un réchauffement planétaire de 3 °C devrait réduire la capacité de travail dans l'agriculture de 30 % à 50 % en Afrique subsaharienne, en raison de la hausse des températures. Le changement climatique a renforcé l'extrême pauvreté dans la région d'Afrique de l'Ouest de près de 3 % en 2021. Les inégalités de genre au Sahel et en Afrique de l'Ouest sont parmi les plus élevées au monde. De multiples crises (climatiques, sécuritaires, sanitaires et alimentaires) interconnectées exacerbent ces inégalités et accroissent la vulnérabilité des femmes.

Concernant les secteurs agricoles, le secteur de l'élevage est particulièrement affecté du fait de la diminution de la disponibilité en eau, d'une régression du potentiel de biomasse, d'une dégradation des pâturages (Sawadogo *et al.*, 2011) et d'une augmentation des cas de maladies thermiques. Avec un réchauffement global de 1,5 °C, les rendements du sorgho devraient diminuer en Afrique de l'Ouest, et une baisse de 9 % des rendements du maïs est attendue (figure 4.5). Chez les cacaoyers, plante qui croît à des températures optimales autour de 25 °C en Afrique de l'Ouest, des hausses des températures engendreront des chutes drastiques de la production de cacao d'ici 2030 au Ghana et en Côte d'Ivoire.

* UN News Global perspective Human stories. <https://news.un.org/en/story/2022/10/1129997>.

Encadré 4.2. (suite)

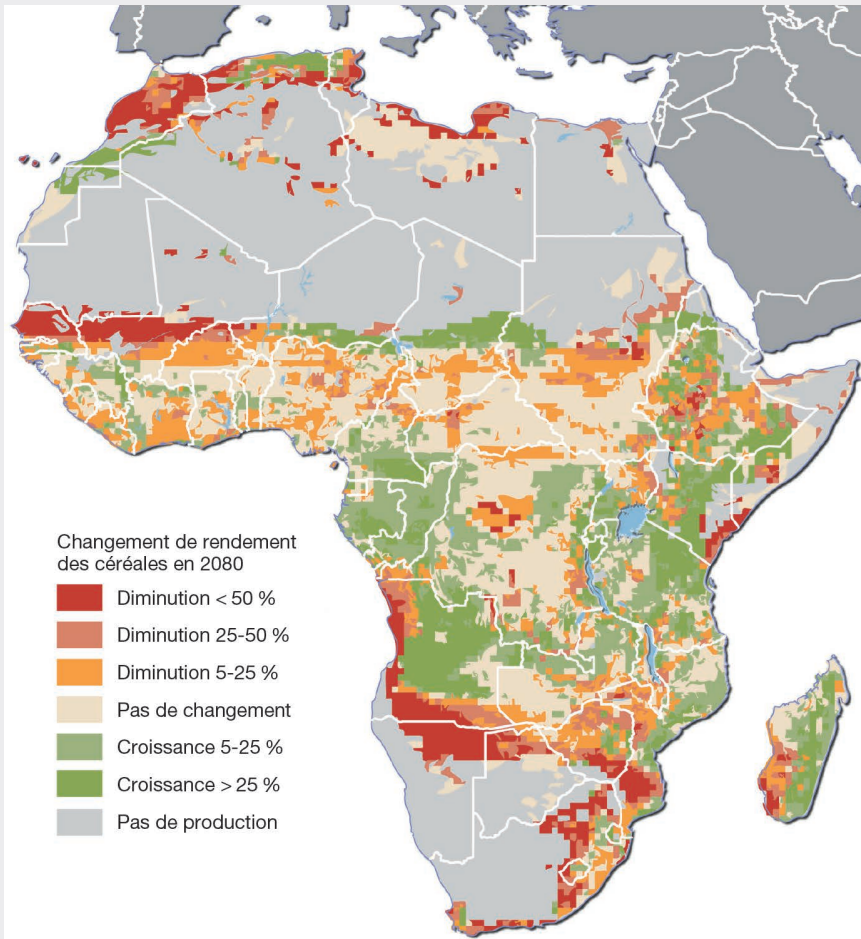


Figure 4.5. Changement des rendements en céréales à l'horizon 2080 en Afrique par rapport à l'année 2000 dans le cas d'un scénario à forte émission (A2). Source : Fischer *et al.* (2005).

au profit de cultures plus résistantes ou de monocultures, ce qui peut réduire la biodiversité agricole et augmenter la vulnérabilité à d'autres menaces, comme les ravageurs. Ces différents risques sont accrus par le fait que la majorité des agriculteurs en Afrique sont de petits exploitants, souvent pauvres : leur capacité (financières et technologiques) à s'adapter aux impacts du changement climatique est limitée, ce qui les rend particulièrement vulnérables.

5.1.3. Contribution du secteur agricole au bilan des gaz à effet de serre

Alors que l'Afrique représente une des régions les plus vulnérables au changement climatique, l'impact direct de son agriculture sur les émissions de GES est plus modéré que les grandes régions développées (figure 4.6). L'agriculture est en effet nettement moins mécanisée et utilise moins d'engrais, et le régime alimentaire est moins carné que dans les pays développés. En revanche, si l'on prend en compte l'impact lié au

changement d'utilisation des terres, principalement lié à la déforestation, le bilan des émissions de GES devient nettement plus important et représente alors 22% des émissions mondiales de GES du secteur AFOLU (Brouziyne *et al.*, 2023). L'impact du changement d'utilisation des terres en Afrique représente alors la moitié des émissions de GES. De même, la tendance est à une augmentation des émissions passant de 1,8 Gt eqCO₂ en 2000 à 2,2 Gt eqCO₂ en 2018 (FAO, 2020).

5.2. Les évolutions et les impacts du climat prévus en Asie du Sud-Est

Alain Rival

5.2.1. Les évolutions du climat en Asie du Sud-Est

Archipélagiques par nature, les pays d'Asie du Sud-Est subissent de fortes interactions terre-océan-atmosphère. Le climat est principalement tropical, chaud et humide avec des précipitations abondantes. La variabilité saisonnière des précipitations dans la région est principalement influencée par les systèmes de mousson, par la migration nord-sud de la zone de convergence intertropicale et par les cyclones tropicaux (principalement pour les Philippines et l'Indochine). L'Asie du Sud-Est (SEA) s'avère être l'une des régions du monde les plus vulnérables au changement climatique en raison de ses longs littoraux, de sa forte dépendance à l'égard de l'agriculture et de la sylviculture et plus généralement des ressources naturelles, notamment minières. Chaque année, les pluies torrentielles de la mousson et plusieurs cyclones font des centaines de morts en Asie du Sud-Est (et affectent des millions de personnes); elles contribuent aussi à la hausse du prix du riz et des denrées alimentaires.

L'Asie du Sud-Est abrite une concentration importante de pays fortement touchés par le changement climatique : quatre des dix pays les plus touchés au monde appartiennent à cette région, à savoir le Myanmar, les Philippines, la Thaïlande et le Viêt Nam. L'Indonésie est devenue le pays ayant le taux d'émissions de GES le plus élevé dans la région en 2021, enregistrant 2,05 milliards de tonnes. Après l'Indonésie, le Viêt Nam occupe la deuxième place avec 507,34 t, tandis que la Thaïlande occupe la troisième place avec 452,12 Mt. À l'inverse, le Timor-Leste présente les émissions de GES les plus faibles, soit 9,38 Mt (Sonobe *et al.*, 2024).

La région est confrontée à des émissions croissantes de GES d'origine agricole : les activités liées à l'agriculture, à la foresterie et aux diverses utilisations des terres sont essentielles pour la région, pour sa sécurité alimentaire et pour le maintien des moyens de subsistance dans les zones rurales. Ces activités affectent également de manière significative les émissions anthropiques de GES.

La déforestation est l'une des principales causes d'émissions de GES par le secteur agricole. La conversion massive des terres à des fins agricoles, notamment pour l'agriculture commerciale à grande échelle dont les plantations de palmiers à huile, libère le carbone retenu dans les arbres et diminue la capacité des forêts à absorber le CO₂.

Le développement des activités agricoles en Indonésie (Sonobe *et al.*, 2024) a stimulé la croissance économique, mais a aussi entraîné des coûts écologiques et économiques excessifs. Entre 2007 et 2018, ce développement a généré environ 48 milliards de dollars (5,7% du produit intérieur brut, PIB), mais la pollution de l'air et les incendies ont compensé plus de la moitié de cette somme. Les mesures de prévention des incendies et de restauration des tourbières réduisent désormais ces coûts.

Encadré 4.3. La région Afrique du Nord et Proche-Orient : un point chaud du changement climatique

La région Afrique du Nord – Proche-Orient (ANMO ou Mena en anglais) est à la fois une région particulièrement émettrice de GES (en 2018, cette région a produit 8,7 % des GES, alors qu'elle ne représentait que 6 % de la population mondiale) et une région particulièrement vulnérable aux effets du changement climatique. Elle comprend à la fois des pays exportateurs de pétrole à revenu élevé dans la zone du golfe Persique, des pays à revenu intermédiaire (Maroc, Turquie, Égypte, etc.) et des pays parmi les moins avancés tels que le Soudan, le Yémen et la Mauritanie.

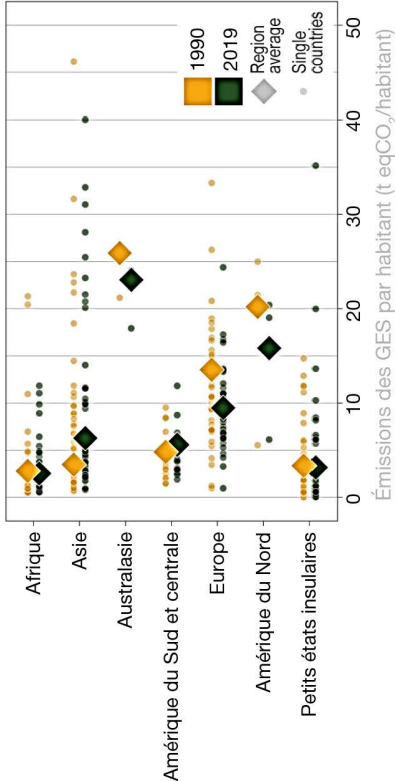
Le changement climatique va en effet exercer une pression de plus en plus importante sur les ressources en eau et agricoles déjà rares dans la région Mena, menaçant ainsi la sécurité nationale et la stabilité politique de toute la région. L'augmentation de la température observée dans cette région a été presque deux fois plus rapide que la moyenne mondiale. En plus des épisodes de chaleur, qui devraient être plus intenses et fréquents, les régions adjacentes à la mer Méditerranée devraient connaître une baisse des précipitations allant de 20 % à 40 %. Les sécheresses devraient quant à elles durer jusqu'à 90 % plus longtemps. La région est également particulièrement sensible au phénomène de désertification. L'Égypte, la Jordanie et la Palestine connaissent déjà un déclin de leur végétation, et ce, jusqu'à 80 % de leurs superficies terrestres. En plus d'augmenter l'aridité de la région, perturbant largement les modèles agricoles, ce phénomène devrait également accentuer le nombre et l'intensité des tempêtes de sable. Dans cette partie du monde, qui abrite déjà douze des dix-sept pays les plus touchés par le manque d'eau, et où la population est amenée à doubler d'ici 2050, les conséquences de la crise climatique sur les sociétés devraient être considérables. Les conséquences sur l'agriculture seront majeures, puisque le Giec estime que près de 45 % des terres agricoles devraient être exposées à la salinité, à l'épuisement des nutriments du sol et à l'érosion. Dans le même temps, cette région dépend fortement des importations de produits agricoles : 40 % de ses besoins alimentaires sont aujourd'hui couverts par des importations, et le changement climatique devrait encore accentuer cette tendance.

La poursuite du *statu quo* entraînera un réchauffement régional moyen supplémentaire pouvant atteindre 5 °C avant la fin de ce siècle, risquant ainsi de rendre inhabitable une partie de la région Mena, même si tous les pays ne sont pas égaux face aux impacts du changement climatique.

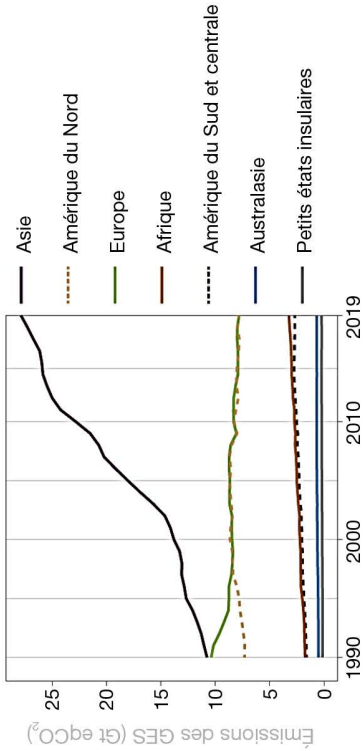
Figure 4.6. Tendances historiques des émissions de gaz à effet de serre (GES) en Afrique par rapport aux autres régions du monde.

(a) Émissions de GES par personne et par région, et leur évolution de 1990 à 2019 (les cercles représentent les pays, les losanges représentent la moyenne de la région) ; (b) Émissions totales de GES par région depuis 1990 ; (c) Émissions totales de GES en 1990 et en 2019 pour les quinze pays d'Afrique les plus émetteurs ; (d) Émissions totales en Afrique depuis 1990, ventilées par GES (à gauche) et par secteur (à droite). Les émissions de méthane et de CO₂ représentent une part presque égale des émissions de GES en Afrique, les secteurs d'émissions les plus importants étant l'énergie et l'agriculture (Crippa *et al.*, 2021). Les émissions de l'agriculture dans le panneau (d) ne comprennent pas l'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie (LULUCF CO₂). Les potentiels de réchauffement planétaire sur cent ans, conformes aux estimations du groupe de travail I (GTI ou WGI en anglais), sont utilisés. Les données sur les émissions proviennent de Crippa *et al.* (2021), compilées dans le chapitre 2 du groupe de travail III (GTIII) de l'AR6 du Giec.

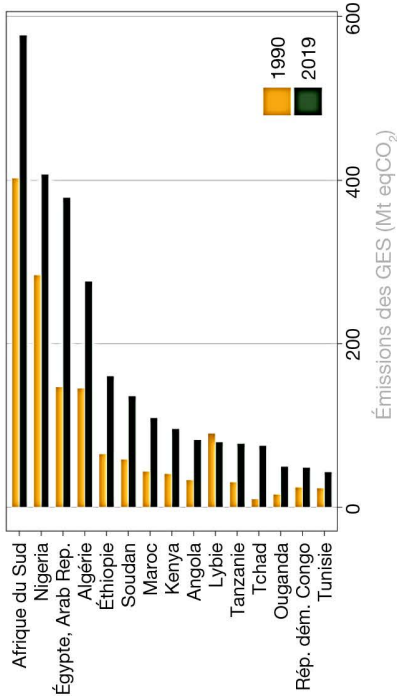
(a) Émissions régionales de GES par habitant



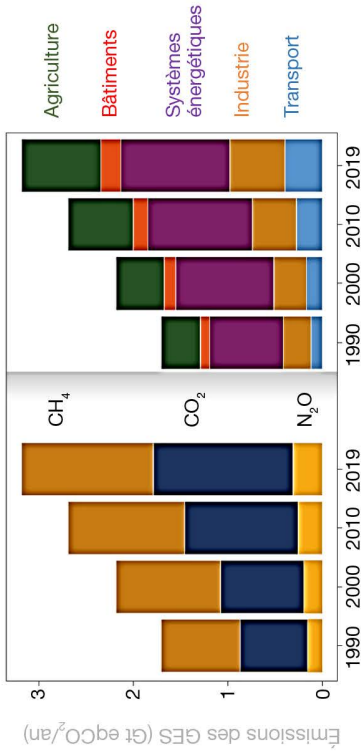
(b) Tendances régionales des émissions de GES



(c) Émissions des GES par pays (Afrique)



(d) Émissions totales de GES par gaz et par secteur (Afrique)



Très exposée, car majoritairement insulaire, et peu résiliente, la région est vulnérable aux effets du changement climatique (IPCC, 2022), avec une augmentation prévisible de l'intensité et de la fréquence des événements extrêmes liés au climat (inondations et sécheresses). Ce changement radical des régimes de précipitations saisonnières aurait d'énormes répercussions sur les moyens de subsistance, sur les infrastructures, sur la production agricole et sur la sécurité alimentaire de la région.

5.2.1.1. Température

La température moyenne en Asie du Sud-Est devrait continuer à augmenter au cours du xxi^e siècle. Les projections des simulations climatiques régionales multimodèles données par l'initiative du Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (Cordex-Sea) montrent que l'augmentation de la température sur les terres émergées serait comprise entre 3°C et 5°C d'ici la fin du xxi^e siècle par rapport à la période antérieure à 1986-2005. Pour tous les niveaux de réchauffement planétaire (voir chapitre 1), la région terrestre devrait se réchauffer légèrement moins que la moyenne mondiale.

5.2.1.2. Précipitations

Les projections de l'évolution future des précipitations sont très variables entre les sous-régions de l'Asie du Sud-Est et entre les modèles (figure 4.7). Ainsi, les jeux de données fournis par le projet Coupled Model Intercomparison Project (CMIP7) ont montré une augmentation des précipitations moyennes annuelles sur la plupart des zones terrestres d'ici le milieu et la fin du xxi^e siècle, avec une forte corrélation au modèle montrée pour les niveaux de réchauffement plus élevés seulement². Sur la base des simulations multimodèles Cordex pour l'Asie du Sud-Est, des augmentations significatives et solides des précipitations moyennes sur l'Indochine et sur les Philippines sont projetées, alors que l'on note une tendance à l'assèchement sur la partie maritime pour les périodes du début, du milieu et de la fin du xxi^e siècle.

À la fin du xxi^e siècle, une augmentation de 20 % des précipitations moyennes est prévue au Myanmar, dans le centre nord de la Thaïlande et dans le nord du Laos, et de 5 % à 10 % aux Philippines orientales et dans le nord du Viêt Nam. Des conditions nettement plus sèches sont prévues dans les autres régions de l'Asie du Sud-Est. Dans la région indonésienne, en particulier sur Java, Sumatra et Kalimantan, une diminution de 20 % à 30 % des précipitations moyennes est prévue d'ici à la fin du xxi^e siècle.

5.2.1.3. Feux

Près de la moitié des tourbières tropicales du monde se trouvent en Asie du Sud-Est, où elles constituent d'importants réservoirs de carbone. Au cours des trois dernières décennies, la plupart des 25 Mha de tourbières tropicales de la région ont été déboisées et asséchées. En conséquence, la baisse du niveau des nappes phréatiques expose la tourbe à l'oxydation, transformant en dioxyde de carbone le matériel végétal accumulé au cours des millénaires et provoquant alors un affaissement des terres. Près de 80 % des tourbières naturelles de la région ont été déforestées et drainées, la majorité d'entre elles étant aujourd'hui occupée par des plantations pérennes, forestières ou agricoles. Cette conversion accroît l'oxydation de la tourbe, ce qui contribue à une perte rapide de carbone dans l'atmosphère sous forme d'émissions de gaz à effet de serre, et augmente leur vulnérabilité aux incendies qui génèrent régulièrement des brouillards secs, avec de graves incidences sur la santé humaine (Mishra *et al.*, 2021).

2. <https://cordex.org/>.

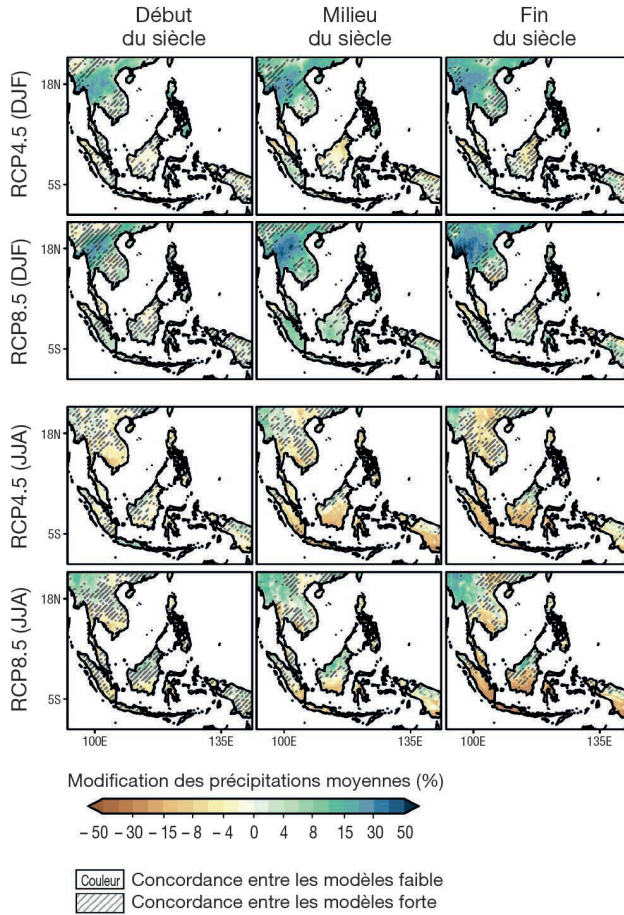


Figure 4.7. Projection des changements attendus par le biais de modèles climatiques régionaux (MCR) pour les précipitations moyennes entre le début (2011-2040), le milieu (2041-2070) et la fin (2071-2099) du xx^e siècle et la période historique 1976-2005. Source : Tangang *et al.* (2020 ; figure 10).

Les données proviennent des simulations de réduction d'échelle Cordex-Sea. Les lignes hachurées indiquent les zones où la concordance entre les modèles est faible (moins de 80 %). DJF : décembre-janvier-février ; JJA : juin-juillet-août.

Les incendies de forêt et de végétation, utilisés comme outils pour l'agriculture et la déforestation, sont une source majeure de pollution atmosphérique et peuvent causer de graves problèmes sanitaires dans de nombreuses régions d'Asie du Sud-Est. Le coût économique des incendies de forêt qui ont ravagé l'Indonésie au cours de l'épisode El Niño de 2015 a été estimé à plus de 16 milliards de dollars américains, avec plus de 100 000 décès prématurés. Pendant plusieurs jours, les incendies ont émis dans la région plus de dioxyde de carbone que l'ensemble de l'économie des États-Unis d'Amérique.

5.2.1.4. Niveau des mers

Les variations de l'élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale ont indéniablement commencé à avoir un impact sur les économies insulaires d'Asie du Sud-Est, déjà

très vulnérables (Idris *et al.*, 2023). L'élévation du niveau de la mer peut menacer la durabilité à long terme des communautés côtières et des écosystèmes fragiles tels que les récifs coralliens, les zones marécageuses et les mangroves. La région indopacifique abrite la plupart des forêts de mangrove du monde, bien que l'apport de sédiments dans cette région diminue, en raison de la construction de barrages sur les cours d'eau.

Bien que la région ait tendance à se réchauffer un peu moins que la moyenne mondiale, le niveau des mers augmentera plus rapidement qu'ailleurs et les lignes de rivage vont reculer dans les zones côtières où vivent 450 millions de personnes. La montée des eaux devrait coûter des milliards de dollars de dégâts aux grandes villes d'Asie au cours de la présente décennie, et son impact est amplifié par les mouvements tectoniques de la ceinture de feu et par les effets du pompage massif des eaux souterraines. Ainsi, dix-neuf des vingt-cinq villes les plus exposées à une élévation d'un mètre du niveau de la mer se trouvent en Asie, dont sept rien qu'aux Philippines.

Les zones côtières d'Asie du Sud-Est sont densément peuplées et soutiennent un large éventail d'activités économiques. L'impact physique de l'élévation du niveau de la mer se manifeste par l'érosion côtière et par l'inondation des zones les plus basses, l'intrusion de sel, les inondations dues aux ondes de tempête et aux marées hautes ainsi que la perte d'habitat. L'impact économique de l'élévation du niveau de la mer a pour conséquences la destruction de zones naturelles, de champs et d'habitations le long des côtes, des changements d'utilisation des terres, de systèmes de gestion de l'eau, de navigation et de gestion des déchets sur les zones littorales.

5.2.2. Les conséquences du changement climatique sur les différents secteurs de l'agriculture et de la forêt en Asie du Sud-Est

Le dernier rapport de l'Association des nations de l'Asie du Sud-Est (ASEAN) sur l'état du changement climatique (ASEAN, 2022) suggère que les actions d'adaptation et d'atténuation soient mises en synergie sur le terrain. Divers exemples incluent l'agriculture intelligente face au climat et les solutions basées sur la nature, intégrant l'adaptation basée sur les écosystèmes comme l'agroforesterie, la protection des forêts de mangroves et le renforcement de la gestion des forêts par la certification et par la réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts (REDD+) (voir chapitre 6). Une gestion appropriée des réservoirs destinés à l'hydroélectricité protégera également les communautés locales des inondations fluviales et d'autres événements extrêmes, tout en contribuant à l'atténuation du changement climatique.

Le rapport de l'IPCC prévoit des conséquences particulièrement graves pour l'Asie du Sud-Est, l'une des régions de la planète les plus vulnérables au changement climatique. Le bloc régional, essentiellement archipélagique, sera directement frappé par la montée du niveau des mers, les vagues de chaleur, la sécheresse et des épisodes de pluie plus intenses et plus fréquents. Connus sous le nom de « bombes à pluie », les épisodes de fortes précipitations s'intensifieront de 7 % pour chaque degré de réchauffement de la planète.

La biodiversité et les services écosystémiques jouent un rôle essentiel dans le développement socio-économique ainsi que dans l'épanouissement culturel et spirituel de la population asiatique. La richesse en espèces atteint son maximum dans le triangle corallien de l'Asie du Sud-Est (Philippines et Indonésie), et l'étendue des forêts de mangroves en Asie représente environ 38,7 % du total mondial. Ces écosystèmes

côtiers fournissent de multiples services écosystémiques liés à la production alimentaire par la pêche et l'aquaculture, à la séquestration du carbone, à la protection des côtes et au tourisme et loisirs.

La figure 4.8 représente schématiquement les impacts attendus du changement climatique dans certains pays d'Asie du Sud-Est. Elle illustre bien la diversité spatio-temporelle des impacts futurs sur la production alimentaire, soulignant qu'il y a des « gagnants » et des « perdants » associés au changement climatique à différentes échelles. La sécurité alimentaire de la région reste fortement dépendante de la production de riz, qui montre une vulnérabilité importante, notamment au Viêt Nam et en Thaïlande. D'autres scénarios prévoient au contraire une augmentation des rendements liée au changement climatique, du fait d'une augmentation de la productivité en riz à l'hectare.

Asie du Sud-Est						
Pays/Région		Denrée	Température	Précipitations	Impact sur la production	Année de projection
	Cambodge	Riz			▼ 45 %	2080
			+ 1 °C		▼ 4 %	
	Viêt Nam (nord-ouest)	Agriculture			▼	2050 et 2100
	Viêt Nam	Riz	+ 1 °C		▼ 5,5-8,5 %	
		Aquaculture			▼	
	Thaïlande (nord-est)	Riz	+	+	▼	
					14 %	2080
					▼ 10 %	2080
					▲ 2,6 %	2080-2099
					▲ 22,7 %	2080 et 2100
	Philippines	Céréales	+ 1 °C		▼	
	Asie du Sud-Est (5 pays)	Bétail			▼	2080

Figure 4.8. Projection des impacts du changement climatique sur l'agriculture et sur les systèmes alimentaires dans les sous-régions d'Asie, qui ont fait suite à l'AR5 de l'IPCC. Source : Shaw *et al.* (2022 ; figure 10.6).

Les données relatives aux effets observés du changement climatique sur l'agriculture et sur les systèmes alimentaires en Asie du Sud-Est restent peu nombreuses. La plupart des incidences ont été associées à la sécheresse, à la mousson et aux oscillations océaniques, dont la fréquence et la gravité ont été mises en relation et associées par plusieurs auteurs au changement climatique. En général, les conséquences majeures sur la production agricole, telles qu'observées par les agriculteurs aux Philippines et en Indonésie, concernent principalement les retards dans les dates de récolte, la baisse des rendements et de la qualité des produits, l'augmentation de l'incidence des ravageurs et des maladies, des retards de croissance, une mortalité accrue du bétail et une chute des revenus agricoles.

Dans la plupart des pays d'Asie du Sud-Est, les pêcheries sont des activités conduites à petite échelle, qui sont plus vulnérables aux impacts du changement climatique que les secteurs commerciaux, avec une tendance générale à la baisse du nombre de petites unités. L'analyse des activités liées à la pêche montre une diminution continue des prises, qui aura un impact sur le futur du secteur des pêches aux Philippines, en Thaïlande, en Malaisie et en Indonésie. Le changement climatique devrait réduire le potentiel de production global des pêcheries sous l'effet d'une augmentation de la température d'environ 2 °C d'ici à 2050.

Tout comme les pêcheries, l'aquaculture asiatique est très vulnérable au changement climatique. La majorité des éleveurs de crevettes ont observé que les conditions météorologiques ont changé brusquement au cours des cinq dernières années et que les températures élevées sont les plus préjudiciables parce qu'elles réduisent le taux de croissance, augmentent la sensibilité aux maladies et affectent la productivité des élevages. Les élevages de crevettes sont également affectés par les changements dans la variabilité et dans l'intensité des précipitations, perçues par la majorité des agriculteurs comme faisant partie des impacts du changement climatique. Au Viêt Nam, les petits agriculteurs sont vulnérables au changement climatique : ceux qui pratiquent un type d'élevage extensif avec peu d'intrants s'avèrent plus fragiles que ceux qui suivent un modèle plus intensif, soutenu par davantage d'investissements en capital. Les vagues de chaleur marine constituent une nouvelle menace pour la pêche et pour l'aquaculture, notamment en ce qui concerne la propagation des maladies. Dans les pays d'Asie du Sud-Est, on prévoit que plus de 30 % des zones aquacoles deviendront impropres à la production d'ici 2050-2070 et que la production aquacole diminuera de 10 % à 20 % d'ici 2050-2070 en raison du changement climatique.

L'Asie du Sud-Est abrite près de 15 % des forêts tropicales de la planète et comprend au moins quatre des vingt-cinq points chauds de biodiversité d'importance mondiale. La région fait également partie des principaux responsables de la disparition des forêts tropicales humides et de basse altitude. Ainsi, entre 1990 et 2010, l'Asie du Sud-Est a enregistré une perte nette moyenne de 1,6 Mha/an (0,6 % par an), réduisant le couvert forestier de la région de 268 Mha à 236 Mha. Compte tenu de ces taux et du fait que plus de 90 % des forêts d'Asie du Sud-Est n'étaient toujours pas protégées au début des années 2010, on craint que plus de 40 % de la biodiversité de la région ne disparaisse d'ici à 2100 (Estoque *et al.*, 2019).

Un grand nombre d'études publiées concerne les impacts prévus du changement climatique sur la production et sur l'économie des grandes cultures : le riz, le maïs et le blé étant les cultures qui bénéficient de la plus grande attention. Le changement climatique a, et continuera d'avoir, un impact significatif sur la production agricole sous diverses manières dans toute l'Asie. Un nombre croissant d'études sous-régionales et régionales mobilisant plusieurs outils de modélisation ont fourni des preuves significatives de l'impact prévu du changement climatique sur la production végétale, avec des indications claires sur les gagnants et les perdants en fonction des pays concernés (figure 4.8).

S'il est généralement admis que le CO₂ favorise la croissance et la productivité des plantes grâce à l'intensification de la photosynthèse, l'incertitude demeure quant à la mesure dans laquelle la fertilisation carbonée influencera la production agricole en Asie. En effet, la nutrition des plantes est sensible à l'augmentation des températures, à

l'évolution de la disponibilité de l'eau et aux différentes mesures d'adaptation employées sur le terrain. Les informations disponibles dans la littérature indiquent une nette tendance à la détérioration de la qualité des grains et donc à une valeur commerciale plus faible pour le riz cultivé dans un environnement à forte teneur en CO₂. À mesure que le réchauffement climatique se poursuivra au-delà de 1,5 °C, la probabilité d'incidences négatives sur la sécurité agricole et alimentaire dans de nombreuses régions asiatiques en développement augmentera. On observe une tendance croissante à la mise en place d'études et de modélisations plus intégrées, qui combinent des variables biophysiques et socio-économiques (y compris les pratiques de gestion) dans un contexte d'évolution du climat, afin de réduire l'incertitude liée aux impacts futurs du changement climatique sur le secteur agricole.

5.3. Les évolutions et les impacts du climat prévus en Amérique centrale et du Sud

Lilian Blanc, Sylvain Schmitt

5.3.1. Les évolutions du climat en Amérique centrale et du Sud

L'Amérique centrale et du Sud subissent déjà les effets du réchauffement climatique avec l'augmentation des cyclones, des ouragans, des inondations, des sécheresses, de l'élévation du niveau de la mer ou de la disparition des glaciers. Au-delà des conséquences sociales (mouvements migratoires notamment), le changement climatique affecte également l'approvisionnement en eau potable, la production alimentaire (agriculture et élevage) et les écosystèmes naturels de cette région qui contiennent 40 % de la biodiversité mondiale et 25 % des forêts du monde. Le changement climatique pourrait amplifier les émissions nettes de gaz à effet de serre des secteurs de l'agriculture, de la forêt et du changement d'utilisation des terres, responsables respectivement de 25,3 % et 20 % des émissions (Climate Watch, 2022).

5.3.1.1. Température

En Amérique centrale et du Sud, l'augmentation de l'effet de serre entraîne une hausse des températures moyennes et des températures moyennes maximales de 2 °C à 6 °C selon les régions et les scénarios climatiques (figures 4.9 et 4.10), et une diminution des températures extrêmes basses. Le Giec projette avec certitude que ces changements affecteront toutes les sous-régions du continent avec une certitude élevée à forte. De plus, la région présente actuellement des taux d'augmentation des températures supérieurs à la moyenne mondiale, augmentation qui devrait se poursuivre à l'avenir. Il s'agit d'un phénomène avec une forte certitude qui affecte(ra) toutes les sous-régions du continent.

5.3.1.2. Précipitations

Les évolutions des précipitations dans cette région sont moins certaines, mais de nombreux travaux prédisent des augmentations dans le nord-ouest de l'Amérique du Sud et le Sud-Est alors que des diminutions sont prévues dans le Nord-Est et le Sud-Ouest avec des taux très variables selon les scénarios. Ces résultats sont cohérents pour la fin du xxi^e siècle avec les scénarios d'augmentations les plus intenses (figure 4.9). Au-delà des tendances, une augmentation de l'intensité et de la fréquence des précipitations extrêmes et des inondations est prévue dans le nord, le nord-est, le sud-est et le sud de l'Amérique du Sud si l'augmentation de la température mondiale dépasse 2 °C (figure 4.9). Ces précipitations extrêmes entraînent de fortes inondations et des

glissements de terrain. Inversement, dans ces régions, le nombre et la fréquence des jours secs et des sécheresses sont également susceptibles d'augmenter. Le sud de l'Amérique centrale, le sud et le sud-ouest de l'Amérique du Sud devraient même connaître une augmentation des sécheresses agricoles et écologiques d'ici le milieu du xxi^{e} siècle. Enfin, dans la cordillère des Andes, la perte de volume des glaciers et le dégel du permafrost se poursuivront très probablement selon tous les scénarios du Giec, entraînant des inondations glaciaires à grande échelle et le débordement des lacs glaciaires.

5.3.1.3. Feux

La hausse des températures, de l'aridité et les épisodes de sécheresse plus intenses créent des conditions météorologiques propices aux incendies, plus fréquents et plus intenses, comme l'illustrent les récents méga-incendies qui ont touché l'Amazonie. Ces conditions météorologiques propices aux incendies devraient se multiplier dans le sud de l'Amérique centrale et dans le sud-ouest de l'Amérique du Sud. En moyenne, les habitants de la région ont été davantage exposés à un risque élevé d'incendie, entre 1 et 26 jours supplémentaires selon la sous-région, pour les années 2017-2020 par rapport

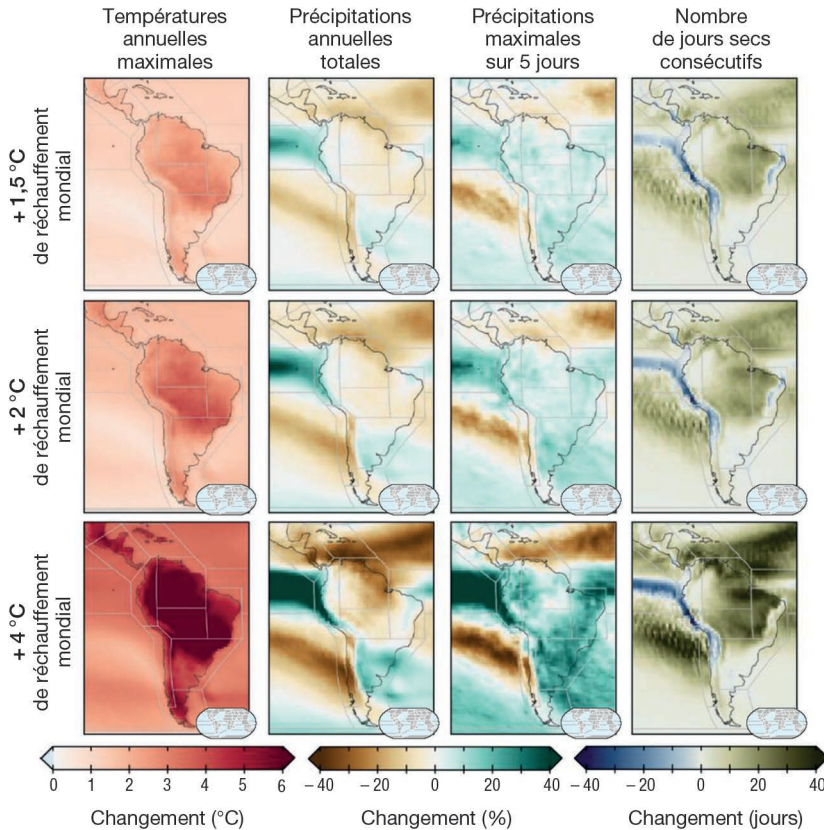


Figure 4.9. Changement des moyennes des températures annuelles maximales et des précipitations en Amérique du Sud et centrale sous trois scénarios d'augmentation de température globale : +1,5°C, +2°C et +4°C par rapport à la période 1850-1900. Source : IPCC AR6 (2022).

Les résultats sont basés sur des simulations de l'ensemble multimodèle CMIP6 (32 modèles mondiaux), en utilisant le scénario SSP5-8.5 pour calculer les niveaux de réchauffement.

à 2001-2004 (Romanello *et al.*, 2021). Cette augmentation des incendies et de l'aridité aura un impact potentiel sur un large éventail de secteurs (notamment l'agriculture, la sylviculture, la santé et les écosystèmes).

5.3.1.4. Niveau marin

Outre la hausse des températures plus importante que la moyenne mondiale en Amérique du Sud, le niveau relatif des mers a augmenté plus rapidement que la moyenne mondiale dans l'Atlantique sud et l'Atlantique nord subtropical, et moins rapidement dans le Pacifique oriental. Cette hausse devrait se poursuivre avec un degré élevé de certitude (figure 4.10), contribuant à l'augmentation des inondations côtières dans les zones de basse altitude et au recul du littoral le long de la plupart des côtes sablonneuses.

5.3.2. Les conséquences du changement climatique sur les différents secteurs de l'agriculture et de la forêt en Amérique centrale et du Sud

Cette région joue un rôle majeur à l'échelle mondiale à la fois pour la conservation de la biodiversité (en particulier avec les écosystèmes marins et terrestres en région amazonienne) et pour l'agriculture avec la production de denrées agricoles (bétail, café, banane, sucre, soja, maïs, canne à sucre). Cette région se caractérise également par deux facteurs majeurs qui la rendent particulièrement vulnérable aux changements climatiques. D'une part, les importants changements d'usage des terres (déforestation en région amazonienne) forment avec les changements climatiques une rétroaction positive accentuant ses effets. D'autre part, la région se caractérise par de fortes inégalités sociales (accès au foncier par exemple) et géographiques (urbains *vs* ruraux), avec notamment un pourcentage élevé de la population en dessous du seuil de pauvreté.

Le changement climatique a eu un impact significatif sur les secteurs de productions agricoles dans la plupart des régions avec l'ampleur des changements des précipitations, les températures extrêmes et les changements dans le calendrier. Les cultures, l'élevage, la pêche et les systèmes alimentaires en général ont subi des impacts des changements climatiques moyens à élevés. Dans toutes les régions, des réductions sur la durée de croissance des cultures ont été observées pour les blés (hiver et été), le riz, le maïs et le soja, entre 1981 et 2019. Cette réduction s'élève à 10% pour le riz dans le sud-ouest de l'Amérique du Sud et à 5% pour le maïs en Amérique centrale. La réduction des durées de croissance diminue les rendements.

Pour les trois secteurs de production (cultures annuelles et pérennes, et élevage), on observe cependant de fortes variabilités régionales. Dans le nord-est de l'Amérique du Sud, les épisodes secs, avec de fortes températures et une diminution des précipitations, ont été dommageables à ces trois secteurs agricoles. D'autres régions ont également été touchées comme l'Amérique centrale, le sud-est et le sud-ouest de l'Amérique du Sud (cultures annuelles), et l'extrême sud du continent (élevage). À l'avenir, ces trois secteurs de production seront très affectés dans les régions du nord-est et du nord-ouest, et dans une moindre mesure dans la région du Cerrado (centre du continent). Dans cette région, les rendements du soja et du maïs subiront l'un des impacts négatifs les plus forts selon les estimations des scénarios RCP4.5 et RCP8.5 et nécessiteront des niveaux élevés d'investissements dans l'adaptation s'ils continuent à être cultivés dans les mêmes zones qu'actuellement (confiance élevée).

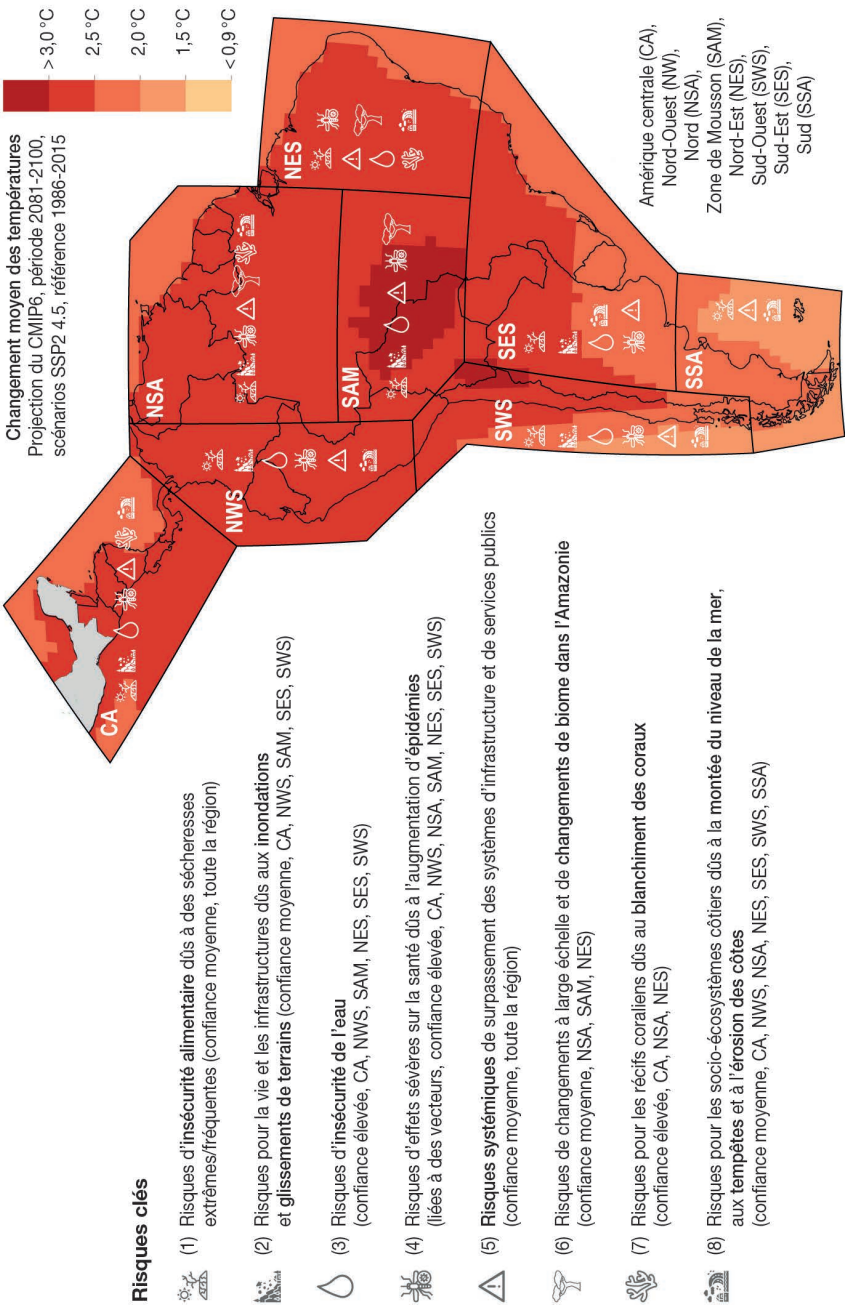


Figure 4.10. Synthèse des principaux risques liés aux changements climatiques pour l'Amérique du Sud et l'Amérique centrale. Source : IPCC AR6 (2022). La carte de base indique le changement de température moyenne entre le scénario SSP2-4.5 utilisant les projections du modèle CMIP6 pour 2081-2100 et une période de référence de 1986-2015.

En Amérique centrale et dans les contreforts andins, les cultures annuelles seront également très affectées. Ces effets devraient aggraver la situation pour les petits et moyens agriculteurs et pour les populations autochtones dans les zones montagneuses de ces régions. Dans le cadre du scénario A2 (futur avec de fortes émissions de GES entraînant un réchauffement de 3,2 à 5,4 °C avec une croissance économique régionalisée et une forte augmentation de la population), les réductions de rendement en 2050 sont estimées à 19 % (haricots) et entre 4 % à 21 % (maïs) pour l'Amérique centrale. La sécurité alimentaire dans ces deux régions sera donc largement compromise (confiance élevée).

La forêt amazonienne, l'un des plus grands réservoirs de biodiversité et de carbone au monde, a déjà été et continuera d'être très vulnérable à la sécheresse (degré de confiance élevé). La forêt amazonienne a ainsi été fortement touchée par les sécheresses sans précédent et les températures élevées observées en 1998, 2005, 2010 et 2015/2016, qui sont attribuées en partie au changement climatique, provoquant une surmortalité des arbres. Les conséquences de ces fortes anomalies climatiques sont une surmortalité des arbres et une réduction de la productivité forestière à l'échelle du bassin. Ces fortes modifications dans le fonctionnement des forêts transforment momentanément les forêts de puits de carbone à source de carbone (confiance élevée). En outre, l'effet combiné de la déforestation provoquant un changement d'utilisation des terres, de la dégradation forestière (Bourgoin *et al.*, 2024; Le Roux *et al.*, 2022) et du changement climatique augmente la vulnérabilité de ces écosystèmes terrestres aux événements climatiques extrêmes (Phillips *et al.*, 2009; Bennett *et al.*, 2023). Avec ces changements, la probabilité de transition, c'est-à-dire d'une transition de la forêt tropicale vers d'autres systèmes forestiers (forêt saisonnière) ou savanicoles, est désormais évaluée avec un degré de confiance moyen.

5.4. Les évolutions et les impacts du climat prévus dans les petits États et territoires insulaires d'Océanie

Séverine Bouard, Catherine Sabinot, Pierre-François Duyck, Philippe Birnbaum, Audrey Leopold, Julien Drouin, Fabian Carriconde, Laurent L'Huillier, Christophe Menkès

5.4.1. Un équilibre incertain face au changement climatique

Les territoires et pays d'Océanie présentent une grande diversité en matière de géographie, d'histoire géologique, de superficie, de topographie et de conditions climatiques locales. Cependant, cette diversité, à l'origine d'une richesse culturelle, biologique et alimentaire unique, les expose également à une forte vulnérabilité face aux aléas climatiques. Un seul cyclone, une année de sécheresse ou une invasion biologique peut réduire à néant les productions agricoles d'un pays entier et éradiquer de nombreuses espèces endémiques.

Très éloignés les uns des autres, ils ont des superficies très variables³, conduisant Hau'ofa à nommer la région « notre mer d'îles » (2013) (figure 4.11). Situés dans une région du monde géologiquement très active, ces archipels ont des histoires géologiques complexes, conduisant à une diversité conséquente de leurs substrats géologiques et pédologiques. Les pays mélanésiens sont plutôt vastes et montagneux, riches en

3. Superficie de 462 840 km² pour la Papouasie–Nouvelle-Guinée, et de 20 km² pour Nauru.

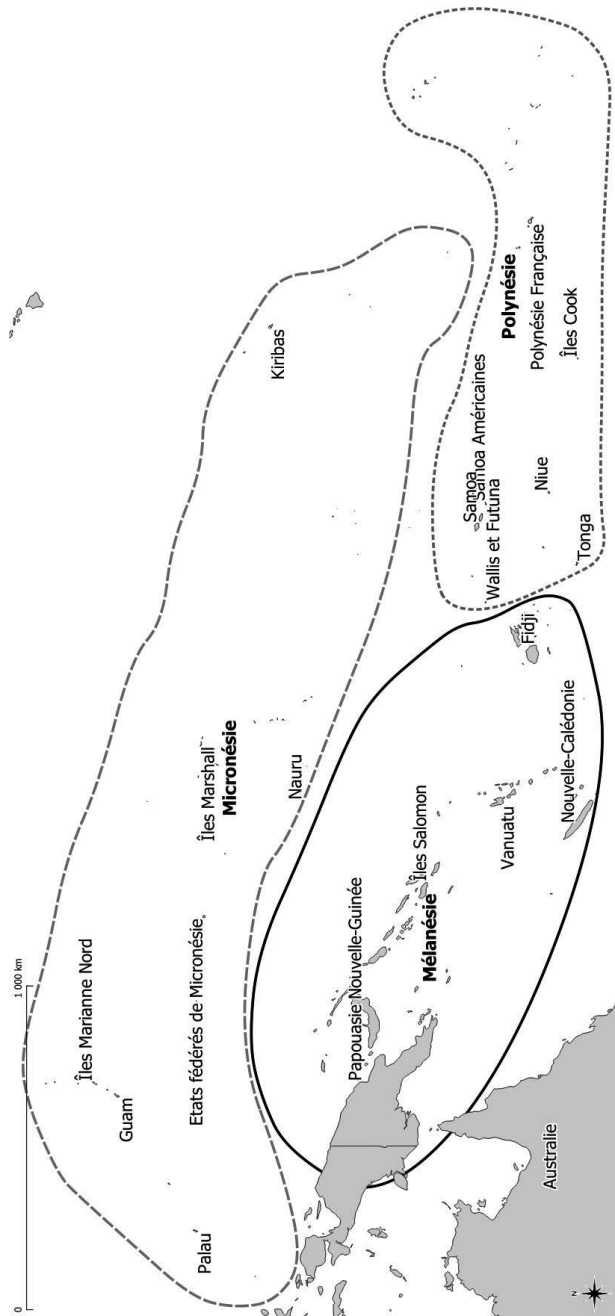


Figure 4.11. Les trois grandes sous-régions du Pacifique sud insulaire.
Source : carte réalisée par Jonas Brouillon, Institut agronomique néo-calédonien (IAC).

ressources minérales, tandis que les îles polynésiennes et micronésiennes varient depuis les petites îles volcaniques aux atolls coralliens. Ces îles possèdent une grande diversité d'écosystèmes terrestres et récifaux, abritant une biodiversité très riche, source de nourriture pour les communautés.

Si les pays insulaires du Pacifique ne représentent que 0,06 % des émissions totales de dioxyde de carbone dans le monde en 2019⁴, ils sont particulièrement touchés par le changement climatique, remettant même en cause leur existence, puisque certains sont menacés de submersion (Kiribati, Tuvalu et les îles Marshall notamment).

5.4.2. L'insularité, un défi géographique qui complexifie les projections climatiques

Dans cet « océan d'îles », les scénarios du futur les plus probables se situent entre le SSP2-4.5 et SSP3-7.0 (IPCC, 2022). Or les modèles climatiques globaux utilisés dans le Pacifique et employés dans les rapports du Giec présentent de nombreux biais et incertitudes, en particulier en ce qui concerne les simulations incertaines de la zone de convergence du Pacifique sud (SPCZ) (Brown *et al.*, 2020) quels que soient les scénarios (figure 4.12).

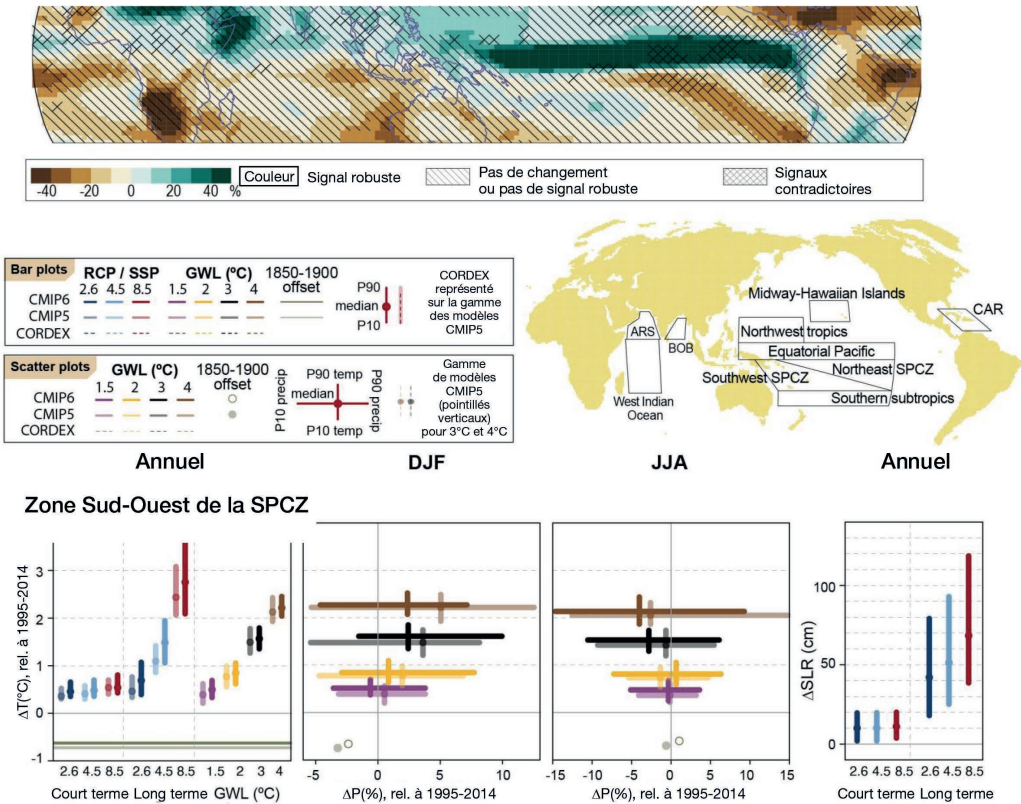
Ces incertitudes se répercutent sur l'évaluation future d'événements climatiques tels qu'El Niño-Southern Oscillation (ENSO), les cyclones, les canicules, les pluies intenses et les sécheresses. Dans le Pacifique sud, les études prévoient une tendance à la diminution du nombre de cyclones (avec cependant une faible confiance) dans les scénarios considérés comme réalistes, mais sans consensus sur l'intensité des vents cycloniques futurs de ces phénomènes. En revanche, l'intensité des pluies cycloniques va augmenter (Dutheil *et al.*, 2020; Dutheil, 2019; Walsh *et al.*, 2012 et 2020; Knutson *et al.*, 2020). Quels que soient les scénarios, l'augmentation prévue du nombre des canicules, de la durée des vagues de chaleur et des records de température est quasiment certaine (Power et Delage, 2019), mais reste difficile à quantifier en raison des biais des modèles. En effet, les modèles du Giec ne tiennent pas compte des phénomènes locaux résultant de l'interaction avec la topographie complexe des îles, car leur maille est trop grossière, de l'ordre de la centaine de kilomètres (Evans *et al.*, 2024). Ces lacunes compromettent la capacité à estimer de manière fiable l'évolution future des précipitations, des sécheresses et des vagues de chaleur.

Les quelques projections climatiques pour la région, à plus haute résolution, indiquent néanmoins un assèchement général du Pacifique central (Dutheil *et al.*, 2020). Les épisodes pluviométriques extrêmes pourraient augmenter en fréquence passant d'une occurrence tous les vingt ans (période 1986-2005) à un événement tous les dix, voire 4 à 6 ans d'ici 2090, selon certains scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Leur intensité devrait augmenter. Une hausse de 0,5 à 1,3 °C de la température atmosphérique moyenne a été observée sur les îles du Pacifique ouest depuis la période préindustrielle (Whan *et al.*, 2014). Selon les scénarios d'émissions, cette augmentation de la température moyenne pourrait atteindre 2 °C à 3,7 °C d'ici 2090 (figure 4.12). Une élévation du niveau des mers de 20 cm à 120 cm d'ici 2100 est projetée selon les

4. Données de la Banque mondiale Wallis et Futuna qui n'apparaît pas dans cette base de données. Avec l'Australie et la Nouvelle-Zélande, ce chiffre grimpe à 1,3 % en 2023 (<https://data.worldbank.org/indicator/EN.GHG.ALL.MT.CE.AR5>). Les chiffres montrent l'importante contribution du secteur minier aux émissions. Avec 6,614 Mt de CO₂ pour 270 000 habitants en Nouvelle-Calédonie contre 3,401 Mt de CO₂ pour 918 000 habitants aux Fidji (dernières données disponibles de 2023).

scénarios, comparativement aux moyennes 1995-2014 (figure 4.12). La montée du niveau de la mer varie considérablement entre les archipels de la région. Surtout, cette élévation observée n'est pas entièrement attribuable à la modification du niveau marin par le changement climatique, car bien des îles du Pacifique subissent aussi un enfoncement tectonique (Martinez-Ascencio *et al.*, 2019). Les îles basses comme Kiribati, Tuvalu et les îles Marshall sont déjà menacées de disparition. Un premier traité bilatéral offrant une voie migratoire aux Tuvaluans vers l'Australie a été signé en novembre 2023. Aux îles Fidji, on observe une augmentation du niveau de la mer proche de 5 mm par an. Cette hausse augmentera ainsi les risques d'inondations côtières et intensifiera l'érosion côtière causée par les cyclones, les houles distantes extrêmes ou les tsunamis.

Projection des modifications moyennes (en %) des précipitations sur la période juin-juillet-août en 2081-2100 par rapport à 1995-2014 selon RCP8.5



Panneau du haut, modification moyenne attendue (en%) des précipitations dans le Pacifique tropical, avec en hachuré les zones non significatives (dont la SPCZ). Panneaux du bas : changements moyens de la température annuelle moyenne de l'air en surface, des précipitations et de l'élévation du niveau de la mer par rapport à la ligne de base 1995-2014 dans la zone Southwest SPCZ. Ces évolutions sont données annuellement ou sur une base saisonnière – décembre-janvier-février (DJF), juin-juillet-août (JJA) – pour les différents scénarios (RCP/SSP), mais également pour les niveaux de réchauffement (GWL : Global Warming Level), et pour les exercices CMIP6 et CMIP5 (couleurs). Les barres représentent 90% des distributions. Source : IPCC (2021).

5.4.3. Une forte dépendance climatique des écosystèmes et des agrosystèmes

Le Pacifique rassemble cinq des trente-six « points chauds de la biodiversité mondiale » et présente une forte endémicité de ses ressources biologiques. Cette dernière est le résultat de l'isolement géographique de ces îles, de la diversité des habitats disponibles et de processus évolutifs spécifiques. Ces territoires abritent de très nombreuses espèces végétales et animales remarquables qui ne se trouvent nulle part ailleurs (Payri et Vidal, 2019). Mais l'élévation du niveau de la mer, les phénomènes météorologiques extrêmes, la modification des températures et les changements des régimes de précipitations menacent les habitats spécifiques de ces espèces.

Une simulation basée sur neuf scénarios de changement climatique prédit que l'aire de répartition de 87 % à 96 % des espèces d'arbres indigènes et endémiques de Nouvelle-Calédonie aura diminué d'ici 2070, que 52 % à 84 % des espèces perdront au moins la moitié de leur aire de répartition actuelle et que 0 % à 15 % disparaîtront (Pouteau et Birnbaum, 2016). Par ailleurs, la fragmentation intensive de ces écosystèmes et les invasions d'espèces exotiques perturberont l'équilibre écologique dans lequel ces espèces endémiques se sont développées. Le changement climatique, en interaction avec l'augmentation des flux de passagers et des échanges commerciaux, change la distribution géographique des ravageurs et des maladies des cultures, mais aussi modifie directement leurs impacts (Bale *et al.*, 2002; Hulme, 2011).

Les îles font face à des menaces multiples sur leurs ressources terrestres (Nurse *et al.*, 2014; Wong *et al.*, 2014) et tout particulièrement sur les sols. Les effets de l'accroissement des températures sont multiples et peuvent affecter leur fertilité et leur santé (Filho *et al.*, 2023). La matière organique des sols (MOS) est cruciale pour la fertilité des sols (voir chapitre 17), mais son stock peut diminuer avec l'augmentation des températures qui favorise la minéralisation de la MOS, affectant la capacité de rétention en eau des sols, leur porosité, et pouvant les rendre plus sensibles à l'érosion. L'intensification des événements pluvieux augmente la déstructuration, la lixiviation (perte d'éléments nutritifs) et l'acidification des sols, tandis que les sécheresses et l'élévation du niveau marin augmentent la salinité, réduisent la disponibilité en eau et favorisent la désertification. Le changement climatique peut aussi modifier la biodiversité des sols. Ainsi, les sols des territoires insulaires étant souvent naturellement peu fertiles (Nouvelle-Calédonie, Pillon *et al.*, 2021) et disposant d'une biodiversité unique (Carriconde *et al.*, 2019), les systèmes agricoles et forestiers pourraient être particulièrement transformés. Si les sols de la région et leur fonctionnement restent très méconnus malgré de récents travaux sur le sujet (comme Carriconde *et al.*, 2019; Demenois *et al.*, 2020; Kulagowski *et al.*, 2021; Leopold *et al.*, 2021), limiter les effets du changement climatique sur les agroécosystèmes pourra se faire en s'appuyant tant sur les savoirs déjà éprouvés par les populations que sur ceux apportés par le monde scientifique. Une dynamique de cocréation de savoirs sera essentielle pour assurer une résilience suffisante des productions agricoles.

5.4.4. Des sociétés insulaires du Pacifique résilientes... mais jusqu'à quel point ?

Les systèmes agricoles des États et territoires insulaires du Pacifique reposent principalement sur des agricultures de types familiales dont la production est destinée majoritairement à la consommation locale. Les cultures alimentaires de base comprennent l'igname, le taro, la patate douce, le manioc, les bananes, les fruits tropicaux et les légumes. Cultiver ces produits aux besoins hydriques contrastés repose sur des

techniques adaptées aux conditions locales, différentes en Mélanésie, en Polynésie et en Micronésie. Les savoirs autochtones associés à ces pratiques sont riches et diversifiés, mais ils sont mis à mal avec les transformations des modes de vie (migrations et réorganisation du travail, etc.), avec la réduction du foncier disponible et avec les nouvelles contraintes climatiques et environnementales. Les systèmes de production en agriculture et élevage pour le marché local et l'export (kava, cacao, épices, canne à sucre, bovins, etc.) sont aussi soumis aux effets du changement climatique. Les changements dans les sols, la gourmandise en eau de ces systèmes, les pressions des ravageurs et maladies mettent en péril les ressources financières des ménages qui en dépendent, ainsi que celles de ces pays aux balances commerciales déjà déséquilibrées. Même les investissements capitalistiques permettant une relative artificialisation des conditions de cultures (serres, cultures hors-sol) sont vulnérables aux événements climatiques les plus violents. Quant à l'élevage, les efforts de tropicalisation des troupeaux bovins, comme en Nouvelle-Calédonie, pourraient rendre ces systèmes de production relativement résilients, mais la gestion des pâturages, encore peu sophistiquée, soumise à la pression des espèces végétales envahissantes, et peu agile face à l'irrégularité de l'allongement et l'intensification des sécheresses, permettra difficilement d'atteindre une production satisfaisant les besoins locaux.

Le changement climatique aura des répercussions significatives sur les systèmes agricoles et alimentaires, avec des conséquences sur la sécurité alimentaire, la santé et le développement économique (Barnett, 2020; McCubbin *et al.*, 2015; Klöck et Fink, 2019). L'intensification des inondations et des sécheresses a des conséquences à court terme — les catastrophes naturelles pouvant détruire des récoltes entières et décimer les cheptels — comme à long terme sur la production alimentaire. Ces phénomènes accélèrent également la perte de terres arables déjà à l'œuvre dans certaines zones en raison de l'érosion côtière, de l'élévation du niveau de la mer et des intrusions salines. Associées aux processus décrits ci-dessus, les superficies cultivées et cultivables risquent de diminuer ainsi que la diversité des plantes adaptées à ces nouveaux climats et milieux.

Cependant, les habitants des archipels du Pacifique ont des expériences locales différentes de la vision scientifique du changement climatique (Fache *et al.*, 2019). Les changements environnementaux et sociaux sont perçus comme très étroitement liés et doivent être traités simultanément (Pascht, 2019). Les habitants ont déjà développé des pratiques et des stratégies de diversification pour limiter les dégâts sur leurs cultures, pour faire face aux pertes, et pour s'adapter aux contraintes environnementales. Les stratégies de subsistance reposant sur la pluriactivité sont particulièrement mises à contribution après les catastrophes naturelles (voir chapitre 5). Se tourner vers le lagon et ses ressources halieutiques est fréquent à la suite de la destruction des cultures et permet d'attendre un nouveau cycle de production lancé juste après l'événement. Toutefois, la fréquence des événements dévastateurs et la transformation concomitante des écosystèmes terrestres, marins et coralliens fragilisent nettement la sécurité offerte par la pluriactivité. Cela soulève des questions sur les risques, les enjeux et la résilience de ces habitants face aux aléas climatiques intenses et pousse à s'interroger sur les politiques locales et globales à mettre en œuvre⁵.

5. Le projet Clipssa, construit sur un partenariat impliquant en particulier l'AFD, l'IRD, Météo-France, l'IAC, le Criobe et les collectivités des territoires d'outre-mer et du Vanuatu, s'intéresse à ces questions : www.clipssa.org.

Les petits États et territoires insulaires du Pacifique, souvent peu considérés par les grands États, alors qu'ils enregistrent les impacts négatifs les plus importants du changement climatique, font face à un besoin urgent et vital de plus de recherches et de données.

5.5. Les évolutions et les impacts du climat prévus en Europe

Nicolas Viovy

5.5.1. Les évolutions du climat en Europe

5.5.1.1. Température

Le premier effet directement lié à l'effet de serre consécutif à l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère est l'augmentation des températures. C'est un phénomène sur lequel on a une large certitude et qui affectera l'ensemble du continent. L'accroissement des températures étant plus rapide sur les continents que sur l'océan, et plus rapide dans les zones tempérées et boréales qu'au niveau des tropiques, cette augmentation des températures sur l'Europe sera plus importante que la moyenne globale. À ce phénomène s'ajoute le fait que les politiques d'amélioration de la qualité de l'air depuis les années 1980, qui ont permis de réduire fortement la pollution, ont réduit la quantité d'aérosols. Or ces aérosols ont un pouvoir refroidissant, leur diminution a ainsi participé à l'augmentation des températures récemment. Ainsi, l'accroissement de la température en France sur la dernière décennie a atteint 1,5 °C depuis l'époque préindustrielle (1860) contre 1,1 °C en moyenne globale. Si l'on regarde plus en détail la répartition spatiale et saisonnière de l'augmentation de la température future, on constate une augmentation plus importante dans le nord et le centre de l'Europe que dans le Sud pendant l'hiver, alors que cette augmentation sera plus forte sur tout le pourtour méditerranéen pendant l'été. Cette augmentation plus forte dans le Nord et le Centre en hiver est liée à la rétroaction de la neige dont la couverture va fortement diminuer avec l'augmentation des températures. Les surfaces vont ainsi être plus sombres (baisse de l'albédo) et absorber plus d'énergie. L'augmentation des températures dans le Sud durant l'été est liée à une baisse de l'évapotranspiration et donc de son effet refroidissant (les sols étant plus secs). Le changement climatique s'accompagnant d'une augmentation de la variabilité climatique, l'augmentation des températures moyennes combinées à une plus forte probabilité d'événements extrêmes chauds conduira à une forte augmentation des périodes de canicules que l'on constate déjà depuis quelques années (par exemple 2019, 2020, 2022 et 2023).

5.5.1.2. Précipitations

Même si l'incertitude liée au changement des précipitations est plus importante que pour les températures, il se dégage un consensus sur une réponse contrastée entre le sud et le nord de l'Europe. Pendant l'hiver, une large partie de l'Europe devrait voir ses précipitations augmenter, alors qu'elles seront en baisse sur le pourtour méditerranéen. Durant l'été, c'est une plus large part de l'Europe du Sud et une majorité de l'Europe centrale qui devrait voir ses précipitations baisser, alors que de l'Allemagne à la Scandinavie les précipitations devraient augmenter.

5.5.1.3. Événements extrêmes

Pour ce qui est des événements extrêmes, alors même que l'on devrait observer une augmentation des périodes de sécheresses estivales sur une large partie de l'Europe

(excepté l'extrême sud et nord) liée à l'effet combiné des baisses de précipitations estivales et des plus fortes températures, à l'inverse on projette une augmentation des événements de pluie intense (figure 4.13). Ce phénomène s'explique à la fois par l'augmentation des températures océaniques et atmosphériques, qui conduira à une augmentation de l'évaporation, et à l'augmentation de la capacité de l'atmosphère à contenir une plus grande quantité de vapeur. La quantité d'eau précipitable sera alors plus importante pour des conditions météorologiques données. La conséquence indirecte sera alors l'augmentation des fréquences de crues.

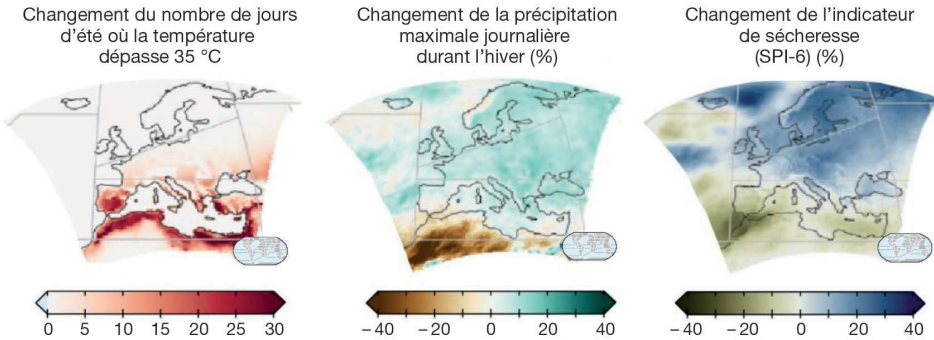


Figure 4.13. Changement des indicateurs de canicule, de pluie intense et de sécheresse à l'horizon 2050 pour l'Europe. Source : IPCC AR6 (2022).

5.5.1.4. Vents

Il n'y a pas de tendance nette qui se dégage au niveau du risque de tempêtes. Alors même que leur fréquence ne devrait pas augmenter, il est possible qu'une augmentation de leur intensité se produise, liée en particulier à l'accentuation des contrastes thermiques entre l'océan et les continents. Cela reste toutefois hypothétique et il est donc difficile de conclure sur l'évolution du risque de tempête.

5.5.1.5. Niveau marin

L'augmentation des températures a un impact sur la montée du niveau des mers liée à la fonte des calottes polaires et à la dilatation des océans en lien avec l'augmentation de la température (la proportion de ces deux facteurs étant, à l'heure actuelle, à peu près équivalente). Cela concerne l'ensemble des zones côtières européennes. En raison de la grande inertie de l'océan, la montée des eaux continuera, même si l'on parvient à stabiliser le CO₂ atmosphérique, et même bien après que celui-ci commencera à diminuer. Le niveau marin a augmenté d'environ 23 cm depuis 1880 et devrait gagner encore 30 cm d'ici à 2050 (IPCC, 2013). L'effet sera surtout sensible lors des épisodes de tempêtes combinés à de fortes marées qui augmenteront les probabilités de submersion. Il contribuera également à accentuer l'érosion côtière.

5.5.2. Les conséquences du changement climatique sur les différents secteurs de l'agriculture en Europe

L'effet du changement climatique sera contrasté en particulier entre le sud et le nord de l'Europe. La combinaison de l'accroissement des températures et de la baisse des précipitations estivales, en particulier dans le sud de l'Europe, va conduire à une

augmentation des périodes de sécheresse agricole particulièrement sensible sur le pourtour méditerranéen. Cela va avoir pour conséquence une augmentation du stress hydrique et également du stress thermique pendant la période estivale, qui affectera l'ensemble des secteurs agricoles. À l'inverse, l'augmentation des températures permettra un démarrage plus précoce du cycle végétatif et un allongement de ce dernier. L'impact sera donc contrasté, à la fois selon le type de culture et les régions (figure 4.14). Avec les pratiques agricoles actuelles, les cultures d'hiver comme le blé — ce dernier étant assez peu sensible à la sécheresse estivale, mais pouvant profiter d'un démarrage plus précoce — devraient voir leur rendement augmenter dans le nord de l'Europe, alors qu'elles devraient légèrement diminuer dans le Centre et le Sud. De même, le soja, excepté dans le scénario le plus pessimiste, devrait pouvoir être cultivé sur une large partie de l'Europe, là où il reste cantonné à une limite de 50° N actuellement. Seule l'Espagne verrait ses rendements baisser. En revanche, le maïs, très gourmand en eau et poussant durant l'été, ne pourrait voir ses rendements maintenus sur une large partie de l'Europe qu'au prix d'une forte augmentation de l'irrigation qui semble difficilement atteignable et qui amènerait à une forte tension d'usage sur la ressource en eau, déjà perceptible aujourd'hui. En matière d'adaptation, de nouvelles cultures, comme le sorgho à destination de l'alimentation animale, nécessitant moins d'eau et bien adaptées aux fortes températures, pourraient être amenées à se développer en particulier dans le sud et le centre de l'Europe. L'accroissement des périodes de canicules et de sécheresses va également fortement affecter le secteur forestier, où l'on observe déjà un accroissement des dépérissements, en particulier pour des essences comme le douglas ou le hêtre, très sensibles au stress hydrique.

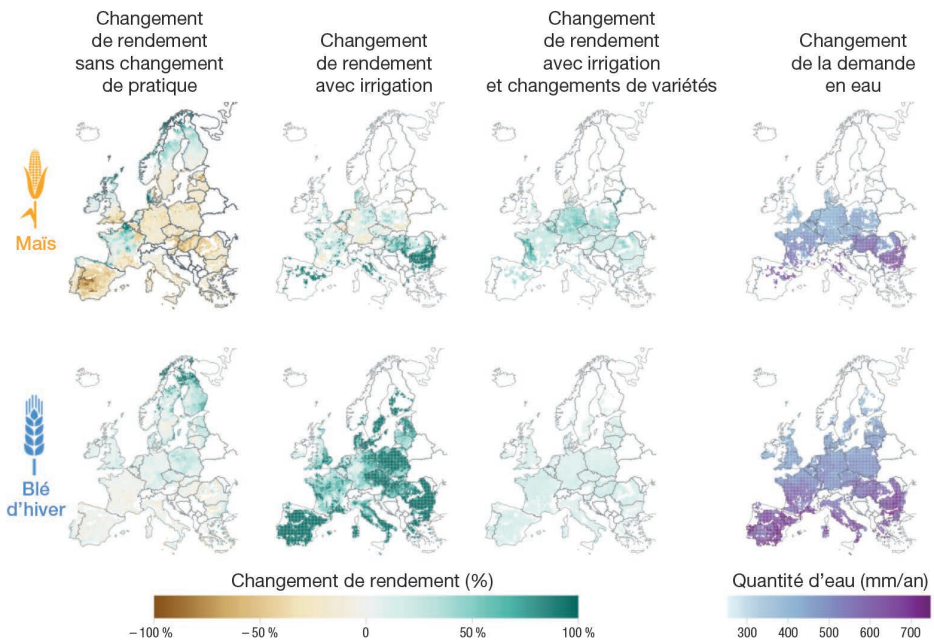


Figure 4.14. Changement des rendements du blé et du maïs en Europe pour les pratiques actuelles et en prenant en compte des adaptations avec les demandes en eau associées pour un scénario d'accroissement de température de 2°C. Source : Bednar-Friedl *et al.* (2022).

Les sécheresses et les canicules augmentent également fortement le risque d'incendie qui deviendra alors possible sur une large partie de l'Europe. On a ainsi connu, en 2022, un incendie important en forêt armoricaine, ce qui n'était jamais arrivé auparavant. Pour le secteur de l'élevage, les sécheresses diminueront la production fourragère estivale. Ce phénomène pourrait cependant être en partie compensé par une croissance plus précoce au printemps et une possibilité de faire paître les troupeaux plus tôt et de réaliser des stocks fourragers d'été, alors qu'ils étaient habituellement destinés à la période d'hiver qui au contraire va se réduire. Mais l'accroissement des canicules posera également un problème direct pour le bétail. La fermentation entérique des ruminants étant exothermique, ces derniers sont très sensibles aux fortes températures, les obligeant à réduire le broutage par forte chaleur, réduisant d'autant la production de viande ou de lait.

Un autre phénomène lié à l'augmentation des températures est paradoxalement l'augmentation du risque de gelée en début de cycle végétatif. En effet, bien que les dates de dernières gelées soient de plus en plus précoces, l'avancée du cycle végétatif liée à l'augmentation des températures hivernales est plus rapide que celle de la période des dernières gelées, augmentant ainsi le risque qu'une gelée survienne dans les phases critiques de débourrement et de floraison. La vigne et les fruitiers précoces sont à ce titre les plus vulnérables.

5.5.3. Contribution du secteur agricole au bilan des gaz à effet de serre

On estime que l'agriculture est responsable de 11,4% des émissions de gaz à effet de serre au niveau européen, sur un total de 3,31 milliards de t eqCO₂. La part des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole émises varie d'un état membre à un autre. La France est ainsi le pays qui émet le plus dans ce secteur, avec 85 Mt de CO₂, suivie par l'Allemagne (66 Mt) et la Pologne (57 Mt). Ces émissions sont liées à différents facteurs. Il y a bien sûr les émissions de CO₂ liées à la consommation de carburant sur l'ensemble de la ferme et pour la fabrication des intrants et des produits phytosanitaires, mais une grande part des émissions est également liée aux émissions de méthane (CH₄) produit par les ruminants et de protoxyde d'azote (N₂O) lié aux engrais. Les émissions de CH₄ sont estimées à 5 Mt et celles de N₂O à 660 Mt. Comme évoqué dans l'introduction, bien que ces émissions soient faibles, le potentiel de réchauffement global du CH₄ et du N₂O est beaucoup plus important que celui du CO₂. Mais la durée de vie de ces différentes molécules est aussi à prendre en compte. Les pratiques agricoles affectent également le bilan de CO₂ par la modification du carbone du sol. Pour la France par exemple (la situation étant proche dans le reste de l'Europe), les zones de grandes cultures ont déjà perdu une grande partie du carbone du sol et continuent à être une très légère source de carbone de 0,06 t eqCO₂/ha/an. Mais l'agriculture peut également participer à la séquestration du carbone dans les sols et donc à l'atténuation du changement climatique. En France, les sols prairiaux et de forêts ont des contenus en carbone du sol importants (respectivement 84 t/ha et 81 t/ha) et représentent un puits de carbone (de 0,37 à 0,80 t eqCO₂/ha/an pour les prairies, et de 1,60 à 5,06 t eqCO₂/ha/an pour les forêts suivant les études) (Rapport EFSE, 2019; Rapport INRAE, 2020). De ce fait, il est surtout important de maintenir les stocks existants en prairies et en forêts. Ainsi, la reforestation, liée en particulier à l'abandon d'anciennes terres agricoles sur les dernières décennies (+ 9 % en trente ans), a contribué à faire du continent un puits de carbone (hors émissions anthropiques).

De façon générale, les grandes cultures, du fait de leur faible quantité de carbone dans les sols, offrent un potentiel de stockage important. Les pistes les plus prometteuses sont l'agroécologie, l'utilisation de cultures intermédiaires et la reconstitution des haies (Rapport INRAE, 2020). Même si les réalisations concrètes sont encore très peu développées (par rapport aux États-Unis par exemple), l'approche européenne est beaucoup plus systémique. En effet, les solutions fondées sur la nature doivent suivre les recommandations de l'UICN en prenant en compte l'impact des solutions proposées sur l'ensemble des services écosystémiques.

5.6. Les évolutions et les impacts du climat prévus en Amérique du Nord

Nicolas Viovy

5.6.1. Les évolutions du climat en Amérique du Nord

5.6.1.1. Température

L'augmentation de la température affectera l'ensemble du continent nord-américain (Lee *et al.*, 2021) (figure 4.15). Cette augmentation des températures sur l'Amérique du Nord sera plus importante que la moyenne globale. En étudiant plus en détail la répartition spatiale et saisonnière de l'augmentation de la température future, on constate une augmentation qui s'accroît avec la latitude et qui sera également plus importante au centre du continent que sur les zones côtières. Cette augmentation plus forte dans le Nord et le Centre en hiver est liée à la rétroaction de la neige, dont la couverture va fortement diminuer avec l'augmentation des températures. Les surfaces vont ainsi être plus sombres et absorber plus d'énergie. Cela explique également le fait que l'augmentation des températures sera particulièrement forte en hiver dans la partie nord du continent. Dans le scénario d'une augmentation moyenne mondiale de 4 °C par rapport à l'ère préindustrielle, l'augmentation des températures d'été deviendrait également

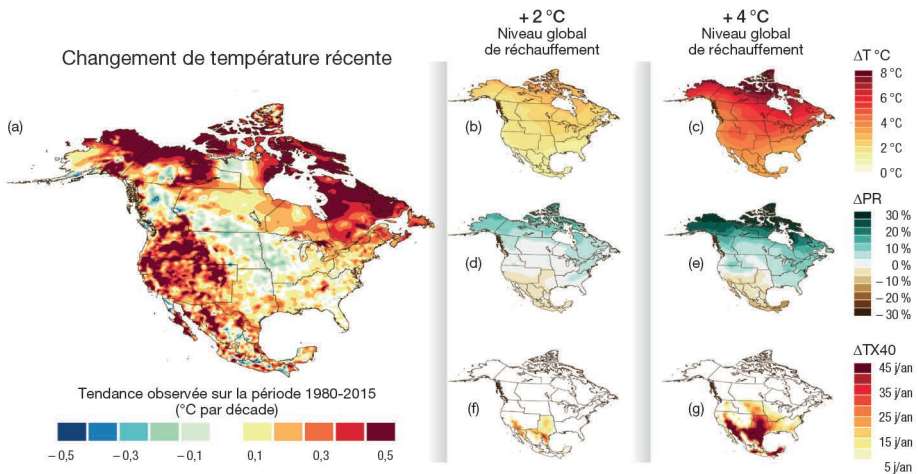


Figure 4.15. Changement climatique observé et projeté pour l'Amérique du Nord. Source : Hicke *et al.* (2022).

(a) Tendence observée des températures de 1980 à 2015; (b et c) changement de température pour des scénarios + 2 °C et + 4 °C (ΔT); (d et e) changement des précipitations (ΔPR); (f et g) changement du nombre de jours avec une température de plus de 40 °C (ΔTX_{40}) (Hsiang *et al.*, 2017).

très importante. Le changement climatique s'accompagnant d'une augmentation de la variabilité climatique, l'augmentation des températures moyennes combinée à une plus forte probabilité d'événements extrêmes chauds conduira à une forte augmentation des périodes de canicules. Cette augmentation des températures et des canicules va induire une augmentation du risque d'incendie en particulier dans la zone boréale. Les incendies de 2023 au Canada ont par exemple détruit 17 Mha. Aux États-Unis, c'est la partie centrale ouest qui devrait connaître les plus fortes augmentations, aussi bien dans la partie sud (comme l'Arizona ou le Texas) que plus au nord (dans le Montana et le Dakota). En outre, l'accroissement du nombre de jours où la température dépassera les 40 °C au Texas ou en Arizona par rapport à la période historique pourrait atteindre une trentaine de jours par an (Lee *et al.*, 2021). L'augmentation moyenne des températures étant plus forte dans les hautes latitudes qu'aux tropiques, cette dernière sera encore plus marquée au Canada qu'aux États-Unis. En particulier, on peut s'attendre à une diminution importante du gel des sols, des lacs et des rivières, avec des conséquences sur la stabilité des sols par exemple (liée à la fonte du pergélisol) ou sur la modification des systèmes de transport (l'installation de campements ou de routes temporaires sur les lacs gelés devenant impossible).

5.6.1.2. Précipitations

Même si l'incertitude liée au changement des précipitations est plus importante que pour les températures, les tendances qui se dégagent sont une augmentation des précipitations d'hiver, forte dans le Nord, modérée au Centre, mais une forte baisse des précipitations sur la Californie, l'Arizona et le Nouveau-Mexique. Pendant l'été, les précipitations devraient augmenter dans le Nord, mais au contraire baisser dans le Centre. Au Canada, les précipitations devraient en moyenne augmenter, en particulier dans le Nord.

5.6.1.3. Événements extrêmes

En ce qui concerne les événements extrêmes, on devrait observer une augmentation des périodes de sécheresses estivales, en particulier sur l'ensemble de la partie centrale à l'ouest des États-Unis en cohérence avec les zones de canicules, liées à l'effet combiné des baisses de précipitations estivales et des plus fortes températures. À l'inverse, les modélisateurs du Giec projettent une augmentation des événements de pluie intense (Lee *et al.*, 2021), qui devrait être particulièrement marquée dans la partie nord-ouest et nord-est du continent avec comme conséquence indirecte une augmentation des fréquences de crues. Ce phénomène s'explique à la fois par l'augmentation des températures océaniques et atmosphériques, qui conduira à une augmentation de l'évaporation, et par l'augmentation de la capacité de l'atmosphère à contenir une plus grande quantité de vapeur. La quantité d'eau précipitable sera alors plus importante pour des conditions météorologiques données.

5.6.1.4. Vents

Les États-Unis sont soumis à de fréquentes tornades. S'il est difficile d'estimer si leur nombre ou leur intensité risquent d'augmenter, il est en revanche très clair que l'on constate un déplacement du « couloir des tornades » vers l'est du continent, ce qui devrait s'amplifier dans le futur. Cela peut être mis en lien avec l'assèchement de la partie centre ouest énoncée plus haut. De même, le sud-est des États-Unis, la Floride en particulier, peut être touché par les ouragans. Or, s'il n'y a pas de tendance qui se dégage sur un changement de fréquence des ouragans, on projette une augmentation

de leur intensité. De même, l'accroissement des températures océaniques devrait conduire à une remontée plus au nord des cyclones, ce qui pourrait aussi affecter le nord de la côte est.

5.6.2. Les conséquences du changement climatique sur les différents secteurs de l'agriculture en Amérique du Nord

L'effet du changement climatique sera contrasté entre l'est et l'ouest du continent. À l'Est, le changement climatique devrait conduire à une baisse de rendement notable ainsi que plus généralement dans le Sud, alors qu'à l'Ouest certaines zones pourraient voir leur rendement augmenter (figure 4.16). Il est à noter cependant que ce sont précisément les grandes plaines agricoles du Midwest, dont la Corn Belt, qui devraient être fortement affectées, alors que les zones où les rendements pourraient augmenter ne sont pas actuellement des zones de cultures importantes. Cette vision globale masque en fait une large disparité en fonction du type de culture. Le maïs, particulièrement sensible à la sécheresse estivale du fait d'une forte demande en eau et d'un développement en plein été, sera le plus affecté. Le soja, qui est également une culture d'été, sera également négativement impacté cependant un peu moins que le maïs. En revanche, le blé, qui arrive à maturité avant les périodes de sécheresse, devrait profiter d'une levée plus précoce et ainsi voir son rendement augmenter. Le maintien de la culture du maïs nécessiterait un fort accroissement de l'irrigation, mais au prix d'une augmentation des volumes d'eau disponibles qui accentuerait encore les fortes tensions sur la ressource en eau déjà très contrainte. Le changement climatique va aussi durement affecter le secteur des forêts sur l'ensemble du continent nord-américain, à la fois par les risques d'incendie accrus et aussi par le changement des aires de répartition des espèces. Dans le centre, l'accroissement des périodes de canicules et de sécheresses va fortement affecter le secteur forestier, où l'on observe déjà un accroissement des dépérissements. Seules les zones côtières du Nord, peu limitées en eau et profitant d'un allongement de la période végétative, devraient au contraire profiter du changement climatique. Pour le secteur de l'élevage, les sécheresses diminueront la production fourragère estivale. Comme en Europe, ce phénomène pourrait cependant être en partie compensé par une croissance plus précoce au printemps et une possibilité de faire paître les troupeaux plus tôt. Mais l'accroissement des canicules posera également un problème direct pour le bétail. La fermentation entérique

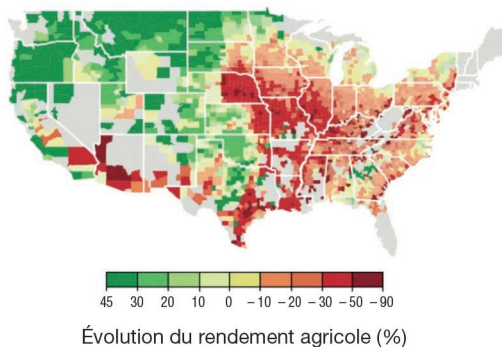


Figure 4.16. Évolution du rendement agricole (toutes cultures confondues) projeté entre 2080-2099, sous un scénario RCP8. Source : Hsiang *et al.* (2017).

des ruminants étant exothermique, ces derniers sont très sensibles aux fortes températures, les obligeant à réduire le broutage par forte chaleur réduisant d'autant la production de viande ou de lait.

Un autre phénomène lié à l'augmentation des températures est, paradoxalement, l'augmentation du risque de gelée en début de cycle végétatif. En effet, bien que les dates de dernières gelées soient de plus en plus précoces, l'avancée du cycle végétatif liée à l'augmentation des températures hivernales est plus rapide que celle de la période des dernières gelées, augmentant ainsi le risque qu'une gelée survienne dans les phases critiques de débourrement et de floraison. Par conséquent, comme sur le continent européen, la vigne et les fruitiers précoces sont à ce titre les plus vulnérables.

5.6.3. Contribution du secteur agricole au bilan des gaz à effet de serre

Le département pour l'Agriculture des États-Unis (United States Department of Agriculture ou USDA) estime que l'agriculture est responsable de 11 % des émissions de gaz à effet de serre aux États-Unis et de 8 % au Canada, sur un total d'environ 6,6 milliards de tonnes équivalent CO₂. Ce pourcentage d'émissions lié à l'agriculture est proche du chiffre européen (9 %). Les émissions par kilogramme produit sont par exemple autour de 30 kg eqCO₂/kg pour les bovins (en poids carcasse et non en poids vif) contre 0,2 kg pour les céréales en moyenne sur l'ensemble du continent (données FAOSTAT 2022⁶). Les émissions de GES du secteur agricole par habitant sont beaucoup plus importantes en Amérique du Nord qu'en Europe) (1,2 t eqCO₂ aux États-Unis, 1,5 t eqCO₂ au Canada, contre 0,87 t eqCO₂ en Europe (données Climate watch 2024⁷). Cela est dû à la fois au ratio entre la production végétale et animale (la production animale étant beaucoup plus émettrice), mais également à la quantité produite par habitant, plus importante en Amérique du Nord (autour de 2,9 t/hab. contre environ 2,3 t/hab. en Europe). Ces émissions sont liées à différents facteurs. Il y a bien sûr les émissions de CO₂ liées à la machinerie, la fabrication des intrants et des produits phytosanitaires, mais une grande part des émissions est également liée aux émissions de méthane (CH₄) produites par les ruminants et les rizières, et de protoxyde d'azote (N₂O), pour la fabrication et l'utilisation des engrais chimiques. Les émissions annuelles pour les États-Unis sont estimées à 20 Mt pour le CH₄ et 930 Mt pour le N₂O. Bien que ces émissions soient faibles, le potentiel de réchauffement global du CH₄ et du N₂O étant beaucoup plus important que celui du CO₂ (28 fois pour le CH₄, 273 fois pour le N₂O), leur effet sur le bilan radiatif est très important. Il est aussi important de garder en tête la durée de vie de ces différentes molécules dans l'air. Le CH₄ a une durée de vie d'environ dix ans; cette durée n'est pas négligeable, mais moins problématique que celle du N₂O qui est de 120 ans. Les pratiques agricoles affectent également le bilan de CO₂ par la modification du carbone du sol. De ce fait, il est surtout important de maintenir les stocks existants en prairies et en forêts. Même si les pratiques agricoles ne sont pas en cause, les méga-incendies des dernières années dans l'ouest du continent ont détruit de grandes surfaces de forêts. À titre d'exemple, les méga-incendies de 2023 au Canada ont émis 431 Mt de carbone (contre 59 Mt en moyenne chaque année), et d'importants programmes de reforestation sont prévus aux États-Unis qui devraient permettre

6. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/cc09fbbc-eb1d-436b-a88a-bed42a1f12f3/content>.

7. <https://www.climatewatchdata.org/>.

de reconstituer une partie des stocks. La reforestation non pilotée (c'est-à-dire liée à l'abandon d'anciennes terres agricoles sur les dernières décennies), même si elle est beaucoup plus faible qu'en Europe par exemple, a partiellement contribué à faire du continent un puits de carbone (hors émissions anthropiques).

6. Références bibliographiques

ASEAN State of Climate Change Report (ASCCR), 2021. Jakarta, ASEAN Secretariat, October https://asean.org/wp-content/uploads/2021/10/ASCCR-e-publication-Correction_8-June.pdf

Baccini A., Goetz S., Walker W., *et al.*, 2012. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Clim Change*, 2, 182-185. <https://doi.org/10.1038/nclimate1354>

Bale J.S., Masters G.J., Hodkinson I.D., Awmack C., Bezemer T.M., Brown V.K., *et al.*, 2002. Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores, *Global Change Biology*, 8(1): 1-16.

Barnett J., 2020. Climate Change and Food Security in the Pacific Islands. In: Connell J., Lowitt K., (eds), *Food Security in Small Island States*, Springer Singapore, 25-38.

Bednar-Friedl B., Biesbroek R., Schmidt D.N., Alexander P., Børsheim K.Y., Carnicer J., *et al.*, 2022. Europe. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 1817-1927. <https://www.doi.org/10.1017/9781009325844.015>

Bennett A.C., Rodrigues de Sousa T., Monteagudo-Mendoza A., *et al.*, 2023. Sensitivity of South American tropical forests to an extreme climate anomaly. *Nat. Clim. Chang.*, 13, 967-974. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01776-4>

Bourgoin C., Ceccherini G., Girardello M., *et al.* 2024. Human degradation of tropical moist forests is greater than previously estimated. *Nature*, 631, 570-576. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07629-0>

Brouziyne Y., El Bilali A., Epule Epule T., Ongoma V., Elbeltagi A., Hallam J., *et al.*, 2023. Towards Lower Greenhouse Gas Emissions Agriculture in North Africa through Climate-Smart Agriculture: A Systematic Review. *Climate*, 11, 139.

Brown J.R., Brierley C.M., An S.-I., Guarino M.-V., Stevenson S., Williams C.J.R., *et al.*, 2020. Comparison of past and future simulations of ENSO in CMIP5/PMIP3 and CMIP6/PMIP4 models, *Climate of the Past*, 16(5): 1777-1805.

Carriconde F., Gardes M., Bellanger J.-M., Letellier K., Gigante S., Gourmelon V., *et al.*, 2019. Host effects in high ectomycorrhizal diversity tropical rainforests on ultramafic soils in New Caledonia, *Fungal Ecology*, 39, 201-212.

Crippa M., Solazzo E., Guizzardi D., Monforti-Ferrario F., Tubiello F.N., Leip A., 2021. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions, *Nature Food*, 2(3) : 198-209.

Demenois J., Merino-Martín L., Fernandez Nuñez N., Stokes A., Carriconde F., 2020. Do diversity of plants, soil fungi and bacteria influence aggregate stability on ultramafic Ferralsols? A metagenomic approach in a tropical hotspot of biodiversity, *Plant and Soil*, 448(1-2): 213-229. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04364-8>

Dutheil C., Bador M., Lengaigne M., Lefèvre J., Jourdain N.C., Vialard J., *et al.*, 2019. Impact of surface temperature biases on climate change projections of the South Pacific Convergence Zone, *Climate Dynamics*, 53(5-6): 3197-3219.

Dutheil C., Lengaigne M., Bador M., Vialard J., Lefèvre J., Jourdain N.C., *et al.*, 2020. Impact of projected sea surface temperature biases on tropical cyclones projections in the South Pacific, *Scientific Reports*, 10(1): 4838.

Estoque R.C., Ooba M., Avitabile V., *et al.*, 2019. The future of Southeast Asia's forests. *Nat Commun*, 10, 1829. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09646-4>

Evans J.P., Belmadani A., Menkes C., *et al.*, 2024. Higher-resolution projections needed for small island climates. *Nat. Clim. Chang.*, 14, 668-670. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02028-9>

Fache E., Dumas P., N'Yeurt A.D.R., 2019. Introduction. Synthèse interdisciplinaire de quelques discours et réponses liés au climat dans le Pacifique, *Journal de la société des océanistes*, (149) : 199-210.

FAO, 2020. Emissions due to agriculture. Global, regional and country trends 2000–2018, FAOSTAT Analytical Brief Series No 18, Rome, FAO. <https://www.fao.org/3/cb3808en/cb3808en.pdf>

FAO, 2023. Pathways towards lower emissions – A global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options from livestock agrifood systems. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc9029en>

FAO, 2024. Greenhouse gas emissions from agrifood systems – Global, regional and country trends, 2000–2022. *FAOSTAT Analytical Brief Series*, No. 94, Rome.

Fischer G., Shah M.N., Tubiello F., Van Velhuizen H., 2005. Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990–2080. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1463), 2067–2083.

Hau'ofa E., 2013. *Notre mer d'îles*, Pacific Islanders éditions, 40 p.

Hicke J.A., Lucatello S., Mortsch L.D., Dawson J., Domínguez Aguilar M., Enquist C.A.F., *et al.*, 2022. North America. *In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 1929–2042. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.016>

Hsiang S., Kopp R., Jina A., Rising J., Delgado M., Mohan S., *et al.*, 2017. Estimating economic damage from climate change in the United States, *Science*, 356.6345: 1362–1369. <https://doi.org/10.1126/science.aal4369>

Hulme P.E., 2011. *Biosecurity: the changing face of invasion biology, in Fifty years of invasion ecology: the legacy of Charles Elton*, Wiley Oxford, 73–88. <https://doi.org/10.1002/9781444329988.ch23>

Idris N.H., Munadi M.H.F., Zheng Yong C., Lee B.Y., Vignudelli S., 2023. Sea-level rise in Southeast Asia: a review of the factors, and the observed rates from tide gauge, satellite altimeters and assimilated data techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 1–22. <https://doi.org/10.1080/01431161.2023.2282408>

IPCC, 1990. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Report prepared for IPCC by Working Group I. Houghton J.T., Jenkins G.J., Ephraums J.J. (eds.). Cambridge University Press, 364 p.

IPCC, 2013. Summary for Policymakers. *In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.

IPCC, 2014. Summary for policymakers. *In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 1–32.

IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.

IPCC, 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 3056 p. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

Klöck C., Fink M., 2019. *Dealing with climate change on small islands: Toward effective and sustainable adaptation*, Universitätsverlag Göttingen, 337 p.

Knutson T., Camargo S.J., Chan J.C., Emanuel K., Ho C.-H., Kossin J., *et al.*, 2020. Tropical cyclones and climate change assessment: Part II: Projected response to anthropogenic warming, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(3): E303–E322.

Kulagowski R., Thoumazeau A., Leopold A., Lienhard P., Boulakia S., Metay A., *et al.*, 2021. Effects of conservation agriculture maize-based cropping systems on soil health and crop performance in New Caledonia, *Soil and Tillage Research*, 212:105079. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105079>

- Leal Filho W., Nagy G.J., Setti A.F.F., Sharifi A., Donkor F.K., Batista K., Djekic I., 2023. Handling the impacts of climate change on soil biodiversity, *Science of The Total Environment*, 869:161671. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161671>
- Lee J.-Y., Marotzke J., Bala G., Cao L., Corti S., Dunne J.P., Engelbrecht F., *et al.*, 2021. Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 553-672. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.006>
- Léopold A., Drouin J., Drohnu E., Kaplan H., Wamejonengo J., Bouard S., 2021. Fire-fallow agriculture in Mare Loyalty Island: A sustainable cropping system for maintaining organic carbon in Gibbsic Ferralsol (New Caledonia, South West Pacific). *Regional Environmental Change*, 21. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01814-x>
- Le Roux R., Wagner F., Blanc L., *et al.*, 2022. How wildfires increase sensitivity of Amazon forests to droughts. *Environmental Research Letters*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5b3d>
- Martínez-Asensio A., Wöppelmann G., Ballu V., Becker M., Testut L., Magnan A.K., Duvat V.K.E., 2019. Relative sea-level rise and the influence of vertical land motion at Tropical Pacific Islands, *Global and Planetary Change*, 176, 132-143.
- McCubbin S., Smit B., Pearce T., 2015. Where does climate fit? Vulnerability to climate change in the context of multiple stressors in Funafuti, Tuvalu. *Global Environmental Change*, 30, 43-55.
- Mishra S., Page S.E., Cobb A.R., *et al.*, 2021. Degradation of Southeast Asian tropical peatlands and integrated strategies for their better management and restoration. *J Appl Ecol.*, 58: 1370-1387. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13905>
- Nurse L.A., McLean R.F., Agard J., Briguglio L.P., Duvat-Magnan V., Pelesikoti N., *et al.*, 2014. Small islands, In: *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, USA, 1-32. 1613 p.
- Panthou G., Lebel T., Vischel T., Quantin G., Sane Y., Ba A., *et al.*, 2018. Rainfall intensification in tropical semi-arid regions: the Sahelian case. *Environmental Research Letters*, 13(6), p.064013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac334>
- Pascht A., 2019. Klaemet jenj worlds. Approaching climate change and knowledge creation in Vanuatu, *Journal de la société des océanistes*, (149) : 235-244.
- Payri C., Vidal E., 2019. *Biodiversity, a pressing need for action in Oceania*, Noumea, Presses universitaires de la Nouvelle-Calédonie, 64 p.
- Phillips O.L., Aragão L., Fisher J.B., *et al.* 2009. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, 323: 1344-1347. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1164033>
- Pillon Y., Jaffré T., Birnbaum P., Bruy D., Cluzel D., Ducouso M., *et al.*, 2021. Infertile landscapes on an old oceanic island: the biodiversity hotspot of New Caledonia, *Biological Journal of the Linnean Society*, 133(2): 317-341.
- Pouteau R., Birnbaum P., 2016. Island biodiversity hotspots are getting hotter: vulnerability of tree species to climate change in New Caledonia, *Biological Conservation*, 201, 111-119.
- Power S.B., Delage F.P.D., 2019. Setting and smashing extreme temperature records over the coming century. *Nat. Clim. Chang.* 9, 529-534. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0498-5>
- Rapport EFEESE, 2019. La séquestration de carbone par les écosystèmes en France, ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires. <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/publications/Th%C3%A9matique%20La%20séquestration%20de%20carbone%20par%20les%20ecosysteme.pdf>
- Rapport INRAE, 2020. Stocker du carbone dans les sols français : quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût. <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/Rapport%20Etude%204p1000.pdf>
- Rapport UNEP, 2005. <https://reliefweb.int/map/world/africa-change-potential-cereal-output-2080>
- Romanello M., McGushin A., Di Napoli C., *et al.*, 2021. The 2021 Report of the Lancet Countdown on Health and Climate Change. *The Lancet*, 398(10311), 1619-1662. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)01787-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)01787-6)

- Rosenzweig C., Mbow C., Barioni L.G., Benton T.G., Herrero M., Krishnapillai M., *et al.*, 2020. Climate change responses benefit from a global food system approach, *Nature Food*, 1(2): 94-97.
- Sanderman J., Hengl T., Fiske G., 2017. The soil carbon debt of 12,000 years of human land use, *PNAS*, 114(36): 9575-9580. <https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114>
- Savadogo M., Somda J., Seynou O., Zabré S., Nianogo A.J., 2011. Catalogue des bonnes pratiques d'adaptation aux risques climatiques au Burkina Faso. Ouagadougou, Burkina Faso: UICN Burkina Faso. https://www.bretagne-solidaire.bzh/wp-content/uploads/sites/11/2020/03/cataloguerisques-climatiques_compressed-1.pdf
- Shaw R., Luo Y., Cheong T.S., Abdul Halim S., Chaturvedi S., Hashizume M., Insarov G.E., *et al.*, 2022. Asia. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 1457-1579. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.012>
- Sonobe T., Buchoud N.J.A., Akbar R., Altansukh B., 2024. *Transforming ASEAN Strategies for Achieving Sustainable and Inclusive Growth*. Asian Development Bank Institute, 246 p. <https://doi.org/10.56506/FYUK6909>
- Tangang F., Chung J.X., Juneng L., *et al.*, 2020. Projected future changes in rainfall in Southeast Asia based on CORDEX-SEA multi-model simulations. *Clim Dyn*, 55, 1247-1267. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05322-2>
- Trisos C.H., Adelekan I.O., Totin E., Ayanlade A., Efitre J., Gameda A., Kalaba K., *et al.*, 2022. Africa. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 1285-1455. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.011>
- Tubiello F.N., Karl K., Flammini A., Gütschow J., Obli-Laryea G., Conchedda G., *et al.*, 2022. Pre- and post-production processes increasingly dominate greenhouse gas emissions from agri-food systems, *Earth System Science Data*, 14(4): 1795-1809.
- Walsh K.J., McInnes K.L., McBride J.L., 2012. Climate change impacts on tropical cyclones and extreme sea levels in the South Pacific—A regional assessment, *Global and Planetary Change*, 80, 149-164.
- Walsh M., Backlund P., Buja L., DeGaetano A., Melnick R., Prokopy L., *et al.*, 2020. Climate Indicators for Agriculture, USDA Technical Bulletin 1953. Washington, DC, 70 p. <https://doi.org/10.25675/10217/210930>
- Whan K., Alexander L., Imielska A., McGree S., Jones D., Ene E., *et al.*, 2014. Trends and variability of temperature extremes in the tropical Western Pacific, *International journal of Climatology*, 34(8): 2585-2603.
- Wong P.P., Losada I.J., Gattuso J.-P., Hinkel J., Khattabi A., McInnes K.L., *et al.*, 2014. Coastal systems and low-lying areas, *Climate change*, 2104, 361-409.