



HAL
open science

Reforester les tropiques semi-arides ? : Enjeux, contraintes et opportunités climatiques dans la perspective du changement global

Amélie Rajaud

► **To cite this version:**

Amélie Rajaud. Reforester les tropiques semi-arides ? : Enjeux, contraintes et opportunités climatiques dans la perspective du changement global. Climatologie. Université Paris Saclay (COMUE), 2016. Français. NNT : 2016SACLV066 . tel-01511342

HAL Id: tel-01511342

<https://theses.hal.science/tel-01511342>

Submitted on 20 Apr 2017

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

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

NNT : 2016SACLV066

THÈSE DE DOCTORAT
DE
L'UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY
PRÉPARÉE À
L'UNIVERSITÉ VERSAILLES SAINT-QUENTIN

ECOLE DOCTORALE N ° 129
Sciences de l'Environnement d'Île-de-France

Spécialité de doctorat :
Météorologie, Océanographie, Physique de l'environnement

Par
Mme Amélie Rajaud

Reforester les tropiques semi-arides ?
Enjeux, contraintes et opportunités climatiques dans la perspective du
changement global

Thèse présentée et soutenue à Gif-sur-Yvette, le 26 septembre 2016.

Composition du Jury :

M.	Benjamin Sultan	Directeur de recherche au LOCEAN	Président
M.	Pierre Camberlin	Professeur à l'Université de Bourgogne	Rapporteur
M.	Eric Mougin	Directeur de recherche au GET	Rapporteur
Mme	Alberte Bondeau	Chargée de recherche à l'IMBE	Examinatrice
Mme	Aurélié Botta	Directrice de l'UR GREEN du CIRAD	Examinatrice
M.	Jean-Paul Vanderlinden	Professeur de l'UVSQ	Examineur
Mme	Nathalie de Noblet	Directrice de recherche au CEA	Directrice de thèse
M.	Yohann Fare	Société KINOME	Invité

Un temps, durant notre enfance,
 nous nous voulûmes savants ;
Un temps, de notre science
 nous eûmes contentement.
Mais écoute maintenant,
 ami d'exactes mesures,
La somme de l'aventure :
 de l'eau courante, et du vent !

Omar Khayyâm, *Cent un quatrains*
 de libre pensée

Remerciements

A Marceline...

S'agit-il d'un exercice imposé ? Plutôt de l'occasion de donner corps enfin à toutes ces notes mentales prises durant près de quatre années : autant de merci chuchotés en moi-même, dans un recoin encore disponible de mon cerveau... Merci à Nathalie pour toutes les fois où je suis ressortie de son bureau (lessivée mais) le menton relevé et le mental remotivé. Merci à Fabienne de m'avoir jeté les premières cordes au-dessus des précipices informatiques. Merci à Florence de m'avoir portée au-dessus d'un autre abîme administratif tout aussi effrayant. Merci à Yann&Marion d'avoir fait de ces années tellement plus qu'une aventure intellectuelle.

Mais trêve de chuchotements, il est l'heure de proclamer. En regardant en arrière, c'est d'abord vers ce jour de la soutenance que je veux m'arrêter et remercier tous ceux qui ont contribué à en faire un souvenir positif, à commencer par les membres de mon jury. Déjà, je n'en reviens toujours pas que sept personnes aient pris le temps et la peine de lire mon manuscrit, qui plus est en plein été ! Alors merci, merci pour l'intérêt que vous avez manifesté, merci de vous être rendus jusque sur le plateau de Saclay, merci pour la discussion que vous avez alimentée cette après-midi là. Plus particulièrement, merci à Eric Mougin et Pierre Camberlin d'avoir proposé des critiques constructives sur mon manuscrit. Merci à Benjamin Sultan d'avoir présidé mon jury de thèse le jour J. Merci à lui et à Alberte Bondeau de m'avoir accompagnée au long de ma thèse lors des réunions de mon comité de thèse. Merci également, Alberte, pour la discussion riche que nous avons eue alors que j'étais encore en recherche de thèse : le choix n'était pas facile, et l'aventure aixoise aurait j'en suis sûre été passionnante ! Merci à Aurélie Botta et Jean-Paul Vanderlinden d'avoir été examinateurs dans mon jury de thèse et d'avoir tous deux enrichi la discussion de mes résultats de thèse dans leur dimension humaine et appliquée lors de ma soutenance. Merci à Yohann Fare d'avoir apporté l'éclairage de Kinomé dans cette discussion. A Yohann, merci également pour tous les échanges que nous avons eus au cours de ma thèse et pour l'optimisme et les encouragements constants que tu m'as apportés. A travers toi, Yohann, je remercie également toute l'équipe de Kinomé pour sa disponibilité et ses encouragements depuis les prémices de ma thèse !

Ce jour de soutenance n'aurait pas été réussi sans tous ceux qui m'ont entourée et

aidée alors que je fonctionnais dans un état second : merci à Maman, Mamou, Aglaé, Sarah et Yann de m'avoir aidée à cuisiner. A ma famille et à Marie d'être venus partager ce moment avec moi : ça signifie beaucoup, merci.

Enfin je dois beaucoup à ceux qui m'ont aidée à répéter ma présentation, encore et encore : Marc, Sarah, Palmira, Susanna, Hiba, Marwa, Juliette, Yves, Aglaé, Marion, Véronique et Thomas. Sans vous je n'aurais pas pu dormir la veille !

Bien sûr il n'y a pas que la soutenance, dans une thèse. Les années qui y conduisent sont jalonnées de précipices, de flammes infernales, de bulles légères aussi, parfois, de petits cumulus doux et blancs, et déserts arides et désolés... et au loin, un sourire, une main tendue. Merci à tous les sourires et à toutes les mains qui ont rendu les montagnes russes plus humaines. Je pense en particulier à tous les habitants du 712 avec qui il faisait bon sourire, plaisanter, jouer, cuisiner, bronzer, bouquiner, râler, philosopher, délirer, somnoler, trava... oups. A ces thésards qui sont partis : Véro, Alina, Marion, Yann, Annemiek, Marc, bon vent à tous ! A ceux qui seront bientôt libérés à leur tour : Sarah, Priscilla, Timothée, Camille, Marwa, Aglaé, vous y êtes presque ! A Marc en particulier, merci d'avoir été le co-bureau parfait. A Marion, Yann, Sarah, Aglaé, Annemiek, Priscilla, Timothée : vous resterez un peu les oncles et tantes de Marceline !

Et puis il y a tous ceux qui, en plus de sourire, ont su m'aider à des moments-clés : en particulier, Fabienne, sans toi je n'y serais jamais arrivée ! Nicolas Viovy, merci de tes éclairages sur l'hydre orchidée. Jingfeng, *thank you for your help when I was getting absolutely desperate in my quest for suitable data !* Merci à Marc pour les déblocages avec R, à Yann d'avoir mis le doigt sur certains "petits défauts" de mon manuscrit, à Lise d'avoir inspiré le recadrage d'une partie de mon travail...

Un grand merci, enfin, à nos anges gardiens dans le dédale formulairistique, Florence et Catherine : vous n'imaginez pas combien de fois j'ai béni vos interventions !

Et tout au commencement, il y a ces personnes qui ont eu une influence déterminante sur mon engagement dans la voie de la recherche, par leurs encouragements et par l'exemple qu'ils me montraient : merci à vous, Fabrice, Thierry et Ray. Ray, *I so regret not having had the time to share this achievement with you.*

Malgré l'envie que j'en ai, lister toutes les personnes qui ont embelli cette expérience serait décidément trop long. J'en termine donc avec ce dernier et premier merci : merci à Nathalie de m'avoir fait confiance, de m'avoir encouragée, guidée et éclairée des premiers balbutiements à l'achèvement de cette aventure.

Titre : Reforester les tropiques semi-arides ? Enjeux, contraintes et opportunités climatiques dans la perspective du changement global.

Mots-clés : semi-aride, tropiques, changement climatique, reforestation, modélisation

De nombreux projets de protection et de reforestation sont mis en place à l'échelle internationale pour enrayer la déforestation croissante. L'objectif de ce travail de thèse est de mieux caractériser les contraintes et les opportunités de projets de reboisement pour les régions tropicales semi-arides, particulièrement vulnérables, dans le contexte du changement climatique global.

La revue de littérature (chapitre 1) confirme que les projets de reforestation ayant vocation à atténuer le réchauffement climatique ont plus de chances de réussite sous les latitudes tropicales, où les différents effets de la végétation sur le climat convergent dans ce sens. Entreprise pour satisfaire divers services écosystémiques, la reforestation dans les zones tropicales semi-arides est ainsi porteuse d'effets bénéfiques tant globalement que localement. Cependant, dans ce contexte très limité en eau, l'implantation d'un couvert arboré trop dense pourrait avoir des effets opposés à ceux recherchés à long terme.

Dans le chapitre 2, une approche « bioclimatique » est appliquée à un ensemble multimodèle de projections, pour suivre l'évolution du domaine tropical semi-aride global sous l'effet de plusieurs scénarios (RCP) de changement climatique. Ce domaine se maintient en majeure partie dans les conditions futures. Une certaine proportion évolue toutefois vers des conditions soit plus arides (jusqu'à +24% du domaine global) soit plus humides (jusqu'à 11%). Malgré cela, le domaine étudié s'accroît entre le début et la fin du 21^e siècle, jusqu'à 38% en moyenne (RCP8.5). Ceci résulte d'un élargissement progressif en-dehors de la ceinture tropicale, corrélé avec le réchauffement global, et cohérent avec l'hypothèse d'un élargissement de la circulation de Hadley.

La méthodologie proposée au chapitre 3 a pour objectif d'analyser les implications de cette évolution sur le potentiel climatique de maintien d'un couvert arboré. L'utilisation d'un modèle global de végétation (ORCHIDEE, développé à l'IPSL) pour simuler ce potentiel permet de prendre en compte de manière mécaniste les facteurs climatiques de la croissance des plantes. Une typologie des profils de résultats délimite des sous-régions caractérisées chacune par une relation distincte du développement des arbres à la densité

du couvert. Les cinq « régimes » de la typologie sont ainsi classés du plus défavorable (régime 1) au plus favorable (régime 5). L'expérience de référence est réalisée à partir de données d'observation (CRU). Le régime 1, caractérisé par l'absence de maintien d'un couvert pour les plus hautes densités arborées, occupe près de la moitié du domaine étudié. Le second régime le plus représenté est le régime 4 (28% du domaine). Plus favorable, il est défini par un développement des arbres élevé, sans être maximal, pour toutes les densités arborées. Le potentiel arboré de chaque régime est caractérisé par son optimum : fraction arborée réalisant le meilleur compromis entre productivité du peuplement et développement des arbres.

L'application de cette méthodologie à des projections climatiques futures, pour le RCP 8.5, fait l'objet du chapitre 4. Le modèle ORCHIDEE est forcé avec des sorties de modèles de climat, pour le début et la fin du 21e siècle. A la fin du siècle, le régime 1 ne représente plus que 25% du domaine total, en moyenne, tandis que le régime 4 devient prépondérant (49% du domaine). La stabilité du potentiel arboré intrinsèque à chaque régime permet d'interpréter une évolution vers un régime plus ou moins favorable comme une augmentation ou une diminution de ce potentiel. Or celui ne subit pas la diminution générale que l'augmentation de l'aridité laissait présager. Une expérience complémentaire montre que la raison en tient principalement à l'effet de fertilisation du CO₂ atmosphérique. L'interprétation de ces résultats montre ainsi que les zones du domaine tropical semi-aride dans lesquelles une reforestation serait à déconseiller sont assez peu étendues.

Summary

Title : Reforesting semi-arid tropics ? Objectives, constraints and climatic opportunities in the context of global change.

Keyword : semi-arid, tropics, climate change, reforestation, modeling

In the face of evergrowing global deforestation, numerous forest protection and restoration projects have been deployed at the international scale. The goal of this thesis is to provide adaptation planning in the vulnerable tropical semi-arid regions with scientific material about reforestation project constraints and opportunities at the global scale, in the context of climate change.

The literature review (chapter 1) confirms that reforestation projects aimed at warming-mitigation hold a better chance of success under tropical latitudes. Indeed, both biochemical and biophysical effects of the vegetation on climate converge toward a global cooling effect. As reforestation in tropical semi-arid regions aims at satisfying various ecosystemic services, it holds beneficial promises at both the global and the local scale. However, due to scarce water resources, implementing a tree cover in semi-arid conditions could turn out unsustainable in the long run.

A bioclimatological is applied, in chapter 2, to a multimodel ensemble of projections in order to draw the evolution of global tropical semi-arid territory under several climate change scenarios (RCP). The present tropical semi-arid territory is expected to remain mostly so in future conditions. However, up to 24% of the this territory on average will evolve towards arider conditions, and up to 11% towards wetter conditions. Nevertheless, the tropical semi-arid territory will increase by the end of the 21st century, by up to 38% on average (RCP 8.5). This increase results from a migration outside of the tropical belt, consistent with the Hadley circulation widening hypothesis under climate change.

Chapter 3 proposes a methodology aimed at analysing the implications of this evolution for the climatic potential of tree cover sustainability. The global vegetation model (ORCHIDEE, developed at IPSL), used to simulate this potential, accounts mechanistically for all the climatic factors of the plant's growth. A typology of result profiles from the simulation experiments partitions the territory into subregions characterized by a specific relation between the tree development and the tree cover density : five types range from the least (Type 1) to the most (Type 4) favourable ones. A reference experiment is perfor-

med using observational climate data (from the Climatic Research Unit). Covering almost half of the territory, Type 1 is characterized by the impossibility to maintain a tree cover for the highest cover densities. The second type in order of surface occupation is Type 4 (28% of the territory). More favourable, it is characterized by high tree development for any tree cover density.

The "tree cover potential" of each type is characterized by its optimum : the tree cover density that realises the best compromise between tree development and total productivity. In Chapter 4, the same methodology is applied to future climate projections for RCP 8.5. The ORCHIDEE model is thus forced with global climate model outputs, for the beginning and the end of the 21st century. By the end of the century, Type 1 represents no more than 25% of the tropical semi-arid territory on average, while Type 4 becomes the dominant one (49% of the territory). Because of the stability of the tree cover potential whithin each type, the evolution toward a more or less favourable type can be directly interpreted in terms of an increasing or a decreasing potential. The results show that the tree cover potential in the tropical semi-arid territory does not systematically suffer from the general decrease that could be expected from increasing aridity. A complementary experiment suggests that the main reason for this result lies is the atmospheric CO₂ fertilization effect. Interpreting these results for reforestation strategy recommendations, suggests that, for the long term, areas of the tropical semi-arid territory where reforestation would be advised against are overall relatively small.

Table des matières

Remerciements	1
Résumé	3
Summary	5
Introduction Générale	11
1 Etat de l'art des enjeux, bénéfiques et risques potentiels de la reforestation dans un climat stable et en transition	15
1.1 Articulation des échelles spatiales autour de la problématique de la reforestation en milieu tropical semi-aride	16
1.1.1 « Penser global, agir local »	16
1.1.2 Les projets de reforestation en milieu semi-aride : risques et contraintes spécifiques	19
1.2 Echelle globale ou régionale : théorie et simulation des impacts potentiels de la déforestation et de la reforestation sur le climat	24
1.2.1 Le raisonnement théorique sur les effets potentiels de la déforestation/reforestation	24
1.2.2 La validation du raisonnement théorique par des expériences numériques	28
1.3 Echelle locale : contraintes et évaluation sur le terrain des projets de reforestation	35
1.3.1 Différents types d'évaluation en milieu réel	35
1.3.2 Résultats d'évaluations en milieu réel : le stock de carbone organique du sol	36
1.3.3 Analyse d'impact d'une forêt en milieu semi-aride chaud	37
1.3.4 L'évaluation des services écosystémiques, souvent qualitative, dans des projets de développement rural	38
1.4 La perspective du changement climatique : aborder la problématique dans un paysage bioclimatique en transition	43
1.4.1 La modélisation du climat futur	43

1.4.2	Les scénarios climatiques futurs	43
1.4.3	La gestion de l'incertitude par une approche multi-modèle	44
1.5	Résumé du chapitre 1	46
2	Evolution du domaine tropical semi-aride du 20^e au 21^e siècle	49
2.1	Choix de l'approche	50
2.1.1	Les différentes classifications climatiques	50
2.1.2	Le choix de l'approche bioclimatique	56
2.2	Détail de la classification, données climatiques et méthodologie appliquée .	58
2.2.1	La classification climatique de Köppen	58
2.2.2	Données climatiques	59
2.2.3	Application de la classification aux données climatiques	59
2.3	Application pour le 20 ^e siècle	62
2.3.1	Observation de la distribution et de l'évolution géographique des zones chaudes semi-arides au cours du 20 ^e siècle	62
2.3.2	Evaluation de la performance des modèles pour représenter les régions semi-arides chaudes	67
2.4	Application aux projections pour le 21 ^e siècle	77
2.4.1	Tendance à l'accroissement de la surface semi-aride chaude corrélée au réchauffement global	77
2.4.2	Nouvelle répartition des régions tropicales semi-arides	82
2.4.3	Caractérisation et répartition des différentes transitions impliquant la classe semi-aride chaude	91
2.5	Interprétation dans la perspective de reforester les régions tropicales semi-arides	102
2.6	Résumé du chapitre 2	104
3	Evaluer le « potentiel arboré » dans les régions tropicales semi-arides au moyen d'un modèle global de végétation	105
3.1	La méthodologie	107
3.1.1	Démarche expérimentale	107
3.1.2	Typologie des profils de résultats	107
3.1.3	Commentaire sur la notion de compétition intra-spécifique dans les régimes	112
3.1.4	Glossaire des notions introduites	112
3.2	Mise en oeuvre avec le modèle global de végétation ORCHIDEE	114
3.2.1	Présentation du modèle	114
3.2.2	Mise en route du modèle	121
3.2.3	Configuration et protocole de simulation	125
3.3	Analyse des sorties de l'expérience de référence selon la typologie	127
3.3.1	Productivité de l'ensemble du domaine tropical semi-aride	127
3.3.2	Identification des régimes de productivité	130
3.3.3	Spécificités climatiques et phénologiques de chaque régime	133
3.3.4	Confrontation des résultats à des valeurs de productivité et de biomasse de référence	140
3.4	Proposition d'interprétation des résultats en termes de « potentiel » et d'« optimum » arboré au sein de chaque régime	148
3.4.1	Caractérisation du « potentiel arboré »	148

3.4.2	Caractérisation de l'optimum de fonctionnement : le « potentiel arboré optimal »	149
3.4.3	Variabilité inter- et intra-régionale des potentiels arborés optimaux	153
3.5	Introduire des critères alternatifs d'évaluation de la performance du couvert arboré	156
3.5.1	Comportement des critères alternatifs en relation avec la fraction arborée	156
3.5.2	Coût des variations de fraction arborée sur la performance des différents critères	159
3.5.3	Quels sont les bénéfices et les coûts du choix du potentiel arboré optimal?	163
3.6	Discussion	169
3.6.1	Résumé du chapitre 3	171
4	Simuler l'évolution future du « potentiel arboré » dans les régions tropicales semi-arides	173
4.1	Mise en oeuvre de la méthodologie d'analyse des potentiels arborés dans une démarche multi-modèle	173
4.1.1	Présentation des expériences réalisées	173
4.1.2	Répartition des régimes de productivité pour la période historique et comparaison avec l'expérience de référence	176
4.2	Redistribution des régimes de productivité dans le domaine tropical semi-aride à la fin du 21 ^e siècle	186
4.2.1	Evolution globale des régimes dans le domaine tropical semi-aride	186
4.2.2	Analyse prospective au sein du domaine tropical semi-aride de la période historique	191
4.2.3	Analyse rétrospective pour les régions <i>devenues</i> tropicales semi-arides dans le futur	194
4.3	Evolution du potentiel arboré entre le début et la fin du 21 ^e siècle	197
4.3.1	Augmentation globale du niveau de productivité	197
4.3.2	Caractérisation de l'évolution du potentiel arboré selon les différents changements de régime ou de classe climatique	200
4.3.3	Interprétation en termes de recommandations pour les stratégies de reforestation	203
4.4	Effets combinés de l'aridification et de l'augmentation de la concentration en CO ₂ sur le potentiel arboré	206
4.4.1	Evolution des caractéristiques climatiques des régimes de productivité	206
4.4.2	Effet de l'augmentation du CO ₂ atmosphérique sur les potentiels arborés futurs	207
4.5	Discussion et perspective	211
4.6	Résumé du chapitre 4	213
	Conclusion Générale	215
	Bibliographie	229
	Liste des acronymes	237

Annexe Chapitre 2	241
Annexe Chapitre 3	253
Annexe Chapitre 4	267
Annexe Quilcaille et al. 2015	287

Introduction Générale

Depuis 1990, 129 millions d'hectares de forêts ont été perdus selon un rapport¹ de la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture). Face à l'ampleur alarmante de cette déforestation mondiale, de nombreux projets ont été mis en place à l'échelle internationale pour enrayer la disparition du couvert forestier. Les couverts forestiers font donc l'objet de programmes de protection (lutte contre la déforestation) et de restauration (reforestation). L'enjeu est double : réduire les émissions de gaz à effet de serre générées par la déforestation et préserver la biodiversité des écosystèmes forestiers. Ces programmes démontrent aujourd'hui un certain succès, puisque, depuis 2010, le rythme de la déforestation s'est ralenti, passant de 0.18% dans les années 1990 à 0.08% au cours de la période 2010-2015 (FAO). Ces progrès sont encourageants du point de vue de la conservation de la biodiversité : on estime communément que 50 à 80% de la biodiversité terrestre est abritée dans les écosystèmes forestiers. En outre, les forêts jouent un rôle fondamental dans la lutte contre la pauvreté rurale en participant à la sécurité alimentaire et en fournissant aux gens des moyens de subsistance (déclaration du Directeur général de la FAO José Graziano da Silva en 2015). Enfin, la FAO estime que les émissions totales de carbone provenant des forêts ont diminué de plus de 25% entre 2001 et 2015. Or ces émissions représentaient plus de 20% des émissions totales de carbone dans les années 1990 (selon le quatrième rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, ou GIEC). En conséquence, enrayer la déforestation a un impact positif sur le ralentissement du réchauffement climatique. Le programme REDD+ (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation*²), porté par les Nations Unies, a ainsi été mis en place avec pour mission d'inciter les pays en développement à réduire leurs émissions de carbone liées à la déforestation, en créant une valeur financière du carbone stocké par les écosystèmes forestiers. Cette approche doit faciliter pour ces pays la réconciliation entre enjeux de développement socio-économique et protection du couvert forestier. Qui plus est, alors que l'enjeu climatique de la lutte contre la déforestation est global, le succès des programmes de grande échelle repose sur la réussite des actions mises en oeuvre à l'échelle locale. Le rapport de la FAO de 2015 souligne ainsi que les progrès réalisés aujourd'hui dans la protection des forêts ont été permis, notamment, par une plus grande implica-

1. <http://www.fao.org/3/a-i4793f.pdf>

2. [http://www.unredd.net/index.php?option=com_content&view=article&id=2081&Itemid=](http://www.unredd.net/index.php?option=com_content&view=article&id=2081&Itemid=481)

tion des communautés locales dans les politiques de développement et la planification. Ceci implique que les projets de protection forestière et de reforestation soient évalués, à l'échelle locale, dans un cadre intégrant les objectifs écologiques et socio-économiques de développement. Mais intégrer des critères climatiques dans une évaluation de projet n'est pas une tâche aisée. Souvent, la dimension climatique est ainsi réduite à l'estimation du carbone émis ou piégé. On entend néanmoins des appels s'élever aujourd'hui pour une *climate-smart reforestation* (Locatelli *et al.*, 2015), qui prendrait en compte aussi bien la dimension d'atténuation du réchauffement climatique, plutôt globale, que des objectifs d'adaptation au changement climatique, plutôt locaux.

Le travail de thèse rapporté ici est né de la rencontre entre l'entreprise sociale et solidaire Kinomé³ et ma directrice de thèse, climatologue au laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE). Impliquée dans des projets de reforestation dans le monde entier, Kinomé oeuvre à un double objectif : inverser la déforestation dans le monde en réimplantant des arbres partout où c'est possible, et améliorer les conditions de vie des populations, souvent défavorisées, concernées par ces projets. Son leitmotiv : « faire de l'arbre une solution de développement humain et économique ». Ainsi, Kinomé répartit son activité entre trois missions : du conseil aux entreprises et aux organisations qui s'impliquent dans des projets en lien avec la forêt, de la gestion de projets forestiers, et enfin de la recherche appliquée sur le fonctionnement et les interactions des arbres et des forêts avec le milieu. La progression des connaissances des impacts des arbres et des forêts aux échelles tant globale que locale permet à Kinomé, ainsi qu'à tous les acteurs impliqués dans des projets forestiers, d'améliorer l'élaboration et l'évaluation des projets. Or beaucoup de questions demeurent aujourd'hui. A l'échelle globale, pour commencer, l'impact de la forêt sur le climat est souvent résumé aux seules émissions de carbone. Pourtant, la littérature scientifique fait état d'autres effets de la forêt sur le climat, qui dépendent, notamment, de la latitude à laquelle la forêt est implantée : certaines régions seraient ainsi plus favorables à la reforestation comme moyen d'atténuation du réchauffement climatique. Ces effets ne sont encore que peu considérés dans les stratégies de reforestation à l'échelle globale. A l'échelle locale, d'autre part, les populations savent que le couvert forestier leur procurent des conditions microclimatiques particulières : le vent y est moins fort, l'air plus humide et la température moins variable que dans les zones environnantes non boisées. Ce savoir empirique, corroboré par les connaissances théoriques sur les écosystèmes forestiers, est toutefois difficile à quantifier lors d'une évaluation de projet, *a fortiori* pour une évaluation *ex-ante*⁴. L'impact d'un couvert forestier sur le microclimat dépend fortement, en effet, de la densité et de la composition du couvert, ainsi que des conditions environnementales locales, notamment climatiques. Les conditions climatiques locales sont en effet induites au premier ordre par la circulation atmosphérique globale, qui détermine les différentes zones climatiques terrestres. Les connaissances scientifiques qui existent aujourd'hui sur les impacts microclimatiques de l'implantation, ou de la suppression, d'un couvert forestier, sont encore très disparates, associées au terrain d'expérimentation, et donc peu généralisables. Mon travail de thèse s'est inscrit ainsi dans cette réunion d'acteurs « de terrain » et de scientifiques autour du questionnement des impacts des projets de reforestation sur le climat.

3. <http://kinome.fr>

4. évaluation de projet réalisée avant sa mise en oeuvre

Une certaine connaissance des enjeux et des impacts de la reforestation dans le monde, d'une part, et les terrains d'action privilégiés de Kinomé, d'autre part, ont orienté dès le départ la problématique vers son application aux régions tropicales semi-arides. Ces régions sont reconnues comme parmi les plus fortement soumises au risque de désertification et recèlent un fort potentiel de séquestration du carbone, selon une étude⁵ de l'UNCCD (Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification). Par ailleurs, ces régions abritent aujourd'hui des populations humaines démographiquement importantes et souvent défavorisées. Dans les régions chaudes des latitudes tropicales, ces populations font face à un accroissement démographique rapide dans un contexte de ressources très limitées, et souvent en déclin. Les projets de développement en cours dans ces régions cherchent à améliorer les conditions de vie locales en optimisant l'usage des ressources disponibles. L'arbre, fournisseur de multiples services, est une ressource contradictoire : procurant du bois pour le feu et la construction, de l'ombre pour les hommes et les bêtes, des fruits pour la consommation ou la transformation, il contribue parfois aussi à l'amélioration des sols et à leur humidification en remontant l'eau des nappes très profondes. D'un autre côté, l'arbre exerce sur les cultures une compétition pour l'eau qui compromet les rendements agricoles dans les régions soumises à un fort stress hydrique. Les projets de développement dans ces régions doivent peser ces avantages et inconvénients d'actions comportant une part de reforestation.

L'objectif de mon travail de thèse est donc d'apporter des éléments scientifiques permettant de mieux caractériser les contraintes et les opportunités de projets de reboisement dans le contexte du changement climatique global, et ainsi de dégager des recommandations pour des actions d'adaptation des populations vulnérables aux changements climatiques. Est-il possible d'améliorer les stratégies de reforestation dans les zones tropicales semi-arides, en anticipant, d'une part, l'impact du changement climatique sur ces stratégies à moyen et long terme, d'autre part les impacts potentiels de ces stratégies sur le climat de surface ?

Construit à partir de questionnements « de terrain », ce travail s'inscrit dans le cadre de la recherche scientifique sur le changement climatique, dont il adopte les outils et les méthodes. La connaissance scientifique produite durant ces dernières décennies sur le changement climatique en cours et à venir est tout entière bâtie autour de l'élaboration de modèles, alimentés et validés par des observations et des mesures du climat passé et actuel, et de l'utilisation de ces modèles pour générer des scénarios d'évolution des conditions climatiques futures. C'est, premièrement, en exploitant les résultats de ces travaux de simulation du climat futur, et, deuxièmement, en utilisant un modèle de surface - une composante des modèles de climat global -, que je propose ici des éléments de réponses à la question de l'évolution des stratégies de reforestation dans ce climat en transition.

Dans la suite de ce manuscrit, le **premier chapitre** propose une synthèse succincte de l'état des connaissances sur les impacts de reforestation aux échelles globales et locales. Dans ce même chapitre, j'introduirai également l'approche de simulation du climat global et de ses résultats rassemblés dans le cadre de l'exercice du GIEC.

J'ai consacré le **second chapitre** à l'évolution des zones tropicales semi-arides dans le futur. Nous verrons comment, selon les différents scénarios d'évolution climatique, ces zones seront amenées à s'étendre même en-dehors des limites tropicales actuelles. Les

5. UNCCD 2012 : *Desertification : a visual synthesis*

stratégies de reforestation aujourd'hui adaptées à ces niches climatiques pourront-elles être exportées dans ces nouvelles régions ?

Je pose dans le **troisième chapitre** la question de la définition d'un « potentiel arboré » dans ces régions au climat tropical semi-aride : quelle densité de couvert arboré ces milieux peuvent-ils supporter ? Comment définir, selon quels critères, un optimum arboré ? Je teste, pour aborder cette question, l'utilisation du modèle de surface ORCHIDEE, composante du modèle de climat global de l'IPSL ⁶ (un des deux modèles français participant à l'exercice du GIEC). Le modèle de surface paraît en effet la courroie de transmission naturelle entre la modélisation du climat global et la modélisation de la végétation à la surface terrestre... à condition toutefois de parvenir à réconcilier la résolution grossière et les nécessaires simplifications du modèle avec la précision attendue par les acteurs de terrain !

Dans le **quatrième et dernier chapitre**, l'évolution de ces potentiels arborés est étudiée en appliquant la méthodologie exposée au chapitre 3 aux projections climatiques futures. Je m'efforcerai alors d'explicitier les implications des résultats obtenus pour l'élaboration des stratégies de reforestation.

→ La problématique générale dans laquelle s'inscrit ce travail est celle des impacts des projets de reforestation sur le climat et sur les services écosystémiques, plus particulièrement dans les régions tropicales semi-arides. Cette problématique est très large et implique de nombreux domaines tant scientifiques (pour la compréhension et l'anticipation des mécanismes à l'oeuvre) que pratiques (pour la prise en compte des contraintes et des enjeux de la mise en oeuvre de tels projets). Dans le domaine scientifique, différentes disciplines sont concernées, de l'écologie à la climatologie en passant par l'agronomie et les sciences sociales, pour n'en citer que quelques unes. Cette problématique ne constitue pas, à ma connaissance, un sujet d'étude abordé en tant que tel dans la littérature scientifique, mais divers éléments de réponse peut être rassemblés en empruntant à ces différents domaines : cet effort fait l'objet du chapitre suivant.

6. Institut Pierre et Simon Laplace

Etat de l'art des enjeux, bénéfiques et risques potentiels de la reforestation dans un climat stable et en transition

Une partie des réponses à la question des impacts de la reforestation sur le climat se trouvent dans la littérature scientifique des deux ou trois dernières décennies. Différentes approches ont été utilisées parallèlement. Une approche fondée sur le raisonnement théorique, en premier lieu, a suggéré que la végétation terrestre jouait un rôle non négligeable dans le bilan énergétique global de la planète. De ce fait, l'équilibre climatique serait influencé par la présence ou l'absence d'un couvert végétal terrestre. Cette hypothèse théorique a fait par ailleurs l'objet de travaux de validation par l'expérience, d'une part virtuelle, à partir de simulations numériques, d'autre part en milieu réel, par l'évaluation d'actions de terrain. L'approche plus souvent globale ou régionale dans le premier cas, est surtout locale dans le second.

Dans ce chapitre, la problématique est d'abord positionnée par rapport aux différentes échelles spatiales (section 1.1). L'évaluation des impacts de projets de reforestation est ensuite successivement analysée aux échelles globale (section 1.2) et locale (section 1.3). Enfin la problématique est positionnée dans la perspective du changement climatique en cours (section 1.4) ; l'approche scientifique permettant d'étudier les scénarios climatiques futurs, qui sera suivie dans la suite de ce manuscrit, est introduite.

1.1 Articulation des échelles spatiales autour de la problématique de la reforestation en milieu tropical semi-aride

La problématique relève de toutes les échelles spatiales de façon coordonnée. Elle s'inscrit dans l'échelle temporelle du changement climatique en cours, doit tenir compte des incertitudes inhérentes à ce dernier et implique, enfin, différents types d'acteurs et différentes disciplines.

1.1.1 « Penser global, agir local »

Formule-phare du développement durable, ce slogan s'applique également aux projets de reforestation. De fait, ces derniers s'inscrivent dans la problématique du développement durable, dans le sens où les actions entreprises s'intègrent à l'organisation socio-économique des territoires et sont pensées dans la durée. La problématique de la reforestation va encore plus loin à l'échelle globale, par le rôle qu'elle joue dans l'atténuation du réchauffement climatique (qui sera analysé dans la section 1.2). La figure 1.1 illustre sommairement les interactions entre échelle globale et échelle locale.

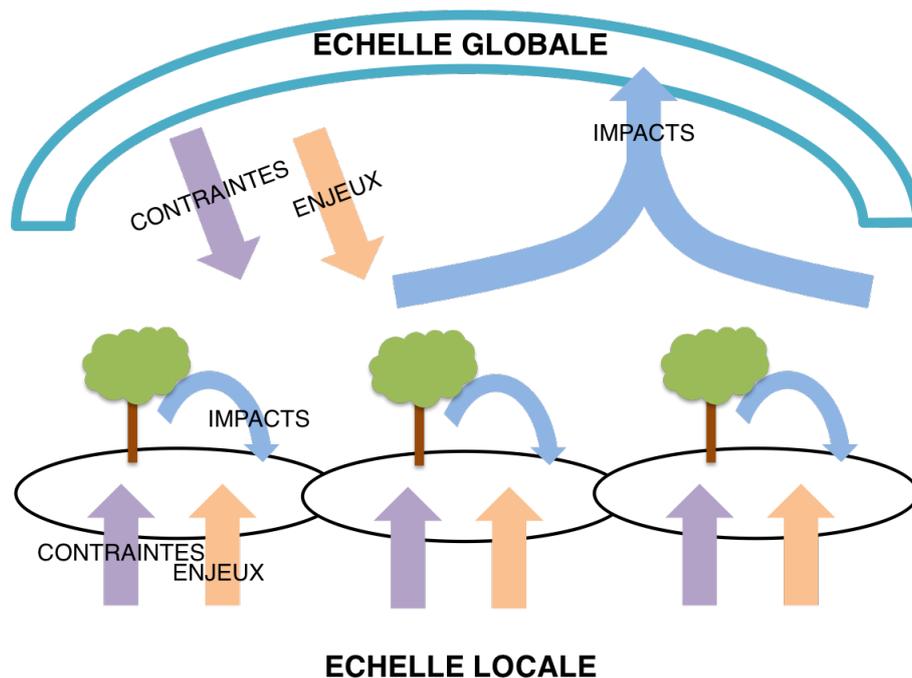


FIGURE 1.1 – *Articulation des échelles globale et locale pour les projets de reforestation.* Contraintes (par exemple détermination des grandes zones climatiques terrestres) et enjeux (par exemple atténuation du réchauffement) s'exercent à l'échelle globale. Ils s'additionnent, à l'échelle locale, à des contraintes (par exemple disponibilité de surface pour la reforestation) et enjeux (par exemple assurer la sécurité alimentaire) spécifiques. Les projets de reforestation en tiennent compte lorsqu'ils sont mis en oeuvre. Les impacts de ces projets sont locaux (par exemple rafraîchissement de la température sous couvert ou augmentation des rendements), et leur somme produit des effets à l'échelle globale (par exemple refroidissement climatique par augmentation du puits de CO_2).

Les enjeux des échelles globale et locale sont étroitement intriqués. Aujourd'hui, l'approche *top-down*¹ envisage principalement l'enjeu global d'atténuation du réchauffement climatique par une augmentation de la fonction puits de CO₂.

1.1.1.1 Impulsion à l'échelle globale

L'impact global avéré des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique sur le climat motive aujourd'hui des projets d'atténuation du changement climatique à la même échelle. Parmi ces projets, la lutte contre la déforestation et la reforestation constituent des leviers essentiels.

Or ces projets qui consistent à enrayer la déforestation (émettrice de gaz à effet de serre) et à favoriser la reforestation (pour piéger le carbone atmosphérique) reposent sur des actions locales tout en ayant des effets directement reliés à la circulation atmosphérique globale. Les grands programmes comme REDD+² ont donc été impulsés à l'échelle internationale pour inciter localement les pays à agir dans le sens de ces enjeux globaux.

L'effet de la reforestation sur le climat à l'échelle globale sera étudié dans la section 1.2.

1.1.1.2 Impulsion à l'échelle régionale : reforester contre l'érosion et la désertification

Par le passé, l'impulsion se faisait plutôt à l'échelle régionale dans de grands projets de reforestation destinés à lutter contre la désertification et l'érosion. En 1934, un projet de reforestation fut entrepris dans les grandes plaines des Etats-Unis, en réponse aux tempêtes de sables violentes survenues dans le « *Dust Bowl* ». En 1942, 220 millions d'arbres furent ainsi plantés, sur une longueur de 29900 km du Canada vers le Nebraska puis, devant le succès du projet, le Texas (Gardner, 2013). Aujourd'hui délaissé, le projet fut néanmoins considéré comme un succès et inspira des projets similaires dans d'autres régions du monde. La « Grande Muraille Verte de Chine » est un vaste projet de plantation de forêts destinées à enrayer l'avancement du désert de Gobi et ses conséquences sur la perte de terres arables. Ce projet a démarré en 1978, avec des plantations en damiers composées principalement d'essences exotiques (Parungo *et al.*, 1994). L'objectif premier était de faire barrage aux tempêtes de sable naissant au-dessus du désert de Gobi (aux conditions climatiques arides et semi-arides froides) et causant d'important dommages en Chine, mais aussi au Japon dans les deux Corées. En dix ans, 9 millions d'hectares furent ainsi plantés (Malagnoux *et al.*, 2008) et la nouvelle forêt couvrait 50 millions d'hectares en 2009. Cependant, les impacts de cet ambitieux projet sont mitigés : Wang *et al.* (2010) suggère que les effets bénéfiques de ce programme ont été largement surestimés, faute d'avoir réalisé des évaluations suffisantes.

En Algérie, l'implantation d'un « barrage vert » fut lancée en 1971, dans la prolongation de « Chantiers populaires de reboisement » initiés en 1966 (Malagnoux *et al.*, 2008). Le projet consistait à implanter un couvert arboré de 3 millions d'hectares en bordure du

1. pilotage de programmes tel que les décisions sont prises au sommet d'une hiérarchie (ici l'échelle globale) et appliquées aux échelon inférieurs (ici les échelles locales)

2. http://www.unredd.net/index.php?option=com_content&view=article&id=2081&Itemid=481

Sahara. D'autres pays nord-africains s'impliquèrent dans des projets analogues, mais qui semblent être finalement demeurés lettre morte (Malagnoux *et al.*, 2008).

Le projet de la « Grande Muraille Verte » transafricaine : Plus récemment, un nouveau projet de « barrière verte » a vu le jour. Impulsé comme ses prédécesseurs à l'échelle régionale, il vise à implanter une forêt couvrant une bande de 15 km de large et traversant le continent « de Dakar à Djibouti ». Il implique onze pays africains et couvre une distance de 7675 km. Sa vocation première est la lutte contre la désertification dans les milieux saharo-sahéliens (OHMI de Tèssékéré³). Le tracé de la « Grande Muraille Verte » doit demeurer dans des isohyètes inférieures à 400 mm.

Tirant la leçon d'échecs lors des projets précédents, le grand projet de muraille verte est envisagé comme la multiplicité de projets locaux, tenant compte des spécificités régionales, privilégiant les espèces locales et impliquant les populations de manière à faciliter l'appropriation de ces actions par les communautés locales.

Le projet est géré par l'Agence Pan-Africaine de la Grande Muraille Verte, opérationnelle depuis 2008. Depuis quelques années, le premier objectif, assez généraliste, de lutte contre la désertification, a été ré-orienté vers un nouvel enjeu : lutter contre la pauvreté sous toutes ses formes, en faisant de l'arbre le pivot d'actions de développement durable face au changement climatique (intervention du colonel Pape Waly Guèye lors de la conférence internationale GreenArid, avril 2015⁴).

Ces projets régionaux sont entrepris, pour ceux répertoriés ici, dans les milieux semi-arides. Ils subissent donc les contraintes particulières à ces milieux, dont il est traité dans la suite (section 1.1.2).

1.1.1.3 Impulsion à l'échelle locale et sollicitation des ressources globales

A l'échelle locale, la forêt permet la diversification des moyens de subsistance en augmentant la résilience sociale des communautés, notamment face aux épisodes de sécheresse : d'une part, la diversification des produits étale dans le temps leur production et évite de perdre la récolte d'une année entière à l'occasion d'une seule sécheresse, d'autre part, les arbres sont plus résistants à la sécheresse que les herbacées (Pramova *et al.*, 2012). Le cas de l'*agroforesterie*, en particulier, a pour enjeu non seulement de diversifier les moyens de subsistance, mais aussi d'améliorer la productivité agricole. Ainsi les bénéfices sociaux et écologiques attendus de projets de reforestation dépassent largement, du point de vue local, celui de piégeage du carbone atmosphérique. Ces bénéfices sont pour une part directement liés à l'atténuation globale et régionale du changement climatique, mais aussi à la résilience des économies rurales aux impacts de la variabilité climatique, à l'atténuation de ces impacts sur le cycle de l'eau et sur la biodiversité, et à la réduction des impacts locaux des événements extrêmes (Locatelli *et al.*, 2015).

Concertation et collaboration entre les différentes échelles : Pour les projets de développement local, la reforestation ne constitue le plus souvent qu'un des

3. Observatoire Hommes-Milieus, mis en place par l'Institut d'Écologie et d'Environnement (INEE) du Centre National pour la Recherche Scientifique (CNRS) français.

4. Conférence GreenArid : « *Que savons-nous des impacts potentiels de scénarios de reverdissement dans les régions semi-arides ?* » Dakar (Sénégal), 15-17 Avril 2015

volets du projet parmi d'autres, dont les enjeux concernent au premier chef l'amélioration des conditions de vie des populations. Epule *et al.* (2013) propose pour la région sahélienne, à la suite de Lindell *et al.* (2010b,a) pour la région péruvienne, de pallier le manque de ressources financières locales par la collaboration avec des acteurs des échelles supérieures pour financer l'investissement dans des systèmes de culture plus performants. Ces auteurs prônent le recours à des systèmes plus mécanisés et consommateurs d'engrais de synthèse tout en mettant en garde contre les effets potentiellement néfastes de ces mesures sur l'environnement ; ceux-ci doivent être évités par une utilisation éduquée et responsable. Les ressources locales étant insuffisantes pour financer ces investissements, la collaboration d'acteurs issus d'institutions (gouvernementales et non-gouvernementales) à des échelles supérieures devrait être mobilisée (Epule *et al.*, 2013).

L'idée de solliciter des financements internationaux pour contribuer à la mise en oeuvre de projets locaux (et dont la somme aura un impact global) est particulièrement pertinente dans le cas des régions semi-arides.

► Les projets de reforestation sont motivés par différents enjeux à l'échelle globale (atténuation du réchauffement climatique et lutte contre la désertification) et à l'échelle locale (lutte contre la pauvreté), les deux échelles étant étroitement intriquées : la lutte contre la pauvreté est appliquée localement, mais répond à un enjeu mondial, tandis que la lutte contre le réchauffement climatique est un enjeu mondial dont l'application doit être déclinée en fonction des problématiques locales. Si les deux échelles - ainsi que les échelles intermédiaires - sont abordées séparément pour faciliter certains types d'études, comme nous le verrons par la suite, leur articulation est nécessaire à la réussite des projets aux deux échelles.

Les échelles sont interdépendantes : la réussite à l'échelle globale des programmes d'atténuation du changement climatique repose sur le succès et la durabilité à l'échelle locale des actions entreprises, tandis que ces derniers nécessitent l'appui des instances de plus grande échelle.

→ Dans la suite de ce chapitre, la revue des travaux d'évaluation des impacts de projets de reforestation sera envisagée successivement à l'échelle globale et à l'échelle locale, en accord avec les différents types d'études. L'ensemble de ce travail de thèse est focalisé sur la reforestation, mais les liens vers d'autres domaines (écologie, agriculture, société) devront être présents à l'esprit. Avant de poursuivre la revue de littérature sur la reforestation, la problématique particulière des régions tropicales semi-arides fait l'objet de la section suivante.

1.1.2 Les projets de reforestation en milieu semi-aride : risques et contraintes spécifiques

Les régions tropicales semi-arides qui font l'objet de ce travail de thèse posent des enjeux et des contraintes spécifiques dans l'articulation entre les échelles globale et locale. Les enjeux de la reforestation dans ces régions sont aussi importants à ces deux échelles, comme évoqué en introduction. La limitation de la ressource en eau contraint fortement la reforestation, ce qui singularise la problématique de la reforestation dans ces milieux.

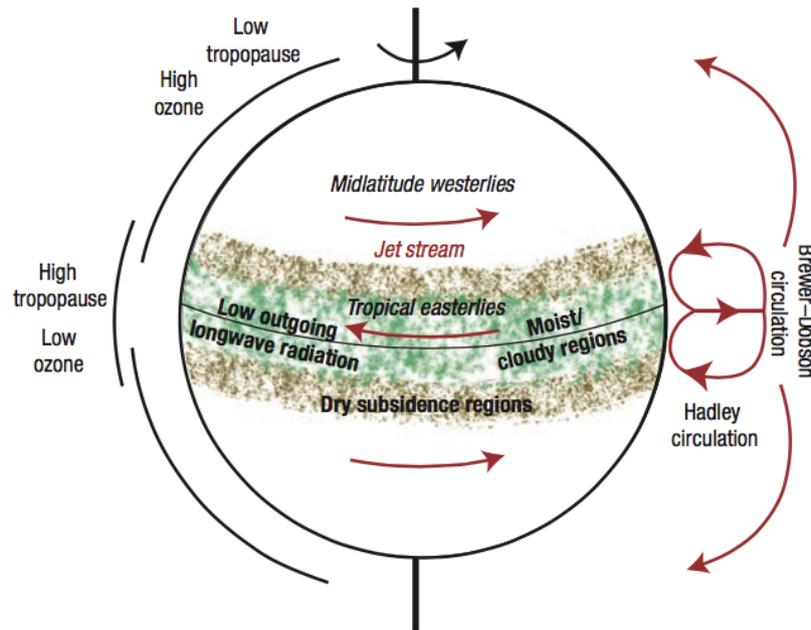


FIGURE 1.2 – *Figure extraite de Seidel et al. (2008) : Répartition des ceintures tropicales humides et sèches sous l'effet des des courants atmosphériques zonaux et des circulations méridiennes de Hadley et de Brewer-Dobson. Les régions de subsidence tropicale sont situées de part et d'autre de la ceinture tropicale.*

1.1.2.1 Définition climatique du domaine tropical semi-aride

Le climat est le facteur déterminant au premier ordre de l'aridité. A l'échelle planétaire, les régions tropicales sont définies par la circulation atmosphérique (figure 1.2) : de l'air chaud et humide s'élève à l'équateur de la surface jusqu'à la haute atmosphère. L'air en montant se refroidit, abaissant le point de saturation, ce qui active le déclenchement des précipitations. L'air circulant dans la haute atmosphère s'assèche donc avant de redescendre vers la surface. Ces régions de subsidence subtropicale sont par conséquent sèches, chaudes et presque sans couverture nuageuse.

Dans la pratique, l'identification des zones semi-arides repose sur des indicateurs d'aridité. Dans la littérature scientifique (par exemple Reynolds *et al.* (2007)), les « *drylands* » sont fréquemment utilisés comme une unité fonctionnelle fondée sur la définition de la Convention Cadre des Nations-Unies pour la Lutte contre la Désertification : les « *drylands* » regroupent les régions arides, semi-arides et sub-humides sèches, c'est-à-dire des « *zones, autres que polaires et sub-polaires, dans lesquelles le rapport des précipitations annuelles sur l'évapotranspiration potentielle est compris entre 0.05 et 0.65* ». La définition purement climatique de ces régions dites « sèches » recouvre ainsi une gamme assez large de niveaux d'aridité. Ce gradient d'aridité climatique est manifesté dans la réalité par un gradient de nature et de densité du couvert végétal.

Du point de vue climatique, les régions semi-arides occupent une position frontalière entre les zones très arides et les zones plus humides. Ces régions sont donc particulièrement sensibles aux variations de températures et de précipitations, qui peuvent faire basculer un écosystème vers un état complètement désertique ou au contraire plus végétalisé. Dans un contexte de ressources aussi limitantes, le moindre changement de fertilité des sols peut

avoir des conséquences très importantes sur le niveau de vie des populations.

1.1.2.2 Définition étendue du domaine tropical semi-aride

La définition strictement climatique des zones tropicales semi-arides n'est pas toujours celle utilisée en pratique. Sur le terrain, les indicateurs agro-écologiques induisent une identification plus large des zones tropicales semi-arides que celle strictement climatique.

La définition du Larousse est à cet égard révélatrice. La première partie de la définition de l'aridité est bien celle d'un déficit en eau : « *insuffisance en eau, mesurée au sol et dans l'atmosphère, résultant de la faiblesse (ou de l'absence) des précipitations, souvent associée à des températures élevées (accroissant l'évaporation)* ». La suite en décrit les manifestations : « *[L'aridité] se traduit par la disparition de la végétation et souvent par celle de l'écoulement permanent des eaux* ». En effet, les terres les plus arides sont les moins favorables au maintien d'une couverture végétale, et l'absence ou la dégradation de ce couvert induit des pertes d'eau par ruissellement jusqu'à tarir les cours d'eau. Une des implications de cette définition est que l'état de la couverture végétale se trouve être employé comme critère de reconnaissance d'une région semi-aride en-dehors du contexte strictement climatique. Ainsi, au facteur climatique de l'aridité d'une région s'ajoutent un facteur écologique et un facteur anthropiques, présentés ci-dessous. Ces deux facteurs influencent l'état de la végétation.

Facteur d'aridité écologique Dans les régions tropicales aux conditions climatiques intermédiaires entre désert et forêt équatoriale, la forêt et la savane ont été décrites comme des attracteurs stables d'un éco-système dynamique (Holmgren *et al.*, 2013). Les facteurs régulant la dynamique de ce système sont multiples (le feu est un facteur prépondérant) et certains mécanismes sont déjà bien compris. Une conséquence en est que le couvert végétal considéré comme l'archétype de la zone écoclimatique semi-aride, la savane, occupe aussi des régions n'ayant pas été classées comme semi-arides.

Les savanes occupent en effet des classes écoclimatiques dites semi-arides ou sub-humides, c'est-à-dire balayant un large spectre de précipitations annuelles, de sorte qu'elles se rencontrent dans des contextes de précipitations⁵ autorisant l'existence d'autres biomes - forêts (Sankaran *et al.*, 2005; Bond *et al.*, 2003) ou prairies herbacées. Sankaran *et al.* (2005) démontre, pour la région sahélienne, que l'existence des savanes en zones arides et semi-arides (ici, en-deçà d'un seuil de précipitations annuelles de 650 mm) est entièrement déterminée par la pluviométrie. Néanmoins, à partir d'un seuil intermédiaire (de l'ordre de 360 mm) de précipitations annuelles, d'autres facteurs déterminent la physionomie de ces savanes en régulant la densité du couvert arboré. Le facteur prépondérant serait le feu. Bond *et al.* (2003, 2005) (rappelé dans Bond (2008)) concluent par des simulations numériques que les forêts devraient occuper le double de leur surface actuelle si elles étaient limitées seulement par les conditions climatiques.

Les savanes, identifiées comme des écosystèmes de zones présentant un certain degré d'aridité, occupent donc des régions dont les conditions climatiques sont plus ou moins favorables à l'implantation d'un couvert forestier.

5. Il existe aussi des savanes boréales rencontrant une problématique analogue mais à des seuils de précipitations différents (Liu *et al.*, 2013), et qui ne sont pas le sujet de ce travail. De plus, les conditions climatiques devraient considérer d'autres facteurs dont on parle rarement (CO_2 , rayonnement), et les effets indirects (via la biosphère).

Facteur d'aridité anthropique Le fonctionnement naturel de l'écosystème est perturbé, et finalement totalement anihilé, par l'action humaine dans les régions fortement anthropisées.

La déforestation (qui destabilise les sols et favorise le lessivage) associée à une pression trop forte (non durable) sur les ressources disponibles (épuisement des sols cultivés en diminuant les transferts de fertilité par rotation inter-culture et culture-parquage⁶) peuvent conduire à la suppression du couvert végétal. La restauration des conditions favorables au maintien d'un écosystème fertile devient impossible, au moins à court terme, transformant ces terres en milieux arides, alors qu'elles n'y étaient pas climatiquement déterminées. Les rétroactions de la végétation sur le climat risque de pérenniser cette aridité en diminuant l'évapotranspiration et, par conséquent, les précipitations, par rétroaction positive.

Le travail présenté dans ce manuscrit ne concerne que les zones tropicales semi-arides selon la définition strictement climatique. Dans la suite de ce chapitre, cependant, les résultats de la littérature pour les expériences en milieu réel se situent souvent à un carrefour entre ces définitions. Dans la perspective plus large de la problématique des conditions de vie humaine en milieu semi-aride, il est nécessaire d'inclure les trois composantes - climatique, écologique et anthropique - dans le raisonnement.

1.1.2.3 Les enjeux spécifiques des régions tropicales semi-arides

L'idée de tirer parti des vastes étendues de territoires secs pour installer des pièges à carbone naturels en vue d'enrayer le réchauffement climatique global remonte déjà à quelques dizaines d'années.

En effet, ces régions arides sont à la fois fort étendues et peu densément peuplées : elles constituent ainsi une opportunité de capture de carbone atmosphérique à grande échelle, et ce en dépit des faibles stocks de carbone et du climat défavorable (Ojima *et al.*, 1993). Woomer *et al.* (2004) estime que la restauration des écosystèmes dégradés de prairies herbeuses sahéliennes à l'état de prairies arborées pourrait, en vingt ans, atteindre un taux de séquestration du carbone de 0.77 tC/ha/an. La reforestation du sud du Sahel sénégalais sur le modèle des forêts sèches soudaniennes permettrait, selon leurs estimations, un gain de carbone systémique (sol+biomasse) d'environ 41 tC/ha, en plus des stocks déjà existants. Grünzweig *et al.* (2007) rapporte une augmentation de 3.4 tC/ha après 35 ans de reforestation au Pin d'Alep dans le désert du Negev en zones méditerranéennes sub-humides et arides, sans irrigation ni fertilisation (300 arbres/ha en 2004).

Néanmoins, cet objectif de fixation du carbone atmosphérique ne doit pas faire oublier que le succès des projets de reforestation est subordonné à la prise en compte des besoins et des activités des populations (humaines) locales : il s'agit là de la garantie de la durabilité des projets. Ffolliott *et al.* (1995) redéfinit ainsi la « foresterie en région sèche » comme la gestion des arbres et arbustes pour améliorer les conditions et la qualité de vie des populations à l'échelle locale. Des difficultés spécifiques se posent dans les régions sèches pour la gestion forestière : précipitations faibles et mal réparties dans l'année, sols pauvres, températures élevées et humidité relative faible. A ces limitations biophysiques

6. Le principe est d'enrichir le sol à cultiver par les déjections des animaux parqués un temps donné sur la parcelle.

viennent s'additionner des limitations humaines et institutionnelles, et un faible niveau d'investissement économique en général.

1.1.2.4 Les contraintes particulières de la reforestation dans les milieux tropicaux semi-arides

Les contraintes particulières des milieux semi-arides forcent à élaborer des modalités de reforestation spécifiques. Dans ces milieux, la reforestation doit presque toujours être envisagée dans une perspective d'agroforesterie (Ffolliott *et al.*, 1995), comme il sera étudié plus en détails dans la section 1.3. L'implantation d'un couvert arboré dans de telles conditions de ressources limitantes (en eau, mais souvent aussi en fertilité du sol) peut introduire une compétition supplémentaire au détriment des productions agricoles ou fourragères, de sorte que la stratégie locale de reforestation devra opérer des compromis entre les différents enjeux.

Les conditions pédo-climatiques ne sont pas, loin s'en faut, toujours favorables au maintien d'un couvert forestier. Jackson *et al.* (2005) montre par exemple que la reforestation de plaines herbacées des Etats-Unis pourrait exercer une pression trop importante sur l'eau disponible, et avoir pour effet collatéral une dégradation de la fertilité et une salinisation des sols (par exsudation de sels au niveau des racines et par remontée d'eau saline depuis les nappes profondes).

A l'échelle locale, le choix de projets de reforestation peut se révéler peu pertinent en raison de la compétition des arbres avec les cultures pour des ressources édaphiques en eau et en nutriments très limitées. Dans ce cas, une solution serait l'application de fertilisants, mais cette fertilisation est aussi source de gaz à effets de serre.

En outre, Berthrong *et al.* (2009) soulève la question du risque d'appauvrissement des sols afforestés : les arbres prélèvent une quantité importante de nutriments, et une gestion inadaptée pourrait appauvrir définitivement les sols par des prélèvements trop fréquents de biomasse.

► Les régions tropicales semi-arides sont déterminées au premier ordre par la circulation atmosphérique à l'échelle globale. Elles sont de plus fortement concernées par les enjeux globaux d'atténuation du réchauffement climatique et de lutte contre la désertification. A l'échelle locale, ces régions ont un fort besoin de programmes de développement, pour lesquels l'agroforesterie répond au double objectif d'amélioration des conditions de vie et de participation à la reforestation mondiale. Un risque majeur de la reforestation continentale porte sur la ressource en eau dans le cas des régions présentant un certain degré d'aridité. En contexte de ressources naturelles limitées, la gestion des actions de reforestation doit tenir compte des conflits entre les enjeux et réaliser les compromis nécessaires.

→ Dans la suite, sont étudiés les résultats publiés sur la problématique de l'évaluation des impacts de projets de reforestation. Nous verrons que les impacts aux échelles globales et locales sont hétérogènes, et que les critères d'évaluation de projets de reforestations sont déterminés par les enjeux spécifiques de ces projets.

1.2 Echelle globale ou régionale : théorie et simulation des impacts potentiels de la déforestation et de la reforestation sur le climat

Les premiers enjeux de la lutte contre la déforestation à l'échelle globale concernaient la perte de biodiversité et la dégradation des sols. En mettant en évidence l'importance des rétroactions climat-végétation sur l'équilibre climatique, la recherche scientifique a fait émerger un nouvel enjeu de cette lutte : son impact potentiel sur le climat.

Le soupçon d'une telle influence des rétroactions de la végétation sur le climat à grande échelle a émergé dans le champ de la recherche sur les climats passés, notamment pour élucider la survenue de l'épisode connu sous le nom de « Sahara vert », il y a entre 9000 et 5000 ans. Selon les résultats de l'expérience rapportée dans Claussen *et al.* (1999), des variations graduelles de l'orbite terrestre ont induit une diminution de l'insolation, conduisant à un affaiblissement de la mousson et à une raréfaction progressive de la végétation. Le déclencheur du basculement vers un régime aride fut le franchissement d'un certain seuil de densité de couverture végétale : devenue insuffisante à entretenir le cycle évaporation-précipitation et le taux d'humidité nécessaire à l'entretien de la végétation, celle-ci finit par disparaître tout à fait.

Une autre expérience de modélisation climatique, rapportée par Betts (1999), a fait date : elle démontrait pour la première fois que les conditions climatiques à l'équilibre diffèrent largement entre un monde végétalisé et un monde dans lequel tous les continents sont désertiques. Qui plus est, l'effet climatique obtenu par la présence du couvert végétal était globalement refroidissant dans cette expérience. Dans le contexte actuel de réchauffement climatique global, cette question de l'effet de la forêt sur le climat revêt dès lors une importance stratégique majeure : la déforestation aggraverait-elle le réchauffement climatique, tandis que la reforestation permettrait de l'atténuer ? Depuis les années 1990, de nombreux travaux scientifiques ont été entrepris pour apporter des réponses à ces questions, par le raisonnement théorique, par des expériences numériques et enfin par des expériences et observations en milieu réel.

1.2.1 Le raisonnement théorique sur les effets potentiels de la déforestation/reforestation

La végétation et l'atmosphère ne sont pas deux composantes indépendantes du système terrestre global : à tout le moins, nous savons que la température de l'air, les précipitations et la teneur de l'air en dioxyde de carbone (CO₂) influent sur le fonctionnement de la végétation terrestre. Ainsi les grandes aires de répartition de la végétation sont-elles déterminées au premier ordre par les conditions climatiques globales, tandis qu'à l'échelle locale les conditions microclimatiques influencent le fonctionnement de cette végétation. L'effet en retour de la végétation sur le climat est peut-être moins connu. On le ressent pourtant en s'abritant, par exemple, à la fraîcheur d'un bosquet par une journée de grosse chaleur : la température de l'air, près du sol, n'est en effet pas la même sur une route, dans une prairie ou sous frondaison. Qu'en est-il à l'échelle globale : la circulation atmosphérique est-elle affectée par la présence de végétation au sol ? L'état hydrique, thermique et biochimique de l'atmosphère est en effet affecté par les échanges d'eau, d'énergie et de CO₂ qui se produisent à tout instant avec la végétation. Une modification de ces échanges

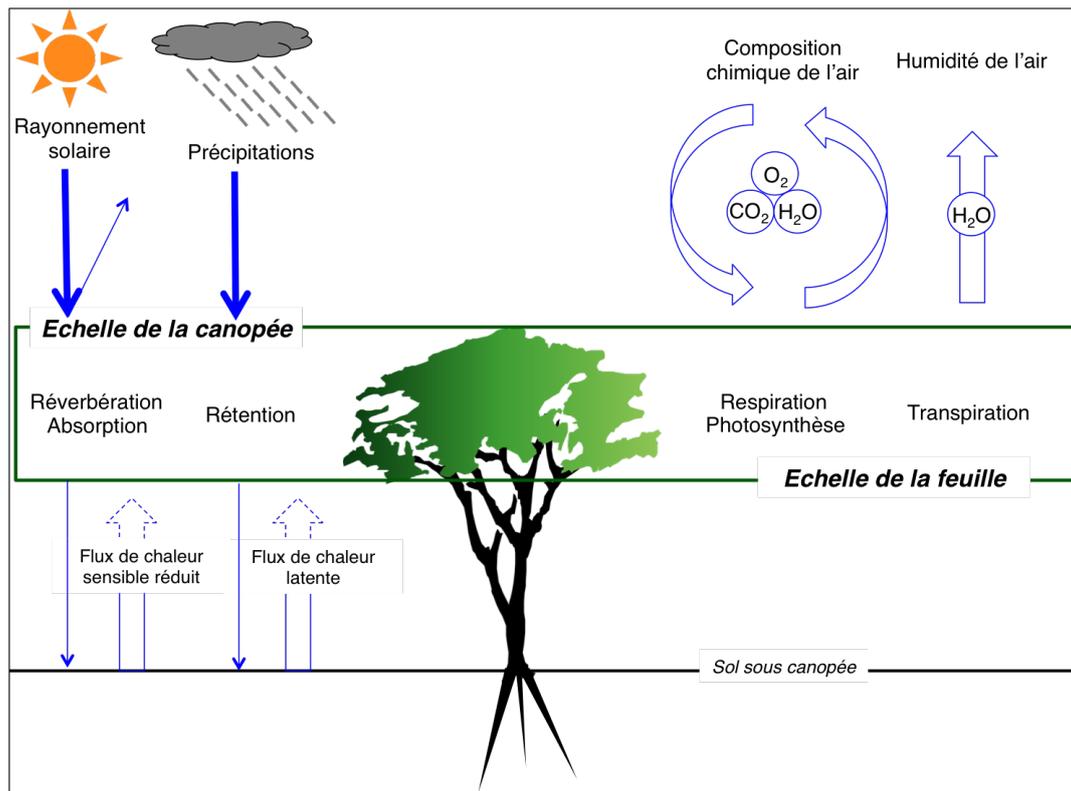


FIGURE 1.3 – *Interactions entre la végétation terrestre et l'atmosphère.*

agit sur son état, en modifie donc l'équilibre dynamique ce qui peut affecter finalement la circulation atmosphérique globale, donc le climat (de Noblet-Ducoudre, 2006).

1.2.1.1 Les échanges végétation-atmosphère

Les interactions entre la végétation et l'atmosphère sont constituées par des échanges d'eau et de gaz, à l'échelle des feuilles, par des échanges de chaleur (chaleur sensible et chaleur latente), par la modification des flux turbulents à travers et autour de la canopée, et enfin par des échanges de composés organiques volatiles.

Les échanges de gaz et d'eau entre végétation et atmosphère sont d'abord gouvernés à l'échelle de la feuille. Les processus de photosynthèse et de respiration échangent eau, dioxygène (O₂) et dioxyde de carbone (CO₂) avec l'air environnant, en utilisant l'énergie solaire incidente; la transpiration foliaire augmente l'humidité de l'air (figure 1.3, partie droite). D'autre part, la végétation influence les échanges de la surface terrestre globale avec la végétation en faisant obstacle entre le sol et l'atmosphère : l'interception du rayonnement (solaire et infra-rouge) va limiter le flux de chaleur sensible émis par le sol sous le couvert de la canopée, et l'interception des précipitations limite le flux de chaleur latente sous couvert (figure 1.3, partie gauche). Enfin, l'augmentation de la rugosité de surface modifie la turbulence de l'air, ce qui altère encore les flux de chaleur à la surface. Les échanges de composés organiques volatiles, en particulier leur émission par la végétation, peut avoir un effet sur le déclenchement des précipitations en altitude, mais surtout sur la production d'ozone atmosphérique.

Un changement dans le couvert végétal modifiera donc ces différents mécanismes, ce

qui altèrera par conséquent les conditions atmosphériques. Cette altération peut avoir des répercussions, via la circulation atmosphérique, sur le climat global, comme nous allons le voir dans la suite.

1.2.1.2 Les différents types d'effets climatiques d'une déforestation/reforestation

Les mécanismes impliqués dans les interactions climat-végétation sont ainsi de nature à la fois biochimique et biophysique. Le raisonnement théorique permet d'anticiper l'influence que la modification du couvert végétal, sous l'effet d'une déforestation ou d'une afforestation, peut avoir sur l'atmosphère via ces mécanismes.

Du point de vue biochimique, le mécanisme en jeu est bien connu : il s'agit du piégeage du carbone au cours de la photosynthèse. La densification du couvert végétal lors d'une reforestation implique une intensification du prélèvement du CO_2 dans l'atmosphère. L'impact devrait donc être une diminution nette de la concentration de l'air en ce gaz à effet de serre, et par conséquent un effet refroidissant à l'échelle globale. Cet effet direct ne tient cependant pas compte des rétroactions des modifications climatiques sur la végétation (Pitman, 2003) : en stimulant la photosynthèse, l'augmentation de l'air en CO_2 peut avoir un effet « fertilisant » sur la végétation, et entretenir ainsi une rétroaction positive sur ce mécanisme.

Du point de vue biophysique, différents mécanismes sont impliqués. L'effet radiatif de rétroaction de la végétation sur le climat est induit par l'albédo, c'est-à-dire l'effet réverbérant du rayonnement solaire incident. Cet effet n'est pas refroidissant ou réchauffant en soi mais en comparaison des couverts alternatifs : un couvert plus sombre absorbe une plus grande quantité de rayonnement incident, et a donc un effet globalement réchauffant. Le deuxième effet biophysique de la végétation sur le climat est non-radiatif et repose sur l'efficacité de l'évapotranspiration et la rugosité du couvert. Ces deux facteurs conditionnent les flux de chaleur sensible et latente à la surface terrestre : une intensification de ces flux a un effet refroidissant de la surface continentale. Cet effet est *a priori* plus localisé que celui de l'albédo. La présence d'un couvert végétal a en outre un effet sur la pluviométrie : l'eau du sol est remontée à la surface par le système racinaire et évaporée, diminuant ainsi la part d'eau du sol évacuée par ruissellement directement vers l'océan. L'humidité de l'air augmente par conséquent, ce qui favorise les précipitations.

1.2.1.3 Des effets potentiellement antagonistes

Ces différents effets climatiques ne jouent pas forcément dans le même sens. En effet, alors que l'effet de la capture du carbone par la reforestation a généralement un effet refroidissant via la diminution des gaz à effet de serre, les effets biophysiques ont un effet refroidissant ou réchauffant selon la latitude à laquelle se trouve le couvert végétal et la disponibilité en eau. La figure 1.4 illustre les effets biochimiques et biophysiques antagonistes sur la température de l'air.

Dans les hautes latitudes, le raisonnement théorique conduit ainsi à anticiper des effets antagonistes de la modification du couvert arboré. L'effet du contraste d'albédo entre le couvert neigeux et les forêts de conifères très sombres est celui d'une absorption de chaleur plus importante par le couvert forestier. En réponse à une afforestation dans ces latitudes, l'effet biophysique correspondant est donc réchauffant. En revanche, l'effet

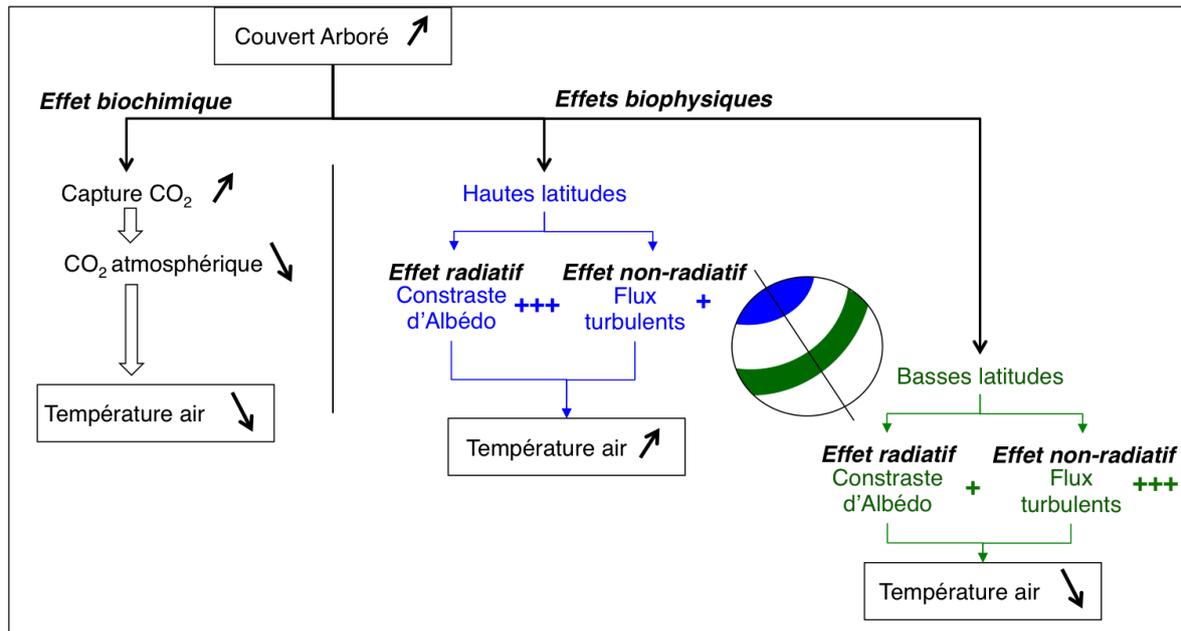


FIGURE 1.4 – *Effets théoriques sur la température de l'air lors d'une afforestation, à l'échelle de la moyenne annuelle. L'effet du CO₂ est identique, mais les effets radiatifs et non-radiatifs sont d'intensité différente (nombre de « + » sur le schéma) entre les hautes et les basses latitudes, de sorte que l'effet biophysique total sur la température peut être de signe différent. Lorsque l'effet radiatif l'emporte, alors l'effet biophysique total sur la température de l'air est positif (elle augmente), et inversement. Les moyennes latitudes ne sont pas représentées : les effets biophysiques radiatifs et non-radiatifs, combinés, sont à peu près équivalents à l'effet biochimique et le bilan net varie selon les études.*

biochimique de capture du carbone serait alors globalement refroidissant. Lequel de ces effets antagonistes pèserait-il donc le plus sur le bilan global d'un projet d'afforestation dans les hautes latitudes ? (Betts, 2000) propose une démonstration de cette compensation au moyen d'un calcul d'un bilan radiatif (sans rétroaction du climat sur la végétation). Il montre, à partir d'une hypothèse de remplacement des aires cultivées par de la forêt, que l'effet de l'albédo dans les hautes latitudes est réchauffant, et ce dans un ordre de grandeur tel qu'il l'emporte sur l'effet biochimique de refroidissement par capture du carbone atmosphérique.

Dans les latitudes tropicales, en revanche, le raisonnement théorique prédit des effets biochimiques et biophysiques concordant dans le sens d'un refroidissement globalement induit par l'afforestation. En effet, le contraste d'albédo entre le sol nu ou herbacé, d'une part, et le couvert arboré, d'autre part, est moins important que sous les latitudes boréales, tandis que la quantité importante d'énergie disponible amplifie potentiellement les flux de chaleur latente. En conséquence, les effets biophysiques attendus d'une afforestation auraient une action globalement refroidissante, à l'instar de l'effet de la capture de carbone.

Dans les latitudes tempérées, l'effet biophysique net est proche de zéro, par compensation des effets radiatifs et non-radiatifs, de sorte que l'effet biochimique domine.

Les effets biophysiques et biochimiques devraient donc être pris en compte conjointement dans l'évaluation de projet. Cependant, les effets biophysiques sont souvent négligés

au profit d'un focus sur l'efficacité de la capture du carbone dans l'élaboration de politiques d'atténuation du réchauffement climatique (Jackson *et al.*, 2008).

Par ailleurs, nous n'avons abordé ici que les effets directs de la végétation sur le climat. Des rétroactions complexes sont en réalité en jeu, dont les effets nets sont difficiles, parfois impossibles à déterminer par la théorie. Des travaux ont montré que la persistance de la sécheresse au Sahel aujourd'hui pouvait être en partie expliquée par la réponse de la végétation à la diminution des précipitations, elles-mêmes engendrées par le défrichage des terres par l'homme (Wang et Eltahir, 2000; Zhang *et al.*, 2014).

► En théorie, des actions de déforestation/afforestation ont un impact potentiel sur le climat global. Cet effet est complexe et ses différentes composantes peuvent être antagonistes, de sorte que l'effet net induit est incertain.

1.2.1.4 Dimension temporelle

La prise en compte de la dimension temporelle vient encore compliquer ce bilan déjà complexe. A l'échelle annuelle, le contraste d'albedo sous les moyennes latitudes suit des fluctuations saisonnières liées aux cycles végétaux : le contraste est effectif au cours de la saison de croissance. Sous les hautes latitudes, le couvert de neige accentue fortement le contraste entre le sol et la végétation : l'effet radiatif domine donc en-dehors de la saison de croissance. Dans les deux cas, la présence d'un couvert arboré développé a un effet réchauffant, en comparaison du couvert du sol plus clair donc refroidissant. Sous les basses latitudes, en revanche, le couvert végétal sempervirent et dense des forêts tropicales n'offre pas ce contraste avec le sol plus clair, ce qui affaiblit l'effet réchauffant de la reforestation tout au long de l'année.

L'effet biochimique est quant à lui limité dans le temps : la perturbation de la concentration de l'atmosphère en CO₂ est atténuée selon une exponentielle (Gibbard *et al.* (2005) s'appuie sur Maier-Reimer et Hasselmann (1987)), sous l'effet de l'équilibrage entre la teneur en CO₂ de l'atmosphère et de l'océan. Au terme de 80 ans, selon ces auteurs, l'effet biochimique résiduel serait donc déjà ramené à l'ordre de grandeur de l'effet biophysique. Au-delà de 80 ans après la reforestation, l'effet biophysique deviendrait donc globalement dominant, dans le sens d'un réchauffement net.

1.2.2 La validation du raisonnement théorique par des expériences numériques

Les effets théoriques d'une modification du couvert arboré sur le climat ont été vérifiés par des expériences numériques au cours des deux dernières décennies. Différentes approches ont été adoptées : des expériences virtuelles en recourant à la modélisation numérique du climat et de la végétation, d'une part, des évaluations en milieu réel sur des programmes en cours sur le terrain, d'autre part. Les expériences de modélisation permettent une approche à l'échelle globale et dans des termes extrêmes : on peut, par exemple, tester une déforestation complète de la surface terrestre. Elles permettent de plus une évaluation exhaustive des effets potentiels et des critères pertinents, dans les limites de la faisabilité et de l'incertitude inhérente aux travaux de modélisation. **La majorité des travaux sur les interactions surface-atmosphère ont été réalisés par des expériences de modélisation (Nicholson, 2015).** La raison en est évidemment la

difficulté de séparer les différents effets par des expériences ou des observations en milieu réel, alors que la modélisation offre plus de flexibilité.

Les évaluations en milieu réel permettent d'obtenir des résultats réels, qui serviront à calibrer les modèles et à améliorer ainsi les prochaines simulations. Ces évaluations sont plus limitées, dans l'espace, le temps et pour le nombre de critères pouvant être traités.

Référence	Type d'expérience	Effets mesurés	Angle
Betts (1999)	végétation actuelle / désert	biophysiques	Déforestation
Kleidon <i>et al.</i> (2000)	forêt sempervirente globale / désert	biophysiques	Reforestation
Gibbard <i>et al.</i> (2005)	reforestation globale / végétation actuelle	biophysiques	Reforestation
	déforestation globale / végétation actuelle	biophysiques	Déforestation
Bala <i>et al.</i> (2007)	déforestation globale / prairies	biophysiques <i>et</i> biochimiques	Déforestation
Davin et de Noblet-Ducoudré (2010)	Toutes les aires forestées du globe sont remplacées par des prairies	biophysiques	Déforestation
Snyder <i>et al.</i> (2004)	Chaque biome est successivement remplacé par du sol nu	biophysiques	Déforestation
Devaraju <i>et al.</i> (2015)	Déforestation globale, boréale, tempérée ou tropicale	biophysiques	Déforestation

TABLE 1.1 – *Expériences numériques de déforestation/reforestation réalisées à grande échelle (globale ou régionale)*

1.2.2.1 Résultats d'expériences numériques de déforestation/reforestation à l'échelle globale

A la suite de l'expérience rapportée dans Betts (1999), qui avait démontré l'influence du couvert végétal sur l'état climatique actuel, d'autres expériences extrêmes ont comparé des planètes à la surface continentale entièrement recouverte de forêts, de prairies herbacées ou de désert. Ces expériences ont pour objectif d'encadrer l'amplitude de la réponse climatique possible à des déforestations ou reforestations de grande ampleur. Les expériences d'abord réalisées à l'échelle globale sont listées dans le tableau 1.1. La plupart d'entre elles (sauf une) ne concernent que les effets biophysiques. La problématique est abordée sous l'angle d'une *dé*-forestation ou d'une *re*-forestation (ou afforestation) de façon hétérogène entre les études, ce qui pourra prêter à confusion dans la suite. Le tableau 1.1 précise pour chaque étude sous quel angle elle est placée.

L'expérience de **Kleidon *et al.* (2000)**, de reforestation complète du globe en comparaison avec une terre recouverte de sol nul, conclut à un effet globalement refroidissant de la présence de forêt, en accord avec les résultats de Betts (1999). Le protocole expérimental de Kleidon *et al.* (2000) est analogue à celui de Betts (1999) : deux expériences de simulation sont comparées, l'une sans végétation à la surface terrestre, la seconde avec un couvert végétal. Contrairement à Betts (1999), cependant, l'expérience de Kleidon *et al.* (2000) explore l'effet d'un couvert végétal à son maximum de fonctionnement, et non celui observé aujourd'hui dans un système climat-végétation à l'équilibre. Ainsi l'expérience de planète « verte » de Kleidon *et al.* (2000) considère que les terres continentales sont entièrement recouvertes de forêt sempervirente, excepté dans les régions recouvertes de glace. **Les résultats montrent que l'évapotranspiration à la surface des continents est plus de trois fois supérieure à celle des continents désertiques, que les précipitations sont multipliées par deux, et enfin que la température de surface est plus basse de 8 K (en moyenne saisonnière), comme effet de l'augmentation du flux de chaleur latente.**

Une expérience voisine est rapportée par **Gibbard *et al.* (2005)**. Elle compare l'effet du remplacement total de la végétation actuelle par des herbacées, d'une part, ou par des arbres, d'autre part. L'objectif de Gibbard *et al.* (2005) est d'encadrer l'amplitude potentielle des changements de température induits par un changement d'usage des sols. **Les résultats obtenus montrent que l'effet biophysique d'une reforestation globale serait un réchauffement de +1.3 ° C, tandis que celui d'une déforestation globale serait un refroidissement de -0.4 ° C.**

En outre, Gibbard *et al.* (2005) réalise une comparaison des effets biophysiques et biochimiques entre eux et fournit une estimation d'un effet global net. Pour ce faire, l'ampleur des effets biophysiques évalués par l'expérience de Gibbard *et al.* (2005) est rapportée à une estimation des effets biochimiques potentiels de cette expérience, en appliquant un taux de 10 kg/m² de capture de carbone (à la suite de Betts (2000)) dans les zones reforestées. Il est ainsi estimé que **la reforestation, selon ce protocole, induirait un refroidissement de -3.5 ° C par effet de la capture du carbone.** C'est donc l'effet biochimique refroidissant qui l'emporte dans cette expérience de reforestation globale.

Ce bilan net des effets biophysiques et biochimiques est également estimé dans une

expérience rapportée par **Bala *et al.* (2007)**. Cette expérience virtuelle de déforestation globale est réalisée à l'aide du modèle couplé INCCA. Ce modèle prend en compte les interactions entre l'atmosphère, la végétation et l'océan. Dans cette étude, **l'effet biochimique réchauffant d'une déforestation est supplanté par les effets biophysiques**, de sorte que cette expérience de déforestation globale induit un refroidissement net de **-0.3 K**.

Davin et de Noblet-Ducoudré (2010) rapporte, enfin, une expérience virtuelle de déforestation globale voisine de l'expérience de déforestation de Gibbard *et al.* (2005), et en analyse les effets biophysiques. Le principe de l'expérience consiste à imposer un couvert forestier en tout point du globe (sauf dans les déserts et les zones englacées), puis à « déforester » globalement et à remplacer toutes les aires forestées par des prairies. L'effet global de cette déforestation est une diminution de la température moyenne du globe de **-1 K**, cohérent avec le résultat de Gibbard *et al.* (2005), quoique d'amplitude différente. Davin et de Noblet-Ducoudré (2010) va plus loin en analysant la sensibilité du système d'une part à l'effet de l'albedo (« effets radiatifs »), d'autre part à l'effet de l'efficacité évapotranspiratoire et de la rugosité de surface (« effets non radiatifs »). Ces effets varient selon la latitude : **sous les hautes latitudes, l'effet de l'albedo domine, tandis que les effets non-radiatifs l'emportent sous les tropiques.**

► Les expériences virtuelles confirment l'effet de la présence d'un couvert végétal de la surface continentale sur le climat global. Les effets biochimiques et biophysiques de la présence d'un couvert végétal sont potentiellement opposés, et un bilan net de l'impact climatique doit être évalué. Les différents effets biophysiques du couvert végétal terrestre sur le climat sont contrastés, potentiellement antagonistes.

1.2.2.2 Variations régionales des effets de la déforestation/reforestation dans les expériences numériques

L'effet biochimique de la reforestation/déforestation est toujours de même signe, refroidissant pour une reforestation par diminution de la concentration atmosphérique en CO₂ à l'échelle globale. Les effets biophysiques se manifestent davantage à l'échelle régionale (Bala *et al.*, 2007) et changent de signe selon la latitude. L'effet global net dépend alors de la compensation ou du renforcement de l'effet biochimique par les différents effets biophysiques.

Bilans contrastés selon les latitudes

Dans la suite de l'analyse de l'expérience déjà rapportée précédemment, Bala *et al.* (2007) conclut aux effets contrastés de la déforestation selon la latitude : **une afforestation tropicale aurait un effet positif sur le refroidissement du climat, tandis qu'entreprendre des projets de reforestation serait contreproductif en milieu boréal et neutre (ou marginalement bénéfique) dans les latitudes tempérées.**

De même, Davin et de Noblet-Ducoudré (2010) montre que le bilan biophysique net est celui d'un refroidissement sous les latitudes boréales et tempérées, où l'effet de l'albedo est prédominant, alors qu'il est celui d'un réchauffement net sous les latitudes tropicales.

Bilans contrastés selon les biomes

L'approche de **Snyder *et al.* (2004)** va plus loin, en distinguant non pas entre latitudes, mais entre types de couvert végétal (biome). L'expérience virtuelle est cette fois décomposée de manière à isoler les effets des différents biomes : tour à tour, chaque biome est entièrement remplacé par du sol nu, tandis que le reste du couvert végétal terrestre demeure dans son état actuel. Les effets spécifiques de la présence de chaque biome peuvent ainsi être étudiés séparément. Les résultats obtenus par Snyder *et al.* (2004) montrent des **effets concordant dans le sens d'un réchauffement induit par une déforestation tropicale, et d'un refroidissement induit par une déforestation boréale. Les effets de la déforestation en milieu tempéré sont opposés selon la saison.** Dans le cas des forêts tropicales, leur disparition voit ainsi l'effet de réchauffement dû à la diminution du flux de chaleur latente (et à l'augmentation de l'énergie à la surface qui en résulte) supplanter nettement l'effet refroidissant dû à l'augmentation de l'albedo (qui résulte en la diminution des radiations nettes absorbées). La température augmente alors de 1.2 ° C à 1.5 ° C dans les régions déforestées, durant le trimestre d'automne (septembre-octobre-novembre). Les précipitations annuelles sont réduites de 1.3 mm/jour (24%) dans les régions déforestées.

Effets délocalisés

Snyder *et al.* (2004) montre aussi l'effet de la présence (ou de l'absence) d'un biome parmi les six considérés dans l'étude (forêt tropicale, boreale et tempérée, savane, prairie et steppe, et tundra). Cet effet est non seulement d'amplitude différente selon que l'on regarde la région concernée par le biome ou l'ensemble du globe, mais encore que cet effet peut être de signe différent à l'échelle globale. Ceci est vérifié pour les précipitations : **alors que la déforestation a un effet systématiquement négatif sur les précipitations des aires déforestées, l'effet se révèle positif à l'échelle globale, hormis les régions concernées (ou nul dans le cas des forêts tempérées).** Cet effet est particulièrement marqué pour les forêts tropicales.

Devaraju *et al.* (2015) étudie les effets d'une déforestation de grande échelle (globale ou régionale) sur la position de l'ITCZ⁷ et ses implications sur les régions de mousson des hémisphères Nord et Sud. A partir d'expériences réalisées avec un modèle couplé atmosphère-surface, il démontre que **les précipitations dans les régions de mousson de la zone tropicale sont plus affectées par une déforestation globale ou extra-régionale (boréale ou tempérée) que par une déforestation locale (tropicale).** L'effet est une diminution des précipitations dans l'hémisphère Nord et une augmentation dans l'hémisphère Sud, induites par un déplacement vers le sud de l'ITCZ.

► Les expériences numériques confirment que la reforestation aurait un effet global net sur le climat réchauffant sous les latitudes boréales, refroidissant sous les latitudes tropicales. L'effet de la présence de la végétation sur le climat global dépend du type de couvert végétal (biome) concerné. Enfin l'effet de la présence d'un biome sur le climat est potentiellement délocalisé, tandis que certains effets sont plus sensibles localement.

7. *Intertropical Convergence Zone* (zone de convergence intertropicale)

→ Et dans le cas de la reforestation en milieu tropical semi-aride ? Les travaux de la littérature ne portent pas sur cette problématique en particulier. Les latitudes tropicales sont identifiées comme celles sous lesquelles les effets biochimiques et biophysiques de la reforestation convergent dans le sens d'un refroidissement climatique. Ce sont cependant les forêts tropicales *humides* qui sont considérées dans les expériences numériques et le cas des zones tropicales *semi-arides* devrait être nuancé : avec un couvert arboré saisonnier et des conditions limitées en eau, les effets radiatifs et non-radiatifs de la reforestation ne produisent pas les mêmes résultats que les forêts humides sempervirentes. Aucune étude de cette question n'est publiée à ma connaissance. Certains travaux récents démontrent cependant que, si la majeure partie du stockage de carbone par la biosphère terrestre est effectuée par les forêts tropicales, ce sont les écosystèmes semi-arides (savanes arborées et arbustives) qui en déterminent à la fois la tendance évolutive et la variabilité interannuelle (Ahlström *et al.*, 2015).

A l'échelle locale, en revanche, les milieux semi-arides sont plus spécifiquement étudiés, comme il est montré dans la section suivante.

1.3 Echelle locale : contraintes et évaluation sur le terrain des projets de reforestation

A l'échelle locale, la présence d'un couvert arboré a plusieurs effets sur le microclimat de surface : la température et l'humidité de l'air sont influencées par le couvert végétal. La fréquence des précipitations peut également être affectée. De tels effets peuvent avoir des conséquences positives sur les conditions de vie et de travail des populations dans les milieux tropicaux chauds et semi-arides. Pour cette raison, les impacts climatiques de la reforestation méritent d'être évalués à l'échelle locale. La gestion du couvert arboré a des répercussions sur la fertilité des agrosystèmes et sur les systèmes de production socio-économiques : le transfert des nutriments des arbres vers les cultures (qui peut être encore accentué par la pratique du paillage, par exemple) peut faire des arbres des « îlots de fertilité » et favoriser l'augmentation des rendements agricoles. Ces effets locaux, souvent très divers, relèvent du champ des « services écosystémiques ». D'autres effets bénéfiques de l'afforestation ou reforestation en milieu semi-aride sont ainsi attestés, par exemple sur la fertilité du sol (Fernández-Ondoño *et al.*, 2010) et sur la qualité des sols (Mao et Zeng, 2010).

Envisagée dans la double perspective locale et globale, comme expliqué en début de chapitre, la réussite des projets de reforestation entrepris localement porte deux enjeux : satisfaire les objectifs locaux et rendre possible la poursuite des objectifs globaux.

1.3.1 Différents types d'évaluation en milieu réel

Alors que les expériences numériques sont souvent construites selon des protocoles similaires, le panorama des évaluations réalisées à partir d'expériences réelles de reforestation est beaucoup plus hétérogène. Les évaluations conduites sur ces dernières consistent en des mesures sur le terrain de critères accessibles : biomasse, humidité du sol, fertilité du sol et température de l'air en surface principalement. Les autres critères d'évaluation portent sur des services écosystémiques, les revenus économiques et des critères spécifiques au contexte de reforestation : il peut s'agir par exemple du rendement agricole dans le cas de projets d'agroforesterie. Par définition, les évaluations de projet sont soit :

- normalisées : l'état du site reforesté est comparé à des valeurs génériques, quantitativement significatives à l'échelle globale, par exemple une valeur totale de carbone stocké ;
- *ex-post* : elles comparent les conditions du site nouvellement reforesté avec celles du même site dans son état précédent, par exemple en termes de changement de la biomasse produite ou de la fertilité du sol ;
- avec-sans : elles comparent les conditions de la zone reforestée avec les conditions d'une zone voisine abritant un couvert différent, par exemple pour la température de l'air ou le taux de piégeage du carbone.

Les effets les plus couramment évalués sont ceux portant sur la fixation du carbone : d'une part, c'est celui permettant d'opérer un lien direct avec la température globale et de démontrer une efficacité réelle sur la lutte contre le changement climatique, d'autre part, cet effet est monnayable et justifie la subvention de programmes d'afforestation ou reforestation. Deux types de mesure sont alors réalisés : celle du stock de carbone

effectivement constitué (la biomasse sur pied) et celle du taux de piégeage du carbone (le gain net de carbone par an).

1.3.2 Résultats d'évaluations en milieu réel : le stock de carbone organique du sol

Le critère le plus fréquemment mesuré dans la littérature est la teneur du sol en carbone organique. La déforestation pour la mise en culture des terres serait responsable d'une perte de 20 à 40% du stock de carbone organique du sol en moyenne globale selon Laganier *et al.* (2010). Lors d'une reforestation, tant l'augmentation des entrées de carbone organique, que la diminution des pertes, et que les mécanismes de rétention du carbone dans le sol, contribuent à restaurer le carbone organique du sol. Il faut 40 ans ou plus pour atteindre un nouvel équilibre après reforestation, selon Guo et Gifford (2002).

Or de ce critère dépend une série de bénéfices associés. Ainsi, Lal (2010) identifie au moins 5 services écosystémiques liés au carbone organique du sol :

- augmentation de la capacité de rétention d'eau du sol ;
- amélioration de l'alimentation des plantes en nutriments ;
- restauration de la structure des sols ;
- minimisation des risques d'érosion du sol ;
- augmentation des rendements des plantes cultivées.

La réponse des plantes à la teneur du sol en carbone organique dépend de nombreux paramètres, et toutes les variations de ce paramètre n'ont pas le même impact : les régions aux sols les plus pauvres en carbone organique, souvent les régions semi-arides, seront les plus sensibles à la moindre augmentation. D'autre part, **l'évolution de la teneur du sol en carbone organique constitue une estimation indirecte du piégeage du carbone atmosphérique.**

Trois méta-analyses en particulier (Guo et Gifford, 2002; Laganier *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2013) évaluent le taux moyen de piégeage en fonction de différentes modalités de reforestation. Trois facteurs déterminants sont mis en évidence : le précédent couvert avant reforestation, l'essence arborée replantée et le niveau d'aridité du milieu reforesté.

Effet du précédent cultural

Les trois méta-analyses s'accordent à conclure que la reforestation a un effet positif sur l'augmentation de la teneur du sol en carbone organique lorsqu'elle est entreprise sur des terres auparavant nues. Les conclusions divergent, en revanche, lorsque le précédent couvert est un pâturage : alors que le stock de carbone diminue d'après les résultats de Guo et Gifford (2002), il augmente d'après les résultats de Zhang *et al.* (2013). L'explication de cette divergence en serait que le stock de carbone organique du sol, non négligeable sous un pâturage, diminuerait fortement en début de reforestation, alors que les terres ne sont plus pâturées, et que le nouveau couvert végétal, jeune, ne compense pas encore cette perte. Dans le cas de Zhang *et al.* (2013), les modalités de reforestation sont différentes en ce qu'elles conservent les taillis sous couvert arborés, qui contribuent au stock de carbone organique du sol.

Effet de l'essence replantée

En ce qui concerne l'influence du type d'arbre replanté, Guo et Gifford (2002) montre que les conifères seraient moins efficaces que les feuillus pour restaurer le stock de carbone organique du sol. En outre, parmi les feuillus, les légumineuses seraient encore plus efficaces à induire une augmentation du carbone organique du sol. Zhang *et al.* (2013), en revanche, ne relève aucune différence dans l'accumulation de carbone organique du sol entre les types de plantes (conifères, feuillus et arbustes).

Effet du niveau d'aridité

Selon Zhang *et al.* (2013), il est possible que cette divergence entre ces travaux provienne du caractère aride ou semi-aride des sites de la dernière analyse. En effet, pour des précipitations moyennes annuelles inférieures à 2000 mm, les résultats de Guo et Gifford (2002) ne montrent pas d'effet du passage de forêt à pâture sur le carbone du sol. Zhang *et al.* (2013) propose alors d'expliquer cette divergence par la pauvreté en carbone organique de ces sols recevant moins de précipitations : le niveau de carbone organique du sol étant très bas, voire quasi-nul, avant afforestation, l'ampleur du changement est décuplée, même dans l'hypothèse d'une introduction de biomasse égale à celle d'une afforestation en milieu humide ou subhumide.

En effet, les conditions d'aridité influent nettement sur l'augmentation du stock de carbone organique du sol après reforestation : le taux d'accumulation diminue quand les précipitations augmentent. Cependant les forêts sont plus difficiles à implanter dans des régions recevant moins de 250 mm de pluie par an, de sorte que la zone d'impact maximum serait comprise entre 250 et 400 mm, toujours selon Zhang *et al.* (2013). En termes de températures annuelles moyennes, c'est entre 7.5 °C et 15 °C que le taux d'accumulation augmente le plus. Dans le cas de températures élevées, plus de carbone organique est en effet introduit dans le sol, mais l'activité microbienne est aussi plus intense et la matière organique est rapidement décomposée. Par conséquent, l'afforestation en zones tempérées aurait un effet positif plus important sur la séquestration du carbone (Lal, 2005).

1.3.3 Analyse d'impact d'une forêt en milieu semi-aride chaud

Des travaux approfondis en milieu semi-aride ont été entrepris en Israël dans la forêt du Yatir : implantée dans les années 1960, celle-ci constitue aujourd'hui un terrain privilégié pour l'évaluation des effets d'une reforestation en milieu semi-aride.

Rotenberg et Yakir (2010) compare les effets contrastés du fonctionnement de cette forêt implantée en zone semi-aride sur le climat : le forçage radiatif a un effet localement réchauffant, tandis qu'à plus long terme la séquestration du carbone a un effet globalement refroidissant. Selon l'estimation de ces auteurs, un effet refroidissant net pourrait être atteint à partir de 80 ans après reforestation. A l'échelle locale, ils rapportent une diminution de 5 °C de la température de surface sous canopée, par comparaison avec le taillis adjacent, cette diminution de température pouvant atteindre -30 °C à midi en été (l'amplitude de température entre le jour et la nuit est très importante dans ce contexte). Ils qualifient le fonctionnement de cette forêt de « homéostatique » : du fait de l'albédo plus sombre de la forêt semi-aride, le rayonnement net incident est plus élevé au niveau de la forêt que dans les régions voisines non forestées (+35% par rapport au Sahara) ce qui, dans le contexte d'un environnement particulièrement sec, produit un flux de chaleur sensible très élevé (+30% par rapport au Sahara). Par ailleurs, du fait du manque d'eau, le flux

de chaleur latente est presque annulé, et la forêt est dès lors assimilée à un « convecteur ». Comme enfin la forêt semi-aride est peu dense, le couplage canopée-atmosphère est important. Bien sûr, cette évaluation comporte de nombreuses simplifications, critiquables (Lee, 2010; Leu, 2010), mais elle permet néanmoins d’amorcer l’alimentation des expériences de modélisation avec des observations de terrain (à une échelle plus compatible avec l’usage de modèle globaux).

► Les résultats en milieu réel valident l’efficacité du piégeage du carbone par la reforestation, mais révèlent également l’influence des modalités de cette reforestation. Plus rares, les évaluations microclimatologiques démontrent un effet positif (du point de vue des conditions de vie) des conditions sous couvert arboré.

1.3.4 L’évaluation des services écosystémiques, souvent qualitative, dans des projets de développement rural

L’estimation de la fixation du carbone figure le plus souvent dans les évaluations de projets. En revanche, les autres critères ne sont pas évalués systématiquement : ils ne constituent pas un enjeu universel, comme la diminution des gaz à effet de serre, ils dépendent des problématiques locales, enfin ils peuvent être techniquement plus difficiles à mesurer. Les différences de température sous couvert font l’objet de mesures ponctuelles, dans des évaluations avec-sans. Quelques critères, cependant, sont plus fréquemment pris en compte. Les évaluations de production de biomasse et de fertilité des sols sont le plus souvent incluses dans des évaluations plus larges de projets entrepris avec des objectifs de développement local (régional), qui ne sont pas des projets de reforestation *per se*. Les critères mesurés dépendront alors des problématiques. En terme de biomasse produite, par exemple, il pourra s’agir de la matière sèche, d’un fourrage récolté, ou d’une biomasse totale incluant arbres et herbacées. Par ailleurs, ces effets sont souvent estimés en termes qualitatifs plutôt que quantitatifs.

Sendzimir *et al.* (2011) conceptualise le système complexe des effets induits par des projets de reforestation au Sahel. Nous reproduisons ci-dessous la figure 5 de cet article, qui met en évidence les relations entre composantes biophysiques et socio-politiques du système socio-écologique à l’échelle champ-village.

Ce schéma permet de positionner les variables climatiques parmi les autres composantes de ce réseau complexe d’interactions. Ces variables climatiques occupent ainsi :

- le sous-système **microclimat** du champ : évapotranspiration, vitesse du vent, température de l’air au champ ;
- une partie du sous-système **qualité environnementale** : humidité du sol, fertilité du sol, abri foliaire ;
- à l’intersection entre ces deux sous-systèmes : l’érosion du sol et le soulèvement de poussières ;
- enfin une partie du sous-système de **gestion des parcelles arborées** est également concerné : certaines variables climatiques (précipitations locales, durée et intensité des périodes sèches) conditionnent la densité d’arbres.

La suite de cet article montre comment le microclimat du champ arboré, la « qualité environnementale » et la densité d’arbres interviennent dans le système d’économie des

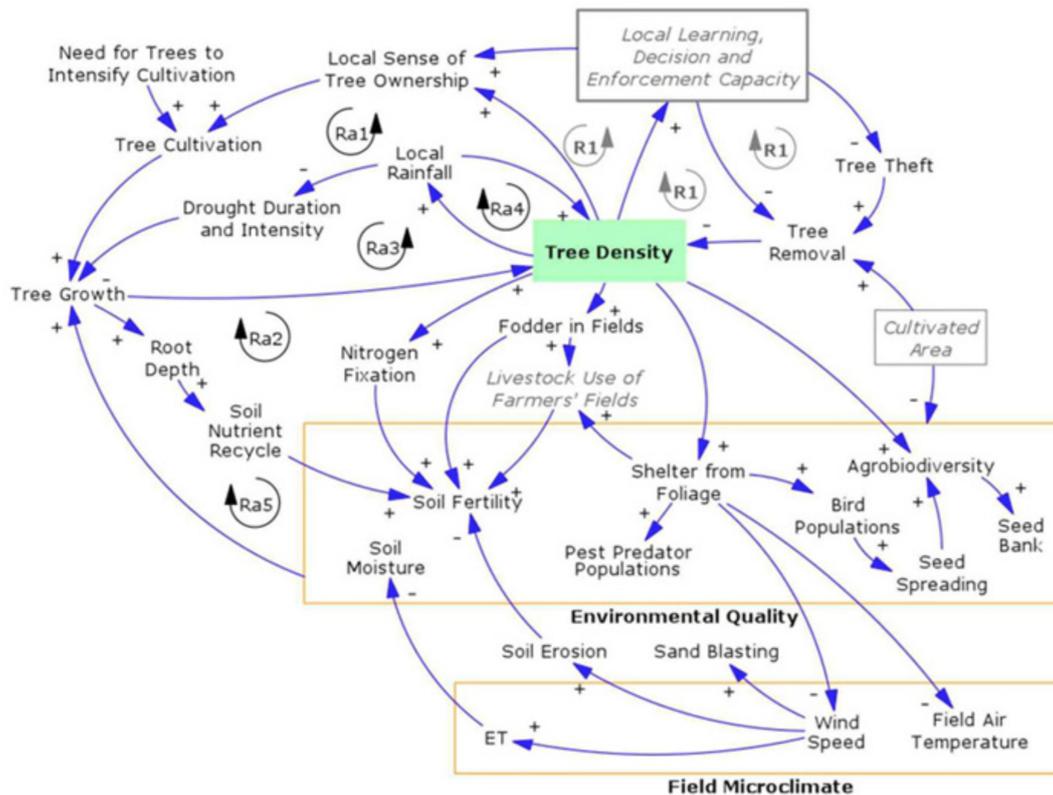


FIGURE 1.5 – *Extrait de Sendzimir et al. (2011) (figure 5) : Relations entre composantes biophysiques et socio-politiques du système socio-écologique à l'échelle champ-village, telles qu'analysées dans le cadre d'une expérience de reverdissement dans la région de Maradi/Zinder (au Sahel), dans les années 1980. La densité arborée (Tree Density) est au coeur des interactions (flèches bleues) entre les différentes composantes du système. Les boucles de rétroaction (impliquant un enchaînement circulaire d'actions) qui renforcent la direction des changements subis par les variables concernées sont notées « R » sur le schéma (Ra1, R1, etc. permettent de discuter séparément des différentes boucles dans l'article). Par exemple, l'effet positif observé de l'augmentation de la densité arborée sur l'augmentation des précipitations locales induit une rétroaction positive sur la densité arborée (Ra4).*

ménages agricoles, à l'échelle champ-commune. Enfin la densité d'arbres, l'abri sous couvert et la disponibilité de fourrage sont mis en relation avec l'activité d'élevage, à l'échelle locale-régionale. Les arbres et l'environnement sont enfin une variable à effet directe sur l'image du Sahel à l'échelle régionale-internationale, et est elle-même influencée par le marché agricole, qui détermine l'aire cultivée.

► Les projets d'af- ou re-forestation s'inscrivent dans des contextes locaux. Les objectifs de ces projets forment partie de systèmes complexes mettant en relation objectifs et contraintes relevant de divers domaines (socio-économiques et environnementaux).

Les nombreux projets de reforestation entrepris dans le monde ont rencontré succès et échecs, qui ont permis d'identifier les deux facteurs déterminants du succès : l'implication des populations locales et la diversification des ressources (Epule *et al.*, 2013). La plantation est considérée comme un succès si l'arbre atteint l'âge de la récolte ou est durablement établi.

Les résultats des différentes études d'impact de la reforestation sur les services éco-systémiques diffèrent largement, voire s'opposent entre eux. La première explication en est l'impossibilité de réaliser des analyses complètes, étant donné la complexité du système étudié : les analyses de terrain sont éparses et ne suivent pas de protocole standardisé, les expériences de modélisation sont par définition excessivement réductrices, enfin le fonctionnement de ce système complexe est loin d'avoir été élucidé. D'autre part, l'intérêt est porté sur la reforestation de ces zones par les agents de développement des milieux économiquement pauvres : c'est l'aspect socio-économique qui motive, même s'il est indéfectiblement lié aux conditions écologiques. C'est pourquoi également les projets de reforestation prennent souvent la forme de projet d'agroforesterie dans les milieux semi-arides (Ffolliott *et al.*, 1995).

Dans le paragraphe suivant, nous rapportons les conclusions de deux études portant sur des projets de reforestation en zone semi-aride sahélo-soudanienne.

Fadl et Sheikh (2010) étudie la performance de systèmes agro-forestiers associant sur une même parcelle un arbre (*Acacia senegal*) exploité pour la gomme arabique et une culture (arachide, sésame ou hibiscus). L'hypothèse est que la performance totale de l'arbre et d'une culture cultivés en association est supérieure à celle de la somme des mêmes plantes conduites séparément. Le dispositif expérimental en milieu réel permet de comparer les performances de chaque culture soit seule, soit en association avec l'arbre. Une parcelle témoin est occupée uniquement par *Acacia senegal*. Les performances sont évaluées en termes de rendement des cultures, de production totale de biomasse, de propriétés physico-chimiques et de contenu en eau du sol. Un indicateur intégré, le « *land equivalent ratio* » (LER), est utilisé pour évaluer la performance totale du système comparée à celle des cultures séparées. Fondé sur le principe que l'association de deux cultures peut générer une production totale supérieure à la somme des productions des cultures conduites sur des terres séparées, le LER est calculé comme la somme sur l'ensemble des cultures présentes des rapports de rendement de chaque culture lorsqu'elle est en association ou seule (témoin). Cet indicateur démontre dans les trois cas testés une **performance et des revenus économiques supérieurs lorsque les cultures sont associées à l'arbre.**

L'agroforesterie dans les milieux tropicaux semi-arides fait l'objet de nombreux projets dont les résultats ont un caractère quantitatif, comme dans le cas précédent, mais aussi qualitatif, comme par exemple l'étude de **Tougiani *et al.* (2009)**. Elle rapporte

une expérience de reforestation à l'échelle régionale, au Niger, par « régénération naturelle assistée par les paysans » (pratiquée, en 2007, sur 5 à 6 millions d'hectares au Niger, dont 50% de surfaces en cultures). La gestion des arbres par les paysans sur leurs propres terres dépend de la variabilité climatique et de leurs objectifs : réduire la densité des arbres et/ou pratiquer des tailles sévères permet de maintenir des rendements agricoles élevés, tout en conservant la réserve de capital que constituent les arbres ; la densité peut être plus élevée au moment de l'installation d'une culture annuelle, en protection contre le vent, puis réduite ; une récolte de bois tous les 2-3 ans est indiquée pour l'exploitation du bois de chauffe, tandis qu'elle est de 3-4 ans pour la production de bois d'œuvre ; certains arbres procurent un fourrage riche en protéines. La réussite de ces projets agroforestiers est validée par l'implication et l'autonomie des paysans, qui entretiennent eux-mêmes les peuplements arborés et les gèrent en fonction de leurs besoins et des circonstances climatiques et économiques : **le retour progressif des arbres par l'action des paysans constitue la preuve par l'usage de leur intérêt.**

► Les systèmes agroforestiers constituent une forme de reforestation performante dans les milieux tropicaux semi-arides. Ils sont évalués en fonction des besoins locaux. Leur adoption par les paysans valide leur adéquation aux enjeux locaux, et permettra leur durabilité à long terme.

→ La reforestation dans les milieux tropicaux semi-arides est limitée par le manque de ressource en eau. L'évaluation de projets aboutis sur le terrain a cependant démontré leur performance pour la séquestration du carbone et pour la diminution de la température sous couvert. Ces projets prennent souvent la forme de systèmes agroforestiers dont la performance et la rentabilité sont avérées. Enfin l'adoption par les populations locales de ces systèmes de production incluant les arbres constitue la preuve par l'usage de la viabilité de ces systèmes.

Ces études de terrain ne prennent pas en compte, cependant, la perspective du changement climatique, qui conditionne pourtant la durabilité de tels projets.

Bilan : Impacts connus de la reforestation selon les différentes échelles spatiales

Les éléments de connaissance scientifique rassemblés dans ce chapitre apportent une réponse riche mais incomplète à la question des impacts de projets de reforestation dans les régions tropicales semi-arides. La figure 1.6 rappelle et poursuit la figure 1.1 pour illustrer ces connaissances selon la dimension spatiale.

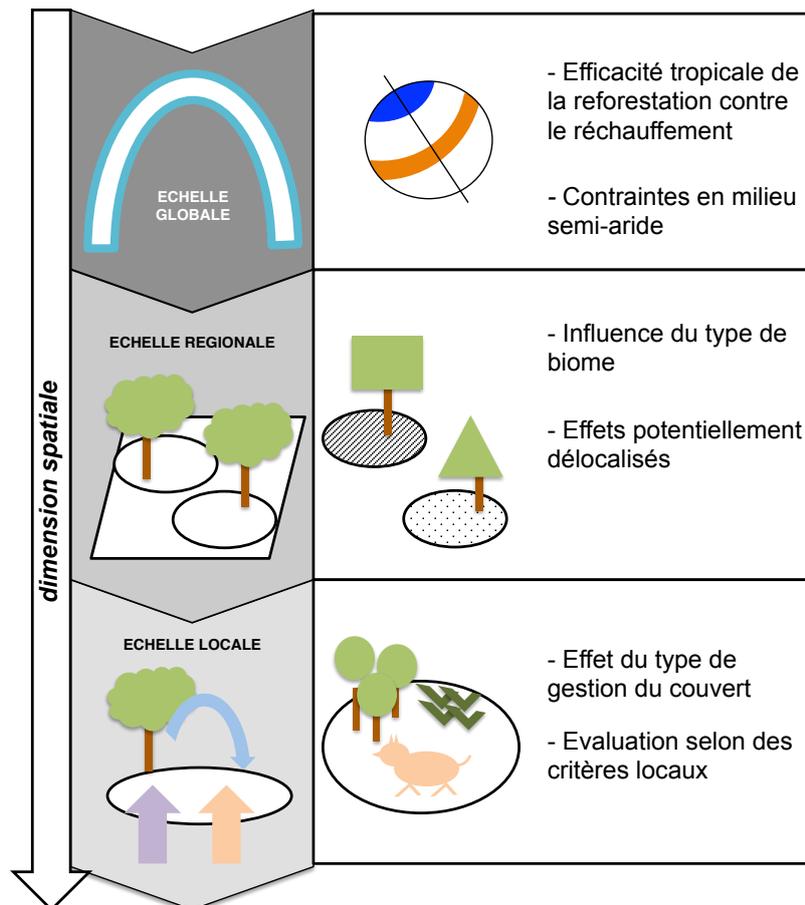


FIGURE 1.6 – *Principaux éléments de connaissance scientifique sur les impacts de projets de reforestation selon l'échelle spatiale.* Cette figure est à rapprocher de la figure 1.1 : la partie gauche reprend les deux niveaux de la dimension spatiale (global et local) et insère au milieu l'échelle régionale, favorisée pour la mise en oeuvre des programmes de reforestation. A l'échelle régionale, plusieurs unités locales sont rassemblées. Dans la partie droite sont indiqués les principaux éléments de connaissance rassemblés à partir de la littérature.

1.4 La perspective du changement climatique : aborder la problématique dans un paysage bioclimatique en transition

Les actions *durables* dans un climat stable risquent de se révéler inadéquates dans la perspective du changement climatique. C'est pourquoi l'adaptation au changement climatique doit être intégrée dans les projets de développement en cours dès aujourd'hui, pour en assurer la durabilité à moyen et long terme (par exemple Ayers et Huq (2009); Agrawal et Lemos (2015)).

1.4.1 La modélisation du climat futur

Aujourd'hui, l'anticipation du changement climatique repose entièrement sur les projections réalisées au moyen de modèles numériques permettant de simuler le fonctionnement du « système terre ». Les résultats de la recherche internationale sont synthétisés périodiquement dans le cadre du GIEC. Ce sont ces résultats synthétisés qui servent de référence tant pour les décideurs politiques que pour les acteurs de la société civile amenés à prendre en compte l'évolution des conditions climatiques dans la planification stratégique.

Les projections climatiques décrivant les conditions potentielles futures, d'après différents scénarios, sont produites par les modèles de circulation générale (GCM, *General Circulation Model*). Ils comprennent trois composantes qui interagissent entre elles : l'atmosphère, l'océan et la surface terrestre. Trente instituts de par le monde ont impliqué leurs GCM dans la cinquième phase du projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP5, *Coupled Model Intercomparison Project*) entre 2010 et 2014, dont les résultats ont servi à l'élaboration du cinquième rapport du GIEC.

Le protocole CMIP5 inclut la réalisation de simulations du climat passé et de projections climatiques futures selon différents scénarios à court (horizon 2035) et long terme (horizon 2100 et au-delà).

1.4.2 Les scénarios climatiques futurs

Les scénarios futurs, appelés RCP (*Representative Concentration Pathways*), représentent différentes trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre durant le 21^e siècle. Les quatre RCP sont désignés par la valeur du forçage radiatif atteint à l'horizon 2100 par rapport aux valeurs pré-industrielles : +8.5 W/m², +6 W/m², +4.5 W/m² et +2.6 W/m² respectivement pour les RCP 8.5, 6.0, 4.5 et 2.6. Par rapport aux précédentes générations de scénarios (Leggett *et al.*, 1992; Nakicenovic *et al.*, 2000), celle-ci présente l'originalité de prendre en compte l'impact des différentes politiques internationales d'atténuation du changement climatique de manière explicite (Moss *et al.*, 2010). « Représentatifs » de l'ensemble des scénarios référencés dans la littérature, les quatre RCP ont été sélectionnés vers les positions extrêmes et intermédiaires de cet ensemble (Van Vuuren *et al.*, 2011).

Les GCM utilisent les séries temporelles de la concentration future en gaz à effet de serre. La particularité de ces RCP est qu'ils ne sont pas exprimés directement en *émissions* : les trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre et les scénarios socio-économiques correspondant font l'objet d'un travail parallèle à l'aide de modèles spécialisés (IAM, *Integrated Assessment Models*). Ceux-ci explorent différentes hypothèses technologiques,

socio-économiques et politiques conduisant à ces trajectoires de concentrations (Van Vuuren *et al.*, 2011). Grâce aux nouvelles technologies de capture et de stockage des gaz à effet de serre, tous les scénarios projettent une augmentation de consommation d'énergies fossiles en 2100 par rapport à 2000. L'utilisation des sols fait partie intégrante de ces scénarios RCP.

- RCP 8.5 : la concentration de gaz à effet de serre continue à augmenter suivant la même tendance qu'au début du 21^e siècle (Riahi *et al.*, 2007) ;
- RCP 6.0 : le forçage radiatif est stabilisé à l'horizon 2100 par la mise en oeuvre d'un ensemble de technologies et de stratégies permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre (Fujino *et al.*, 2006; Hijioka *et al.*, 2008) ;
- RCP 4.5 : le forçage radiatif est stabilisé à l'horizon 2100 (Clarke *et al.*, 2007; Wise *et al.*, 2009) ;
- RCP 2.6 : le forçage radiatif atteint un pic au milieu du 21^e siècle puis *diminue* jusqu'à 2100 (Van Vuuren *et al.*, 2011).

Ces résultats de simulation du climat futur peuvent être utilisés de différentes façons. Il est possible de les utiliser directement pour décrire le climat futur. Pour aborder l'échelle locale, ces sorties climatiques alimentent des modèles de climat régionaux spécifiquement adaptés à des résolutions plus fines et prenant en considération des paramètres de surface plus détaillés. Enfin d'autres types de modèles peuvent être alimentés par ces données climatiques (globales ou régionales) :

- les modèles d'impact, spécifiquement dédiés à explorer les effets du climat sur des variables d'importance stratégique pour la biosphère (effets écologiques et, en dernière instance, anthropiques) ;
- les modèles non climatiques, relevant de tout autres domaines, comme l'agriculture : les rendements agricoles projetés dans le futur doivent tenir compte de l'évolution des conditions climatiques. L'intégration des contraintes liées à l'incertitude sur les projections des conditions climatiques futures posent des questions nouvelles aux auteurs de ces travaux, qui doivent adapter leur méthodes de travail à ces contraintes extérieures.

En outre, les modules spécifiques des composantes du système terre peuvent être utilisés séparément pour approfondir les recherches sur des aspects particuliers de ces sous-systèmes. En effet, ces modèles sont intégrés dans les simulations couplées des modèles de circulation générale, mais ces simulations globales ne comprennent qu'une partie - un instantané - des configurations possibles de ces modèles. La recherche sur la modélisation du système terre est en progrès constant, et les simulations globales de référence sont toujours « en retard » de 4 ou 5 ans sur les dernières avancées. Les différentes composantes de ces modèles couplés complets font donc parallèlement l'objet de travaux spécifiques.

1.4.3 La gestion de l'incertitude par une approche multi-modèle

La recherche portant sur le climat futur est par nature incertaine.

La première source d'incertitude est celle portant sur la trajectoire socio-économique des prochaines décennies : en particulier, l'évolution des émissions de gaz à effet de serre (mais ce n'est pas le seul critère) influencera fortement la trajectoire climatique. Pour

encadrer cette incertitude, les projections climatiques sont réalisées pour un ensemble de scénarios socio-économiques censés encadrer l'ensemble des trajectoires envisageables.

La seconde source d'incertitude porte sur la sensibilité des GCMs à un forçage radiatif et sur leur performance : ceux-ci, comme tout modèle, sont inévitablement imparfaits. L'approche choisie pour gérer cette incertitude est d'encadrer l'ensemble des réponses par l'utilisation non pas d'un mais de plusieurs modèles. L'idée est que les performances et les défaillances des modèles ne seront pas les mêmes et qu'au sein d'un ensemble de modèles les premières se complèteront tandis que les secondes se compenseront. Bien sûr, l'incertitude demeure, mais elle est au moins mesurée en partie et on a une idée de son amplitude.

Par ailleurs, l'approche multi-modèle permet d'harmoniser le développement parallèle de tous les modèles, et de permettre l'exercice de comparaison internationale périodique. Cette approche comporte également des risques, risque de consanguinité de modèles qui finissent par perdre de leur indépendance.

→ Dans la suite de ce travail, le traitement des projections climatiques futures fera l'objet d'une approche multi-modèle et multi-scénario pour encadrer, dans la mesure du possible, l'incertitude.

► Dans ce manuscrit, la problématique de la reforestation en région tropicale semi-aride est focalisée sur la question de la faisabilité de tels projets dans le contexte du changement climatique. En effet, les connaissances rassemblées sur leurs impacts relèvent de la dimension spatiale et prennent en compte la dimension temporelle liée au changement climatique surtout comme appel d'urgence à déployer des mesures d'atténuation, entre autre via la reforestation. La perspective d'une aridification de régions déjà sèches interroge cependant la pertinence de reforester dans des régions déjà peu propices au maintien d'un couvert forestier.

L'approche proposée dans la suite se positionne dans le cadre de la recherche sur les effets du changement climatique selon différents scénarios futurs. Elle s'inspire également des points-clés relevés au cours de cette revue des connaissances scientifiques : la nécessité de prendre en compte différentes échelles spatiales et la perspective d'une intégration des résultats sur la reforestation dans une évaluation multi-critère des impacts. Elle s'efforce enfin d'occuper une interface entre la recherche scientifique fondamentale, utilisant ici des modèles de climat, et la recherche appliquée au développement local, plus proche du terrain.

1.5 Résumé du chapitre 1

En résumé, les travaux scientifiques ont démontré que la présence et la nature d'un couvert arboré à la surface terrestre influençait significativement les conditions atmosphériques, au point qu'un changement important du couvert terrestre pouvait modifier le climat global. Les impacts d'un changement majeur du couvert végétal, en particulier lors d'une déforestation ou d'une afforestation de grande ampleur, sont induits par différents mécanismes, dont le sens peut diverger. Ainsi, si l'effet de capture du carbone atmosphérique par l'implantation d'un couvert forestier joue toujours dans le sens d'un refroidissement climatique global, d'autres effets physiques de l'afforestation peuvent induire un réchauffement atmosphérique venant tempérer l'effet carbone. Le refroidissement climatique par capture du carbone étant par ailleurs amorti dans le temps (par les interactions océan-atmosphère), un projet d'afforestation pourrait avoir un effet net à long terme globalement réchauffant. Or ce n'est pas ce que l'on recherche dans le cas d'un projet de reforestation comme mesure d'atténuation du réchauffement climatique. De ce point de vue, la théorie et les expériences scientifiques démontrent que de tels projets ont plus de chances de réussite sous les latitudes tropicales, où effets biochimiques et biophysiques convergent dans le sens d'un refroidissement climatique global.

Cependant, le retour d'expérience de programmes de reforestation mis en oeuvre au cours du 20^e siècle nous enseigne que le succès et la durabilité de ces programmes reposent sur leur adéquation avec les enjeux et les contraintes locaux. Il est donc nécessaire d'envisager conjointement les enjeux, contraintes et modalités des actions de reforestation aux échelles globale et locale. A l'échelle locale, les projets de reforestation tropicaux sont le plus souvent entrepris dans des contextes de projets de développement rural, où l'un des enjeux majeurs est l'atténuation de la pauvreté et l'amélioration des conditions de vie des ménages. Les projets rencontrant le plus de succès sont des projets d'agroforesterie.

D'autre part, les régions tropicales manifestant le plus fort besoin de programmes de développement sont les régions identifiées comme arides et semi-arides. Dans ces milieux, la reforestation (le plus souvent sous la forme de développement de l'agroforesterie) a pour objectif de diversifier les ressources locales, de restaurer la fertilité des sols cultivés et d'améliorer les conditions microclimatiques de température et d'humidité. Ces régions sont en outre reconnues pour leur fort potentiel de séquestration de carbone atmosphérique. La reforestation dans les zones tropicales semi-arides est ainsi porteuse d'effets bénéfiques tant globalement que localement. Cependant, l'implantation d'un couvert arboré dans des conditions semi-arides pourrait n'être pas soutenable à long terme. En effet, l'identification de conditions « semi-arides » sur le terrain ne recouvre pas exactement l'enveloppe *climatiquement semi-aride* : celle-ci impose une limitation de la ressource en eau qui n'est pas aussi importante dans les régions dont les déterminants du caractère semi-aride sont plutôt écologiques ou anthropiques. Dans le contexte *climatiquement semi-aride*, l'implantation d'un couvert arboré trop dense pourrait avoir finalement des effets opposés à ceux recherchés.

Enfin, nous ne pouvons pas ignorer que le climat est actuellement en pleine transition vers un réchauffement global au cours des décennies à venir. Dans ce contexte, et alors qu'un processus de désertification est déjà observé sur le terrain, on s'attend à assister à une expansion des zones semi-arides. Les conséquences en sont doubles pour les projets de reforestation : leur besoin en qualité de mesure d'adaptation à des conditions allant en empirant se fera de plus en plus sentir, d'une part, tandis que le maintien des couverts

forestiers dans ces régions sera de plus en plus compromis, d'autre part.

Dans la suite de ce travail, la problématique de la reforestation en région tropicale semi-aride est focalisée sur la question de la faisabilité de tels projets dans le contexte du changement climatique.

Evolution du domaine tropical semi-aride du 20^e au 21^e siècle

L'objectif poursuivi dans ce chapitre est de dessiner le paysage semi-aride futur et d'anticiper sur la transformation (progressive) de régions vers des conditions tropicales semi-arides dans le futur, dont il faudra tenir compte pour les stratégies de reforestation.

Nous prenons d'abord le temps d'explicitier le choix fait ici de l'approche « bioclimatique » et de la classification climatique retenue. En effet, dans l'objectif qui est le nôtre de produire des résultats utilisables pour l'application pratique, la pertinence climatique mais peut-être aussi écologique, la simplicité et l'ergonomie des outils employés sont des critères importants.

La question de l'évolution de la distribution des enveloppes climatiques dans le futur constitue une question de recherche actuelle. Certains travaux présentés dans la suite ont donc été publiés alors que ce travail de thèse était en cours.

2.1 Choix de l'approche

2.1.1 Les différentes classifications climatiques

Différentes approches sont décrites dans cette section. La première est conçue pour étudier spécifiquement les niveaux d'aridité, tandis que les suivantes sont fondées sur la notion plus complexe de classe climatique.

L'approche strictement climatique

Une approche purement climatique de la caractérisation des régions semi-arides consiste à identifier celles-ci en recourant à un gradient de rapport entre précipitations (P) et demande évaporative (évaporation potentielle, EP) : l'aridité est d'autant plus forte que ce rapport P/EP est faible. Il est alors possible, à partir des scénarios climatiques futurs, de suivre l'évolution temporelle de ce rapport. En chaque point, on suit donc l'évolution du caractère plus ou moins aride des conditions locales.

Construire des classes, ou des enveloppes, climatiques (contenant un segment du gradient de rapport P/EP) permet en outre d'identifier un ensemble limité de zones présentant différents degrés d'aridité et de suivre l'évolution de leur répartition géographique. Cette approche permet de décrire le paysage climatique futur comme le déplacement à la surface terrestre d'enveloppes climatiques.

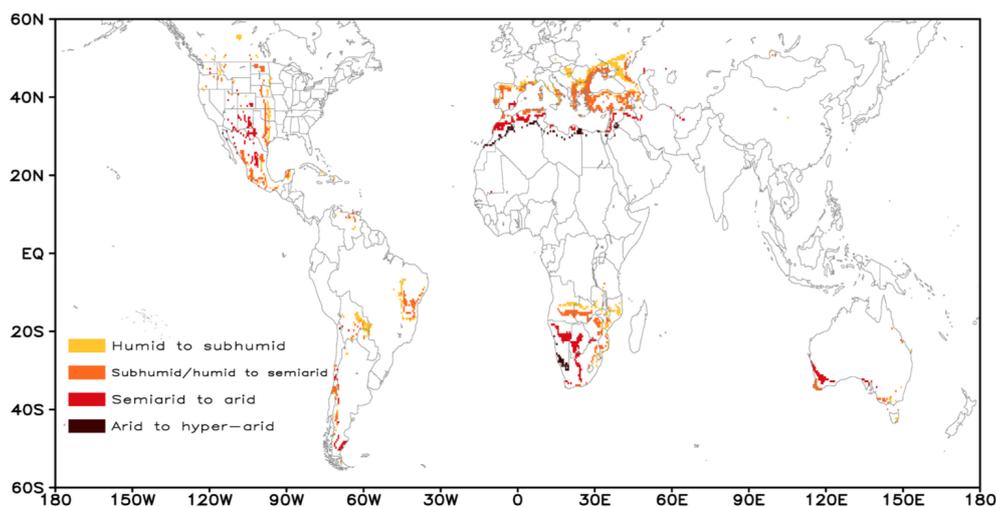


FIGURE 2.1 – *Figure extraite de Feng et Fu (2013) : Aridification future. Zones devenues plus arides à la fin du 21^e siècle (période moyenne 2071-2100) par rapport à la situation à la fin du 20^e siècle (1961-1990), selon le RCP 8.5. Ne sont représentées que les zones pour lesquelles 80% de 27 modèles s'accordent sur le sens du changement (vers une aridification).*

Feng et Fu (2013) utilise le rapport P/EP comme un indice d'aridité jalonné de seuils définis par l'UNCCD : 0.65 (sub-humide), 0.5 (semi-aride), 0.2 (aride) and 0.05 (hyper-aride). La demande évaporative est calculée à partir de la formule de Penman-Monteith. Ils démontrent ainsi que la surface totale couverte par les régions arides - les *drylands* - a globalement commencé à s'accroître au début du 20^e siècle et que cette tendance va se poursuivre dans le futur, selon deux scénarios climatiques. La figure 2.1 montre ainsi, pour un scénario climatique prolongeant la trajectoire actuelle des émissions de gaz à

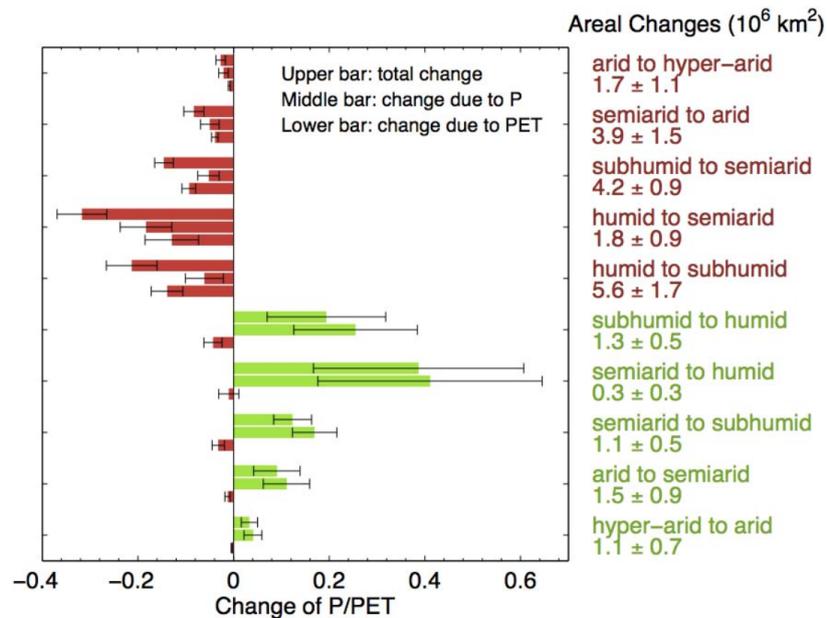


FIGURE 2.2 – *Figure extraite de Feng et Fu (2013) : Changements du rapport P/EP (barre supérieure), et des contributions de E (barre du milieu) et de P (barre inférieure) à ce changement, entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100, pour le RCP 8.5. Les résultats sont obtenus pour 27 modèles, puis moyennés. Les barres d'erreur représentent l'écart-type de la dispersion entre les modèles. Les valeurs indiquées à droite montrent les changements de surface.*

effet de serre, sans l'infléchir, que de nombreuses régions du monde vont connaître une aridification : en Amérique du Nord, en Europe et autour du bassin Méditerranéen, en Amérique et en Afrique du Sud, et dans le sud de l'Australie.

Cette approche permet en outre aux auteurs de séparer l'effet dû aux changements des précipitations, d'une part, et de la demande évaporative, d'autre part, sur le rapport final. Pour le RCP 8.5, ils montrent ainsi que la demande évaporative augmente dans tous les cas. Ce sont donc le sens et l'amplitude des changements de précipitations qui déterminent l'aridification ou l'humidification des régions. Dans le cas des régions connaissant une aridification, c'est l'effet de l'augmentation de la demande évaporative qui domine largement la transformation des zones humides en zones subhumides sèches et de ces dernières en zones semi-arides. Pour les autres transformations, c'est l'effet de la diminution des précipitations qui domine (voir la figure 2.2).

Cet article a été publié fin 2013, alors que le travail réalisé pour ce chapitre de thèse, suivant une autre approche, était en cours. Les résultats de ces travaux concomitants pourront donc être comparés. La démarche suivie par Feng et Fu (2013) est performante en ce qu'elle permet de représenter l'évolution du degré d'aridité à la surface du globe de manière objective. Elle permet en outre de discriminer l'effet du changement des précipitations de celui du changement de demande évaporative en tout point de la grille terrestre. Cependant, cette approche ne s'affranchit pas tout à fait du caractère arbitraire des seuils fixés. Le choix de ces seuils d'aridité est justifié d'une part par leur utilisation large (leur reconnaissance par l'UNCCD leur conférant un caractère quasi-officiel), d'autre part par la démonstration d'un recouvrement satisfaisant avec la répartition des écosystèmes arides. On observe en effet une bonne adéquation visuelle (voir figure 2.3) entre les zones identifiées comme climatiquement semi-arides et la répartition (à partir

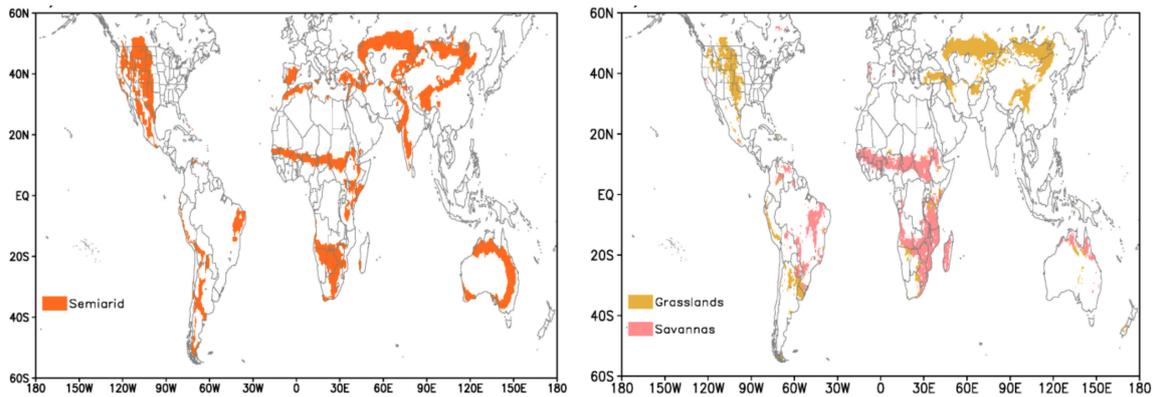


FIGURE 2.3 – *Figure extraite de Feng et Fu (2013) : Comparaison de la répartition de zones climatiques et écologiques. Comparaison de la répartition des zones semi-arides à la fin du 20^e siècle (1961-1990), selon des observations climatiques (gauche), et de la répartition des prairies et des savanes d'après les observations du satellite ISLSCP II MODIS (Collection 4, 2010) IGBP Land Cover*

d'observations satellites) de deux types d'écosystèmes : les savanes et les prairies.

L'approche fondée sur la caractérisation du degré d'aridité par le rapport des précipitations sur la demande évaporative est performante pour décrire l'évolution des zones arides dans leur ensemble. Son utilisation a permis de démontrer que l'aridification de zones déjà arides, ou humides, allait augmenter au cours du 21^e siècle selon deux scénarios climatiques.

→ Cependant, si l'approche fondée sur l'indice d'aridité est performante pour étudier les régions sèches, elle ne permet pas d'étudier les niches climatiques des différents écosystèmes terrestres. Des approches alternatives sont mieux adaptées à cet objectif. Celles-ci soit s'inscrivent dans la même démarche d'objectivité climatique en réalisant des classifications statistiques à partir d'un ensemble de variables climatiques plus large que celui de l'indice d'aridité, soit créent un ensemble d'unités climatiques fonctionnelles en se fondant sur leur signification écologique et anthropique.

L'approche bioclimatique

Parmi ces deux types de méthodes alternatives, la plus ancienne et la plus fréquemment utilisée est l'approche bioclimatique. Celle-ci consiste à construire un outil d'identification d'unités climatiques caractérisées par leur signification écologique. Les classes climatiques sont construites à partir de variables simples telles que la température et les précipitations. Les limites de classe sont fondées sur la connaissance empirique de niches fonctionnelles du point de vue de la destination de la classification ainsi construite.

La classification climatique la plus couramment utilisée dans la littérature scientifique est celle de Köppen-Geiger, tant pour sa facilité d'appréhension que pour les multiples validations d'usage dont elle a fait l'objet (par exemple Jylhä *et al.* (2010)).

La classification de Köppen, construite dans sa première version à la fin du dix-neuvième siècle (voir encadré), a été améliorée dans les décennies suivantes, bénéficiant tant de la progression des connaissances climatiques que des capacités technologiques.

Histoire de la classification de Köppen

La classification climatique de Köppen-Geiger, largement utilisée aujourd'hui, est le résultat de décennies de développement et d'amélioration à partir de la première classification proposée par Köppen en 1884, dans l'article fondateur : "*The thermal zones of the Earth according to the duration of hot, moderate and cold periods and of the impact of heat on the organic world*".

Rubel et Kottek (2011) relate l'évolution historique du concept de zone climatique et des classifications climatiques associées depuis l'idée originelle d'un zonage latitudinal, dans la Grèce antique, à la délimitation des zones sur un critère thermique. Köppen introduisit le critère de variabilité intra-annuelle de la température, en distinguant des zones selon la durée de saisons chaudes, modérément chaudes et froides. A la même époque, la première cartographie des précipitations moyennes annuelles fut établie, rendant possible l'élaboration d'une nouvelle classification fondée sur la conjugaison de deux critères, thermique et ombrométrique ; le mérite de cette nouvelle classification revient encore à Köppen (1900) (Griffiths (1977), cité par Rubel et Kottek (2011)).

Cette classification est fondée sur deux variables climatiques seulement, la température et les précipitations. Leur utilisation décline valeurs moyennes, extrêmes et saisonnalité. Les limites de classes sont fondées sur l'identification des niches climatiques associées à des « biomes » écologiquement identifiés. La classification de Köppen inclut donc une dimension fonctionnelle en prenant explicitement en compte des critères écologiques dans la délimitation des classes, ce que ne font pas les autres méthodes. L'interprétation des cartes de Köppen en termes de paysage écosystémique préférentiel est donc immédiate, et permet de comparer différentes époques et différents scénarios de manière générique.

Dans la même approche, une alternative existe : la classification climatique de Thornthwaite. Construite ultérieurement, cette classification repose sur le même principe mais inclut des critères de décision raffinés par rapport à ceux de la classification de Köppen. Du fait de sa complexité, cependant, la classification de Thornthwaite demeure moins utilisée aujourd'hui (Feddema, 2005).

Les deux classifications montrent des niveaux de performance comparables. Le choix de retenir ici la classification de Köppen est un choix de simplicité et de généricité : elle est à la fois plus intuitive et plus largement utilisée, y compris dans divers domaines scientifiques.

La classification climatique de Köppen est la plus utilisée dans les approches « bioclimatiques ». Moins « objective » mais plus générique que la classification fondée sur l'indice d'aridité, ou que les approches statistiques qui seront présentées dans la section suivante, elle est porteuse de sens, adaptée à l'analyse de climats en transition et simple d'utilisation.

L'approche statistique

La troisième approche consiste à combiner objectivité de la classification et généralité pour toutes les unités bioclimatiques homogènes de la surface terrestre. Pour cela, l'approche statistique consiste à sélectionner un ensemble plus ou moins grand de variables climatiques et de réaliser des classifications de ces variables par différentes méthodes.

Deux exemples de classification statistique du climat de surface sont livrés par Cannon (2012) et Metzger *et al.* (2013). Cette dernière étude propose de réaliser une « stratification environnementale ». Le principe est de réaliser une partition statistique à partir des variations entre variables climatiques indépendantes, en acceptant que les facteurs déterminants à l'échelle globale et continentale sont climatiques (Klijn et de Haes (1994) cité par Metzger *et al.* (2013)).

Au terme d'une analyse en composantes principales, Metzger *et al.* (2013) retient ainsi quatre variables, expliquant 99.9% de variabilité : le degré-jour de croissance (GDD), l'indice d'aridité (AI)¹, la saisonnalité de la température et la saisonnalité de l'évapotranspiration potentielle.

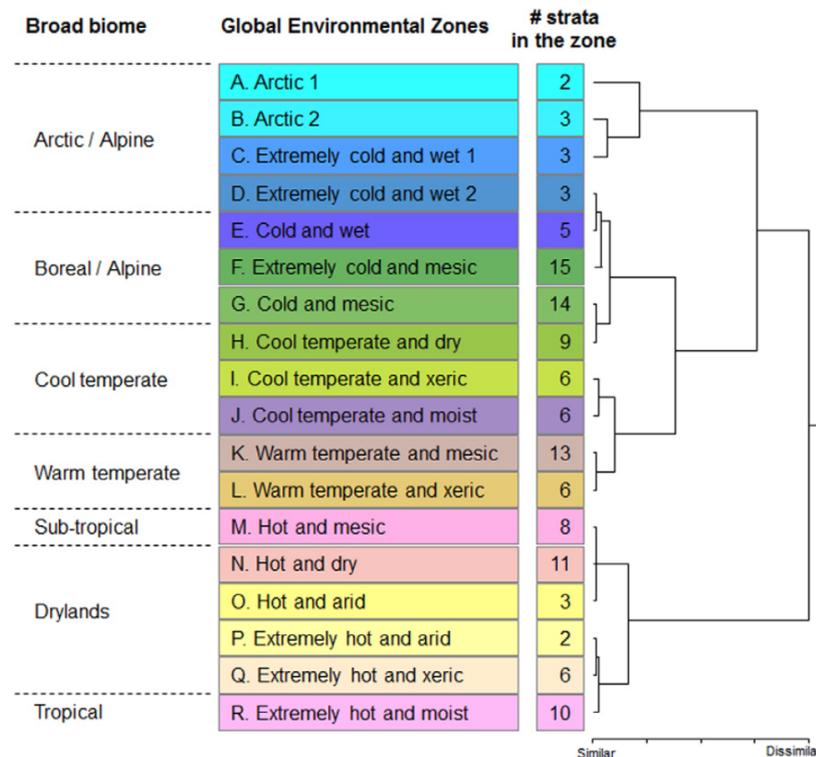


FIGURE 2.4 – *Figure extraite de Metzger et al. (2013) : Classification hiérarchique aboutissant à l'identification de 18 « zones environnementales globales ». Les couleurs (la répartition RVB) sont construites en utilisant les valeurs moyennes obtenues pour les trois composantes principales : rouge pour la température, vert pour la saisonnalité et bleu pour l'aridité.*

Chaque groupe (*cluster*) est principalement déterminé par une de ces quatre variables, mais toutes les variables montrent une certaine influence sur chacun des groupes. Les deux premières variables (GDD et AI) sont les plus importantes. Il est arbitrairement décidé

1. rapport des précipitations à la demande évaporative

de discriminer 125 groupes par la classification hiérarchique. Ces groupes sont ensuite rassemblés en 15 à 20 « zones environnementales globales », auxquelles sont attribués des noms explicites, construits à partir des composantes principales les ayant déterminés (voir figure 2.4). Nous voyons que dans ce travail la définition des *drylands* inclut uniquement les climats chauds et présentant un gradient d'aridité (indiqué entre parenthèses) : secs (0.3-0.6), xériques (0.1-0.3) et arides (0-0.1). D'autres zones sèches sont identifiées parmi les climats tempérés chauds (zone « tempérée chaude et xérique ») et froids (zone « tempérée froide et xérique », zone « tempérée froide et sèche »). La classification obtenue montre une bonne concordance avec les résultats d'autres classifications climatiques reconnues, notamment, à l'échelle globale, celles de Köppen et du WWF². Cependant, comme l'objectif de cette méthode n'est pas de décrire des entités observables, il n'est pas possible de confronter directement les résultats à des observations. La validation de la classification obtenue par voie statistique en termes de correspondance écologique ne peut être effectuée que comme comparaison à un panel d'autres classifications de référence, pour rendre compte d'une occupation potentielle de la surface par différents biomes. La référence la plus couramment employée est la classification climatique de Köppen, qui relève de l'approche bioclimatique discutée plus haut.

L'étude de Cannon (2012) est motivée par l'objectif d'évaluer la performance de cette classification de référence par rapport à la classification statistique obtenue à partir des mêmes variables climatiques, mais sans application de seuils empiriques. Les résultats indiquent que les deux classifications sont performantes pour identifier les régions homogènes en termes de température, mais que la classification de Köppen est moins efficace en ce qui concerne les précipitations (la dispersion intra-classe est globalement plus élevée dans la classification de Köppen). L'explication en est que, dans la classification de Köppen, seules les classes appartenant au groupe des climats « arides » sont déterminées par un critère de précipitation ; dans la classification statistique, en revanche, les précipitations constituent un critère de discrimination pour trois classes sur cinq. Du point de vue statistique, la classification de Köppen présente donc une sensibilité trop importante à la température (Cannon, 2012).

La comparaison réalisée entre les classifications de Cannon (2012) et de Köppen valide donc la signification statistique des classes arides de cette dernière. Les régions identifiées comme arides par la classification de Köppen forment donc bien un ensemble homogène du point de vue de la distribution des variables climatiques. Néanmoins, les autres classes climatiques de cette classification comprennent également certaines zones aux conditions de précipitations proches de celles de la classe aride. Par conséquent, d'un point de vue statistique, l'utilisation des classes arides au moyen de la classification de Köppen néglige une partie des régions sèches réparties parmi les autres classes. Cependant, la classification de Köppen n'a pas pour objectif initial de discriminer statistiquement les classes climatiques homogènes, mais d'identifier les niches climatiques d'existence des grandes familles de végétation. Par conséquent, une sensibilité moindre aux variations des précipitations pour les classes non arides peut être interprétée comme une tolérance accrue des écosystèmes à ces variations, et une sensibilité supérieure aux variations de température.

Si l'approche bioclimatique ne produit pas des résultats exactement équivalents à ceux des approches plus objectives d'un point de vue climatique, elle est cependant mieux adaptée à l'étude de la répartition des biomes. La

2. World Wildlife Fund

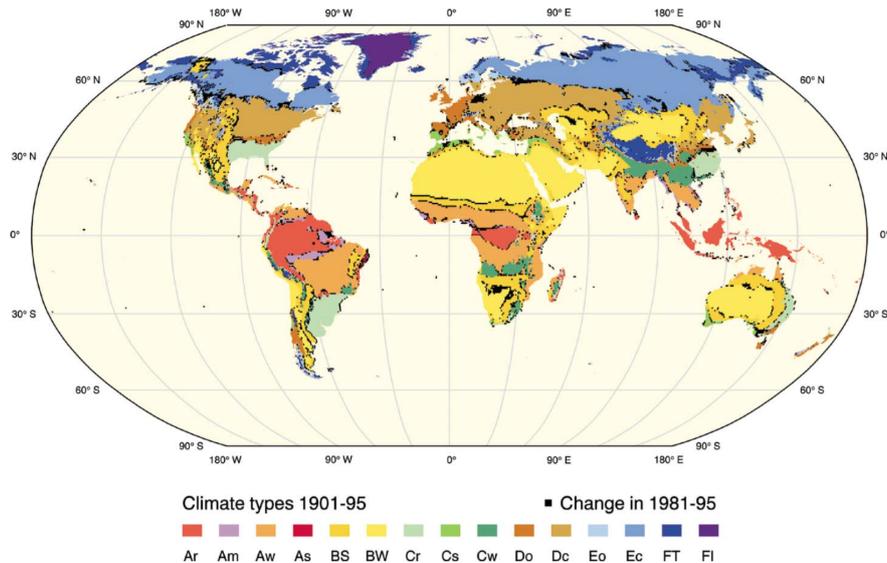


FIGURE 2.5 – *Figure extraite de Fraedrich et al. (2001) : Changements dans la classification de Köppen à la fin du 20^e siècle. Classification de Köppen appliquée à la climatologie moyenne des années 1901 à 1995 ; les changements survenus à la fin de cette période (1981-1995) sont indiqués en noir sur la carte. Les classes Ax, Bx, Cx, Dx et Ex appartiennent respectivement aux groupes des climats « équatoriaux », « arides », « subtropicaux », « tempérés », « boréals » et « polaires », selon la nomenclature de Fraedrich et al. (2001).*

performance de la classification de Köppen à identifier ces aires de répartition de différentes formations végétales est validée par l'observation (par exemple Rohli *et al.* (2015)) et par son utilisation largement répandue dans différents domaines, ce qui constitue une validation par l'usage. Elle a en outre prouvé sa performance comme outil d'analyse des transitions éoclimatiques, ainsi que nous allons le voir dans la section suivante.

2.1.2 Le choix de l'approche bioclimatique

Nous avons déjà décrit l'utilisation d'une classification climatique simple pour étudier l'évolution des enveloppes climatiques - et en particulier des régions semi-arides - dans le futur (Feng et Fu, 2013). Le même type d'analyse est réalisé avec la classification de Köppen pour « filmer » le déplacement des zones climatiques au cours du 20^e siècle à partir d'observations climatiques (Fraedrich *et al.*, 2001). D'autres études ont appliqué cette méthode aux sorties de modèles climatiques pour l'analyse des scénarios futurs (Rubel et Kottek, 2010). Le principe consiste à appliquer la classification séquentiellement sur des fenêtres climatiques successives, de manière à produire un film du mouvement des domaines climatiques à la surface du globe au cours du temps.

Fraedrich *et al.* (2001), en appliquant cette méthode à des observations du CRU (*Climate Research Unit (University of East Anglia, New and Hulme, 1997)*), diagnostique notamment une expansion de la ceinture tropicale au cours de la période 1901-1995 (figure 2.5). Il met en évidence l'occurrence de « basculements climatiques » (*climate shifts*, en anglais) entre le début et la fin du siècle à la frontière géographique entre les classes climatiques. Une explication simple en est que la transition entre classes climatiques s'effectue

en premier lieu là où les conditions sont proches des seuils délimitant les classes. Cela montre que les zones de transition mises ainsi en avant sont complètement dépendantes de la valeur de ces seuils. La méthode permet donc de repérer les régions du monde où s'opèrent des changements majeurs en termes de conditions de maintien des écosystèmes. Cependant, la localisation cardinale précise de ces régions est en partie déterminée par le choix de ces seuils. Nous retrouvons ici la même limite que nous signalions déjà pour l'utilisation de l'indice d'aridité. Enfin, l'article n'est pas focalisé sur le comportement des régions arides. La carte (figure 2.5) montre bien, cependant, que beaucoup de ces changements se produisent dans les régions classées arides (groupe B).

Par la suite, le même exercice a été réalisé par Rubel et Kottek (2010) pour une projection dans le futur de ce mouvement des zones climatiques. Leurs travaux utilisent les projections pour le 21^e siècle des conditions climatiques, selon les scénarios SRES³, utilisés lors du quatrième rapport du GIEC. En accord avec de précédentes études, les changements diagnostiqués de la répartition des classes climatiques seront les plus visibles dans l'hémisphère Nord, entre 30 et 80 degrés de latitude. Ces résultats montrent en outre une tendance générale de transition vers le nord des classes climatiques (par conversions opérées au niveau de la limite nord des classes climatiques). En ce qui concerne les zones arides, ils n'incluent pas les changements les concernant parmi les changements majeurs se produisant, mais ils montrent néanmoins que les surfaces arides resteront, comme aujourd'hui, les plus étendues à la surface terrestre, avec une tendance à l'accroissement.

► Les travaux réalisés en utilisant la classification climatique de Köppen ont démontré l'expansion projetée des zones semi-arides dans le futur, selon les données des modèles de climat pour différents scénarios, ainsi que la performance de cette méthodologie à repérer les zones de « basculements climatiques » entre des classes adaptées à des écosystèmes distincts.

→ C'est cette même approche que nous proposons d'adopter dans la suite de ce travail, en utilisant les projections climatiques du dernier exercice d'intercomparaison de modèles climatiques (CMIP5⁴). En concentrant l'analyse sur les zones tropicales semi-arides, il sera possible d'en cartographier l'évolution projetée dans le futur et d'identifier les régions de « basculement climatique » dans lesquelles elles seraient impliquées. En outre, il sera possible de caractériser les types de conversion éoclimatique que subiront les zones semi-arides présentes et futures : les futures zones semi-arides, en effet, ne pourront pas être considérées de la même manière selon qu'elles auront subi une transition depuis des conditions désertiques, tropicales subhumides ou tempérées sèches.

3. *Special Report on Emissions Scenarios*

4. *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*

2.2 Détail de la classification, données climatiques et méthodologie appliquée

Nous allons donc utiliser la classification de Köppen comme outil pour filtrer les zones chaudes semi-arides à la surface du globe, dans le présent et au cours du siècle à venir.

2.2.1 La classification climatique de Köppen

Revenons une dernière fois sur la classification climatique de Köppen, en entrant cette fois dans les détails de sa construction.

Cette classification recourt à deux variables climatiques, en données mensuelles : la température de l'air et les précipitations. Elle est structurée selon des niveaux de complexité croissants : cinq groupes climatiques sont identifiés, puis chacun est subdivisé en un nombre de classes variable selon le groupe. Les seuils de séparation entre les classes sont empiriques : ils délimitent les domaines d'existence des grands types de peuplement végétal terrestre, définis à dire d'expert (Kottek *et al.*, 2006).

Nomenclature	Classe	Règle 1	Règle 2
BSh	Chaud semi-aride	$5 * Pth < Pann < 10 * Pth$	$Tann \geq +18^\circ C$
BSk	Froid semi-aride	$5 * Pth < Pann < 10 * Pth$	$Tann < +18^\circ C$
BWh	Chaud aride	$Pann \leq 5 * Pth$	$Tann \geq +18^\circ C$
BWk	Froid aride	$Pann \leq 5 * Pth$	$Tann < +18^\circ C$

TABLE 2.1 – **Règles d'identification des classes arides et semi-arides** : L'appartenance au groupe des climats arides (B selon la nomenclature de Köppen) est validée par le franchissement d'un seuil (seuil Pth , multiplié par 10) de précipitations annuelles ($Pann$). Deux niveaux d'aridité sont ensuite distingués. Enfin, les classes sont réparties selon leur positionnement par rapport à un seuil de température moyenne annuelle ($Tair$).

Les critères de calcul de la classification de Köppen sont reproduits dans Kottek *et al.* (2006) (voir tableau 2.1). Tous les groupes, à l'exception du groupe B (climats arides) sont identifiés au premier ordre à partir de la température moyenne du mois le plus chaud et du mois le plus froid. Les subdivisions internes dans les groupes A (climats équatoriaux), C (tempérés chauds) et D (neigeux) sont déterminées par des critères de précipitations (niveaux de précipitations du mois le plus sec, valeurs minimale et maximale des précipitations mensuelles pour l'été et l'hiver). Les subdivisions du groupe E (polaire) sont uniquement basées sur des critères de température.

Le groupe B (climat aride), qui nous intéresse particulièrement ici, est caractérisé au premier ordre par le franchissement d'un seuil de sécheresse (appelé Pth et exprimé en mm de pluie), calculé comme une fonction linéaire de la température de l'air moyenne annuelle ($Tann$ en degrés celsius), paramétrée en fonction de la distribution annuelle des précipitations (cf. formule importée de Kottek *et al.* (2006), formules 2.1 à 2.3) :

$$Pth = 2 * Tann \quad (2.1)$$

si au moins 2/3 des précipitations annuelles ont lieu en hiver,

$$Pth = 2 * Tann + 28 \quad (2.2)$$

si au moins 2/3 des précipitations annuelles ont lieu en été,

$$P_{th} = 2 * T_{ann} + 14 \quad (2.3)$$

sinon.

Les classes climatiques arides sont par conséquent identifiées d'abord par les précipitations, même si le seuil critique de précipitations est influencé par la température de l'air. Ce groupe climatique aride est subdivisé en quatre classes :

- les « steppes » sont différenciées des « déserts » par leur positionnement par rapport au seuil de sécheresse déjà utilisé pour l'identification du groupe aride ;
- les régions plus chaudes sont distinguées des régions plus froides par un seuil de température moyenne annuelle (18 ° C).

2.2.2 Données climatiques

La classification de Köppen est appliquée dans ce travail à deux types de données climatiques :

1. les données du CRU (*Climate Research Unit*), issues d'observations climatiques ;
2. les sorties de modèles de l'exercice CMIP5 pour un ensemble de 12 modèles de circulation générale.

Les données du CRU sont utilisées comme données de référence pour le 20^e siècle. Elles sont produites par l'institut *Climate Research Unit* de l'université d'*East Anglia*, en Angleterre, à partir de données recueillies en stations expérimentales et interpolées à l'échelle du globe (Mitchell et Jones, 2005). Elles sont disponibles à la résolution 0.5 degrés pour la période 1901-2002.

Les données CMIP5 sont utilisées comme projections des conditions climatiques futures. Pour traiter les changements potentiels futurs, nous avons utilisé les données de précipitations et de température de l'air globales pour 12 modèles (voir tableau 2.2). Lorsque plusieurs *runs*⁵ sont disponibles pour un modèle donné, nous utilisons la moyenne de ces runs de manière à s'affranchir de la variabilité interne des modèles (Taylor *et al.*, 2012). Pour chaque modèle, la période 1901-2005 est extraite des résultats de l'expérience historique (forcée par des observations des changements dans la composition atmosphérique).

Les scénarios de changement climatique utilisés ont été décrits au chapitre 1. Trois scénarios sont retenus ici, parmi les quatre existants : les RCP 2.6, 4.5 et 8.5. Ces trois scénarios permettent d'encadrer le champ des possibles avec deux scénarios extrêmes (RCP 2.6 et 8.5), tandis que le RCP 4.5 représente une trajectoire intermédiaire. Les données accessibles au moment de l'étude étaient moins nombreuses pour le RCP 6.0.

2.2.3 Application de la classification aux données climatiques

La classification climatique est conçue pour caractériser l'état moyen du climat indépendamment des variations d'une année à l'autre. Appliquer cette classification aux données annuelles n'aurait donc pas de sens, c'est pourquoi nous travaillons ici à partir de climatologies moyennes sur un intervalle pluri-annuel. Cet intervalle a été choisi

5. un ensemble de simulations (de nombre variable) réalisées pour chaque modèle

Institut	Modèle	Résolution de la grille (lat*lon)
BCC	BCC-CSM1.1	2.8x2.8
GCESS	BNU-ESM	2.8x2.8
CCCMA	CanESM2	2.8x2.8
NCAR	CCSM4	0.9x1.3
CNRM-CERFACS	CNRM-CM5	1.4x1.4
NOAA GFDL	GFDL-CM3	2.0x2.5
NASA GISS	GISS-E2-R	2.0x2.5
IPSL	IPSL-CM5A-LR	1.9x3.8
MIROC	MIROC5	1.4x1.4
MPI-M	MPI-ESM-LR	1.9x1.9
MRI	MRI-CGCM3	1.1x1.1
NCC	NorESM1-M	1.9x2.5

TABLE 2.2 – *Liste des 12 modèles de circulation générale (GCMs) utilisés, et résolution.*

comme le plus petit nombre d'années à partir duquel une tendance commence à être réalisée, suivant les résultats de Fraedrich *et al.* (2001), soit un intervalle 15 ans. On calcule donc les séries temporelles de température et de précipitations mensuelles en moyennes glissantes opérées sur 15 années. A partir de ces séries, on obtient une série de classifications annuelles moyennes. La surface totale (globale ou régionale) peut dès lors être calculée pour une classe climatique donnée (par exemple la classe « chaude semi-aride ») pour chaque période glissante de 15 ans. Ces séries temporelles glissantes de surface totale nous permettront d'explorer les tendances d'évolution des surfaces totales concernées par une classe climatique donnée.

Classification pour la moyenne multi-modèle Pour certains résultats, nous utilisons la climatologie moyenne sur l'ensemble des modèles. Cette approche présente l'inconvénient de ne pas tenir compte de la dispersion entre les modèles, mais elle facilite la visualisation du futur paysage bioclimatique (dans la mesure où les tendances révélées par les modèles sont cohérentes). La climatologie moyenne est constituée par la moyenne arithmétique sur l'ensemble des modèles de la température de l'air et des précipitations mensuelles, en moyennes glissantes sur 15 ans. La classification de Köppen est alors calculée de la même manière que pour chaque modèle.

Comparaison des paysages actuel et futurs En plus d'analyser la série temporelle de 1901 à 2100, deux périodes de référence sont utilisées pour caractériser l'évolution du paysage bioclimatique :

- la période « actuelle » de la fin du 20^e siècle correspond ici à la climatologie moyenne des années 1987 à 2001 ;
- la période « future » de la fin du 21^e siècle correspond à la climatologie moyenne des années 2086 à 2100.

Approche régionale Pour certains diagnostics, une approche régionale est adoptée. Pour cela, le globe est divisé en six blocs continentaux, comme montré sur la figure 2.7 :

NordAmérique, NordAfrique, Asie, SudAmérique, SudAfrique et Océanie. Ces blocs sont répartis de part et d'autre de l'Equateur et séparés par les méridiens de longitude 24.25 ° ouest, 60.25 ° est et 180 ° est.

Légende des cartes montrant la classification de Köppen

Nous allons, dans la suite, fréquemment recourir à la même gamme de couleurs pour représenter les 31 classes climatiques. Cette légende commune à l'ensemble des cartes est montrée sur la figure 2.6. Les noms de chaque classe sont indiqués dans le tableau 2.3. La classe *BSh* dans cette classification, formellement « climat aride-végétation de steppe-température supérieure à 18 ° C » est assimilée à la classe « semi-aride chaude » et sera désignée comme telle dans la suite.

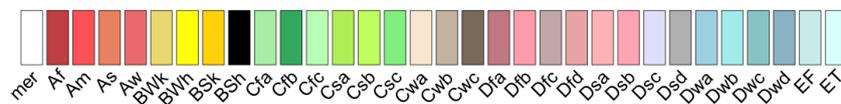


FIGURE 2.6 – *Légende des cartes colorées représentant la classification de Köppen.*

Groupe	Classe	Nom complet
A : Climats équatoriaux	Af	Forêt équatoriale humide
	Am	Equatorial avec mousson
	As	Savane équatoriale avec été sec
	Aw	Savane équatoriale avec hiver sec
B : Climats arides	BSh	Chaud semi-aride
	BSk	Froid semi-aride
	BWh	Chaud aride
	BWk	Froid aride
C : Climats tempérés chauds	Cf	Humide toute l'année
	Cs	Avec été sec
	Cw	Avec hiver sec
D : Climats froids	Df	Humide toute l'année
	Ds	Avec été sec
	Dw	Avec hiver sec
E : Climats polaires	EF	Glace
	ET	Tundra

TABLE 2.3 – *Nomenclature de la classification de Köppen.* Les groupes C et D ont un troisième niveau de subdivision non indiqué dans le tableau et fondé sur les températures. Celui-ci adjoint une lettre a, b, c ou d au nom de classe, comme il apparaît sur l'échelle de la figure 2.6. Ces lettres signifient respectivement : a) été très chaud, b) été chaud, c) été frais et hiver froid et enfin d) extrêmement continental.

2.3 Application pour le 20^e siècle

2.3.1 Observation de la distribution et de l'évolution géographique des zones chaudes semi-arides au cours du 20^e siècle

La distribution globale des classes bioclimatiques est analysée, pour le 20^e siècle, à partir des données du CRU. La carte de la figure 2.7 permet de visualiser le paysage bioclimatique mondial de la fin du 20^e siècle (moyenne des années 1987 à 2001). Les régions chaudes semi-arides sont en noir sur la carte. La somme totale des surfaces classées chaudes semi-arides pour cette période représente environ 7% de la surface terrestre globale⁶, soit environ 10.5 millions de km².

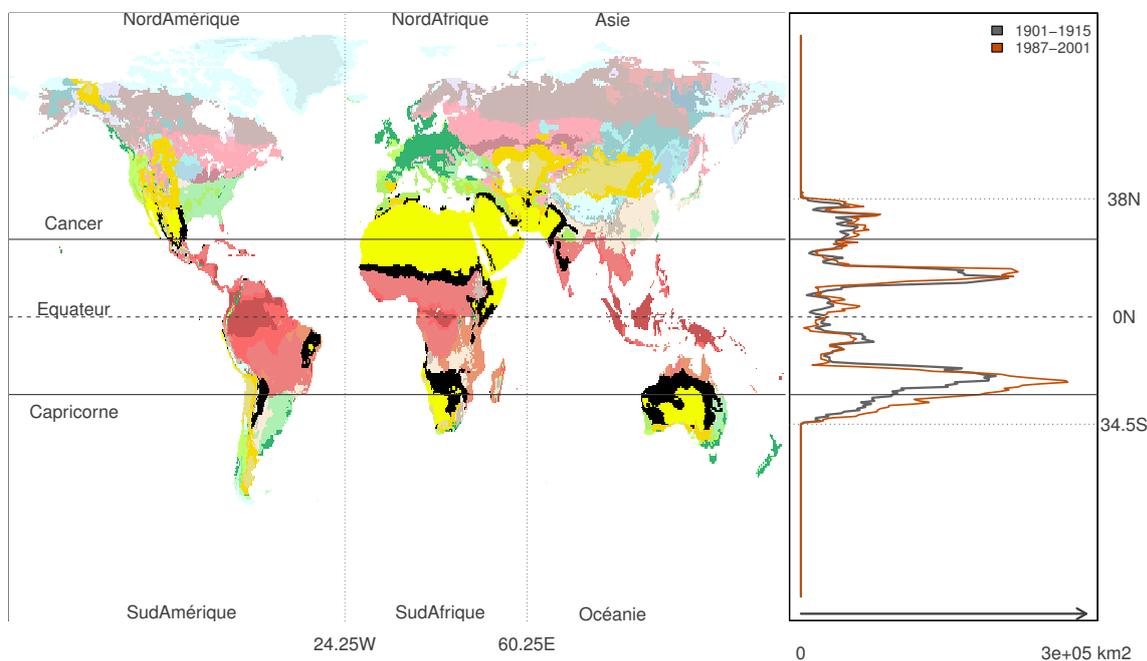


FIGURE 2.7 – *Paysage bioclimatique de la fin du 20^e siècle* (application de la classification de Köppen aux données du CRU moyennées sur la période 1987-2001). La partie droite de la figure montre le profil zonal de distribution de la surface totale semi-aride chaude, pour la même période (en rouge) et pour le début du siècle (1901-1915, en noir). Sur la carte, les lignes verticales délimitent, avec l'équateur comme ligne de séparation horizontale, les six régions qui sont utilisées pour certains approfondissements dans ce chapitre, et dont les noms sont indiqués en haut et en bas.

Ce domaine tropical semi-aride occupe principalement la ceinture sahélienne, la corne de l'Afrique, le sud de l'Afrique, le pourtour de l'Australie, le nord-est brésilien, le contrefort oriental et tropical des Andes, le sud de l'Amérique du Nord, une partie de l'Inde et

6. 148.6 millions de km²

du bassin méditerranéen. La partie strictement tropicale (somme des deux hémisphères) du domaine tropical semi-aride représente 71% de la surface de ce dernier à la fin du 20^e siècle. Elle ne représentait que 66% du domaine au début du siècle. Sur la figure 2.7, le profil latitudinal de surface tropicale semi-aride est tracé en rouge pour la période actuelle (1987-2001). Dans l'hémisphère Nord, la majeure partie de cette surface est située dans la région sahélienne, en pleine zone tropicale. Deux autres régions appartenant à cette classe climatique sont situées au nord du tropique : celle formée par le Mexique et le sud des Etats-Unis, et le sud du bassin méditerranéen. Dans l'hémisphère Sud, la surface tropicale semi-aride est concentrée au niveau du tropique, dans les régions sudafricaine, australienne et à l'est des Andes. A celles-ci s'ajoutent la région Est-Brésil, en pleine zone tropicale. Les limites d'extension du domaine tropical semi-aride sont respectivement 34.5 ° et 38 ° dans les hémisphères Sud et Nord.

Cette distribution des zones chaudes semi-arides a peu changé au cours du 20^e siècle, jusqu'aux dernières décennies. En revanche, la surface totale montre une augmentation à la fin du siècle (figure 2.7, courbe rouge) par rapport au début du siècle (courbe noire). Celle-ci est principalement visible au niveau de la surface chevauchant le tropique dans l'hémisphère Sud, ainsi qu'au niveau de la ceinture sahélienne dans l'hémisphère Nord. De manière moins prononcée, mais continue sur tout le gradient latitudinal, l'augmentation est aussi visible dans la région subtropicale de l'hémisphère Nord.

L'augmentation de surface tropicale semi-aride entre le début et la fin du 20^e siècle est plus importante en-dehors de la ceinture tropicale, et ce aux échelles globale et de chaque hémisphère, en valeur absolue et relative (tableau 2.4).

	hémisphère Nord	hémisphère Sud	<i>Total</i>
Tropiques	245.10 ³ km ² (8%)	258.10 ³ km ² (7%)	503.10 ³ km ² (7%)
Extra-tropiques	369.10 ³ km ² (31%)	1001.10 ³ km ² (76%)	1370.10 ³ km ² (55%)

TABLE 2.4 – *Augmentation nette de surface tropicale semi-aride entre le début et la fin du 20^e siècle, selon les données du CRU. Les valeurs absolues sont données en milliers de km² respectivement à l'intérieur de la ceinture tropicale (délimitée par les tropiques du Cancer et du Capricorne) et à l'extérieur, et pour chaque hémisphère. L'augmentation relative à la surface du début du siècle est donné en % entre parenthèses.*

La somme globale de ces changements conduit à une augmentation de +13% de la surface tropicale semi-aride entre la fin et le début du 20^e siècle, ce qui correspond à une augmentation de plus de 1 million de km² (1265.103 km², environ deux fois la surface de la France, soit encore 127 millions d'hectares). La figure 2.8 montre l'évolution de la surface totale chaude semi-aride au cours du 20^e siècle. La tendance est indiquée par la courbe rouge, obtenue par régression « loess » (méthode de régression non-paramétrique), qui permet de produire des courbes lissées, ajustées à un nuage de points.

Sur la figure 2.7, le profil latitudinal de surface tropicale semi-aride est tracé en noir pour le début du 20^e siècle et peut être comparé à celui de la fin du siècle (en rouge). Les limites d'extension nord et sud du domaine étudié demeurent inchangées entre les deux périodes (respectivement 38 ° N et 34.5 ° S).

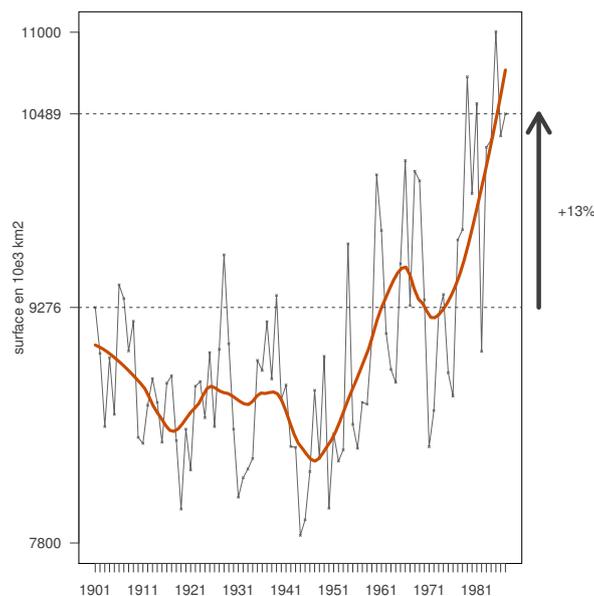


FIGURE 2.8 – *Evolution de la surface chaude semi-aride globale au cours du 20^e siècle, selon les données du CRU. La courbe en noir représente la surface totale en moyenne glissante sur 15 ans. Les surface en abscisses sont exprimées en milliers de km². La courbe en rouge représente un lissage de ces données moyennes. La régression a été réalisée en utilisant la fonction correspondante dans le logiciel R (R Core Team 2013). En abscisses, chaque graduation correspond à un intervalle de 15 ans, dont seule la première année est indiquée (par exemple : 1901 pour 1901-1915).*

Malgré cette stabilité, la répartition latitudinale du domaine tropical semi-aride subit, au sein de ces limites, un déplacement vers les pôles dans chaque hémisphère. En effet, la proportion de ce domaine située entre l'équateur et le tropique passe, entre le début et la fin du siècle, de 72 à 69% dans l'hémisphère Nord, et de 76 à 67% dans l'hémisphère Sud.

Pour estimer le front d'extension du domaine tropical semi-aride vers les pôles, on détermine dans chaque hémisphère la limite latitudinale telle que 75% de la surface totale de ce domaine soit comprise entre l'équateur et cette limite. Il est alors possible de tracer l'évolution de cette limite d'extension au cours du temps, comme représenté sur la figure 2.9. Pour les deux hémisphères, cette limite montre un déplacement vers le pôle à la fin du siècle par rapport à sa position initiale. Dans l'hémisphère Nord, la limite latitudinale atteint 24.3 ° N en moyenne entre les périodes 1901-1915 à 1964-1978, et cette moyenne augmente jusqu'à 28.7 ° N en moyenne entre 1965-1979 et 1987-2001. Dans l'hémisphère Sud, en revanche, l'augmentation de latitude (si on l'exprime en ° S) ne démontre pas de stabilisation analogue en fin de siècle, mais une tendance à l'augmentation conduisant à la sortie de l'intervalle de variabilité observé sur la période précédente à partir de l'intervalle 1979-1993. Malgré cette absence de stabilisation, la valeur moyenne de latitude a été calculée pour cette fin de siècle : à titre indicatif, la limite montre un déplacement d'une valeur moyenne de 22 ° S sur la majeure partie du 20^e siècle à 25.4 ° S à la fin de celui-ci. Par conséquent, alors que 75% du domaine classé « tropical semi-aride » était effectivement *tropical* au début du 20^e siècle, à la fin de celui-ci, ses limites latitudinales montraient une extension vers les pôles dans les deux hémisphères : supérieure à 4 degrés de latitude dans l'hémisphère Nord, et à 3 degrés dans l'hémisphère Sud.

Cette expansion subtropicale est cohérente avec l'expansion de la circulation de Hadley au cours du 20^e siècle qui a été démontrée à l'aide des observations disponibles (Seidel *et al.*, 2008; Johanson et Fu, 2009). En effet, les régions tropicales sèches sont déterminées au premier ordre par la position des zones de subsidence de cette circulation atmosphérique globale (chapitre 1). La caractérisation de cette expansion varie selon les études, du fait de l'hétérogénéité des données et des définitions utilisées pour définir les tropiques et les régions sèches (Davis et Rosenlof, 2012; Lu *et al.*, 2007), mais les résultats concordent vers une migration vers les pôles des zones de subsidence de la circulation de Hadley. Les résultats présentés ici, une expansion de l'ordre de 4° vers les pôles, se situent dans la gamme de valeurs rapportées par d'autres travaux (Seidel *et al.* (2008) pour une synthèse). S'il est bien observé, ce phénomène d'expansion de la circulation de Hadley est encore mal expliqué (Seidel *et al.*, 2008).

► L'évolution récente du domaine tropical semi-aride global est analysée en appliquant la classification de Köppen à des observations climatiques. Situé principalement dans la ceinture tropicale au début du 20^e siècle, ce domaine a vu sa surface totale s'accroître de 13% durant la seconde partie du siècle. Cette augmentation est observée à l'intérieur de la zone strictement tropicale, mais aussi à l'extérieur, induisant un déplacement de ses limites d'extension latitudinale en-dehors des tropiques. Ce résultat concorde avec ceux de travaux antérieurs portant plus spécifiquement sur l'élargissement de la circulation atmosphérique de grande échelle dite de Hadley. Néanmoins, cette expansion n'a pas dépassé, à la fin du 20^e siècle, les frontières nord et sud du domaine tropical semi-aride du début du siècle.

Remarques :

1. dans la section précédente, les différences entre début et fin de siècle sont calculées à partir des valeurs obtenues pour le premier et le dernier des intervalles de 15 ans de la série des moyennes glissantes. Une variabilité interannuelle résiduelle, visible sur la figure 2.8, est alors négligée : les résultats obtenus seraient différents en considérant, par exemple, les intervalles juste suivants ou précédents. Cette différence serait seulement qualitative, sans remettre en cause la tendance exprimée, tendance qui serait en revanche masquée si des moyennes sur des intervalles plus longs étaient re-calculées. Qui plus est les résultats sont discutés à partir des cartes de la classification climatique calculée pour l'intervalle de temps considéré : la moyenne des valeurs de surface obtenues pour une série d'intervalles glissants ne trouve pas de correspondance visuelle dans des cartes moyennes. Dans la suite, la même approximation est réalisée, pour les mêmes motifs ;
2. la classe « semi-aride chaude » utilisée ici pour identifier le domaine « tropical semi-aride » formant l'objet de la problématique est majoritairement rencontrée dans la ceinture tropicale stricte mais pas uniquement, comme il vient d'être démontré. Pour limiter les abus de langage dans la suite, la classe climatique sera toujours désignée comme « semi-aride chaude », mais le domaine et les régions géographiques seront appelé(es) « *tropical(es)* semi-aride(s) » par assimilation à l'identité majoritairement tropicale du domaine actuel.

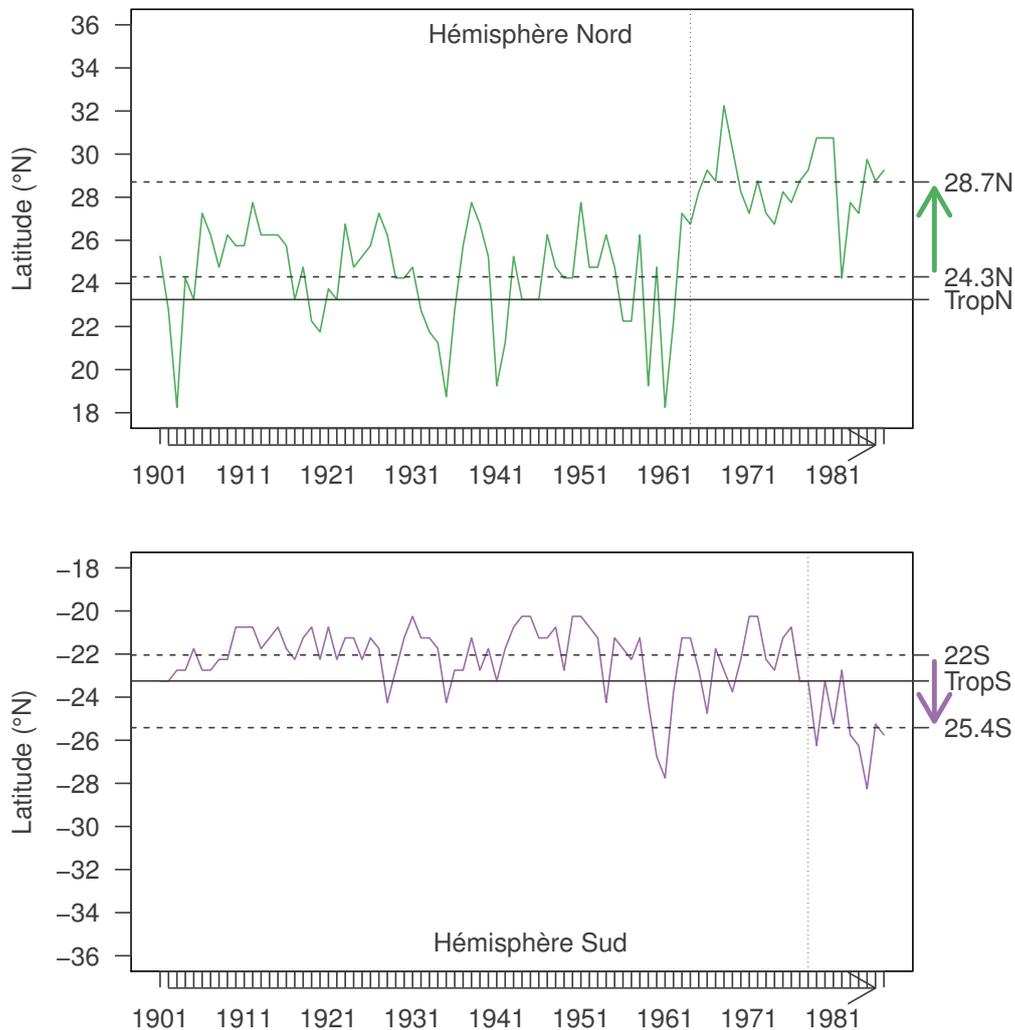


FIGURE 2.9 – *Evolution de la limite zonale incluant 75% de la surface totale classée chaude semi-aride, d'après les données du CRU. En abscisses sont indiquées la première et la dernière période moyenne de 15 ans sur lesquelles sont effectués les calculs. Le graphique du haut correspond à l'hémisphère Nord, celui du bas à l'hémisphère Sud. Les ordonnées sont exprimées en degrés de latitude nord. Les lignes horizontales en trait plein représentent les tropiques. Deux valeurs de latitude moyenne sont indiquées à droite, pour chaque hémisphère : celles pour les périodes allant de 1901-1915 à 1964-1978, et de 1965-1979 à 1987-2001, pour l'hémisphère Nord, de 1901-1915 à 1978-1992 et de 1979-1993 à 1987-2001 pour l'hémisphère Sud. Les lignes verticales marquent la séparation entre les deux périodes pour chaque hémisphère. Les flèches à droite signalent le déplacement des valeurs de latitude moyenne entre les deux périodes. En abscisses, chaque graduation correspond à un intervalle de 15 ans, dont seule la première année est indiquée (par exemple : 1901 pour 1901-1915).*

2.3.2 Evaluation de la performance des modèles pour représenter les régions semi-arides chaudes

L'exploration de l'évolution future de la surface semi-aride chaude est réalisée à partir d'un ensemble de sorties de modèles pour les scénarios futurs, comme expliqué au début de ce chapitre. Dans un premier temps, la représentation de cette surface par l'ensemble des modèles est analysée pour le 20^e siècle. Ceci permet d'évaluer la performance des modèles pour cette problématique. La classification de Köppen est donc appliquée aux sorties de chaque modèle pour la période 1901-2001, puis la répartition et l'évolution de la surface totale semi-aride chaude sont comparées à celles observées avec les données du CRU.

Identification des grandes régions tropicales semi-arides

Le paysage bioclimatique de la fin du 20^e siècle (moyenne pour les années 1987 à 2001) est représenté pour chaque modèle sur la figure 2.10. **Globalement, la répartition des zones chaudes semi-arides est bien représentée par les modèles, en comparaison de celle obtenue à partir des données CRU, même si le positionnement cardinal et l'étendue exacte de ces régions varient légèrement.**

Le calcul de la surface tropicale semi-aride totale dans chaque grande région est effectué pour cette période : les surfaces moyennes, le minimum et le maximum sur l'ensemble des modèles sont indiqués dans le tableau 2.5. La figure 2.11 représente les anomalies de ces surfaces par rapport à celles calculées à partir des données du CRU et permet d'évaluer la dispersion multi-modèle. En moyenne, la surface tropicale semi-aride est surestimée dans les régions NordAmérique, SudAmérique et Océanie, et sous-estimée pour les régions Asie et SudAfrique.

Les performances des modèles dans leur ensemble sont les meilleures pour la région NordAfrique : l'anomalie moyenne de surface par rapport au CRU est nulle (figure 2.11, ligne grise horizontale) et la dispersion des modèles autour de cette moyenne est la plus faible parmi les six régions. La surface concernée dans cette région est située principalement au niveau du Sahel, ainsi que dans la corne africaine et le bassin méditerranéen (figure 2.10). La surface tropicale semi-aride située dans le bassin méditerranéen est systématiquement sous-estimée par les modèles (figure 2.10), sauf pour un (MIROC5). Cette surface étant par ailleurs peu importante par rapport à celle du Sahel, cela n'a que peu d'incidence sur le bilan à l'échelle de la grande région baptisée NordAmérique.

En Asie, la surface tropicale semi-aride est composée d'une zone selon un axe longitudinal dans l'ouest de l'Inde, d'une zone longeant le contre-fort himalayen au Pakistan et d'une troisième zone longeant la vallée de l'Indus au Pakistan de l'Himalaya jusqu'à la mer d'Arabie (figure 2.7). Aucun des modèles ne représente correctement ces trois zones, sauf MRI-CGCM3. La plupart des modèles ne représentent qu'une seule de ces zones, ce qui explique la **tendance à la sous-estimation systématique** de la surface totale par les modèles. Seul le modèle CNRM-CM5 sur-estime cette surface (figure 2.11)

En SudAfrique, la tendance des modèles est aussi à la sous-estimation de la surface tropicale semi-aride, remplacée en partie par la classe *Cwa* : tempérée chaude à hiver sec et été très chaud (tableau 2.3). Cette classe est présente dans les observations au nord de la zone tropicale semi-aride (figure 2.7). Les modèles sous-estiment donc l'aridité dans cette région.

En Océanie, la surface est sur-estimée en moyenne mais la dispersion entre

les modèles est plus forte : il y a autant de modèles qui sur-estiment que de modèles qui sous-estiment cette surface. Dans la plupart des cas, le bilan est le résultat du partage du centre de l'Australie entre la classe *BSh* (semi-aride) et la classe *BWh* (très aride).

La dispersion entre les modèles est encore plus importante **dans la région SudAméri-**
rique, où l'anomalie atteint la valeur 2 pour deux modèles, pour des raisons différentes : simulation d'une zone tropicale semi-aride au nord-est de l'Amérique du Sud (CanESM2) qui n'existe pas dans les observations et sur-estimation de la surface tropicale semi-aride en Argentine (GISS-E2-R). Avec les autres modèles, **la représentation des deux principales zones tropicales semi-arides en Amérique du Sud est généralement peu performante** : la région à l'Est du Brésil n'est pas représentée par la moitié des modèles de l'ensemble, celle du contrefort andin est systématiquement sous-estimée.

Enfin, la surface tropicale semi-aride est systématiquement sur-estimée dans la région NordAmérique, dans laquelle la dispersion entre les modèles est la plus élevée parmi les six régions. Cette sur-estimation s'explique par la simulation d'une zone tropicale semi-aride dans le bassin caribéen et l'Amérique centrale, qui n'existe pas dans les données du CRU. Cette sur-estimation masque en outre la tendance des modèles à sous-estimer la surface tropicale semi-aride observée à partir des données du CRU, au Mexique dans le sud des Etats-Unis.

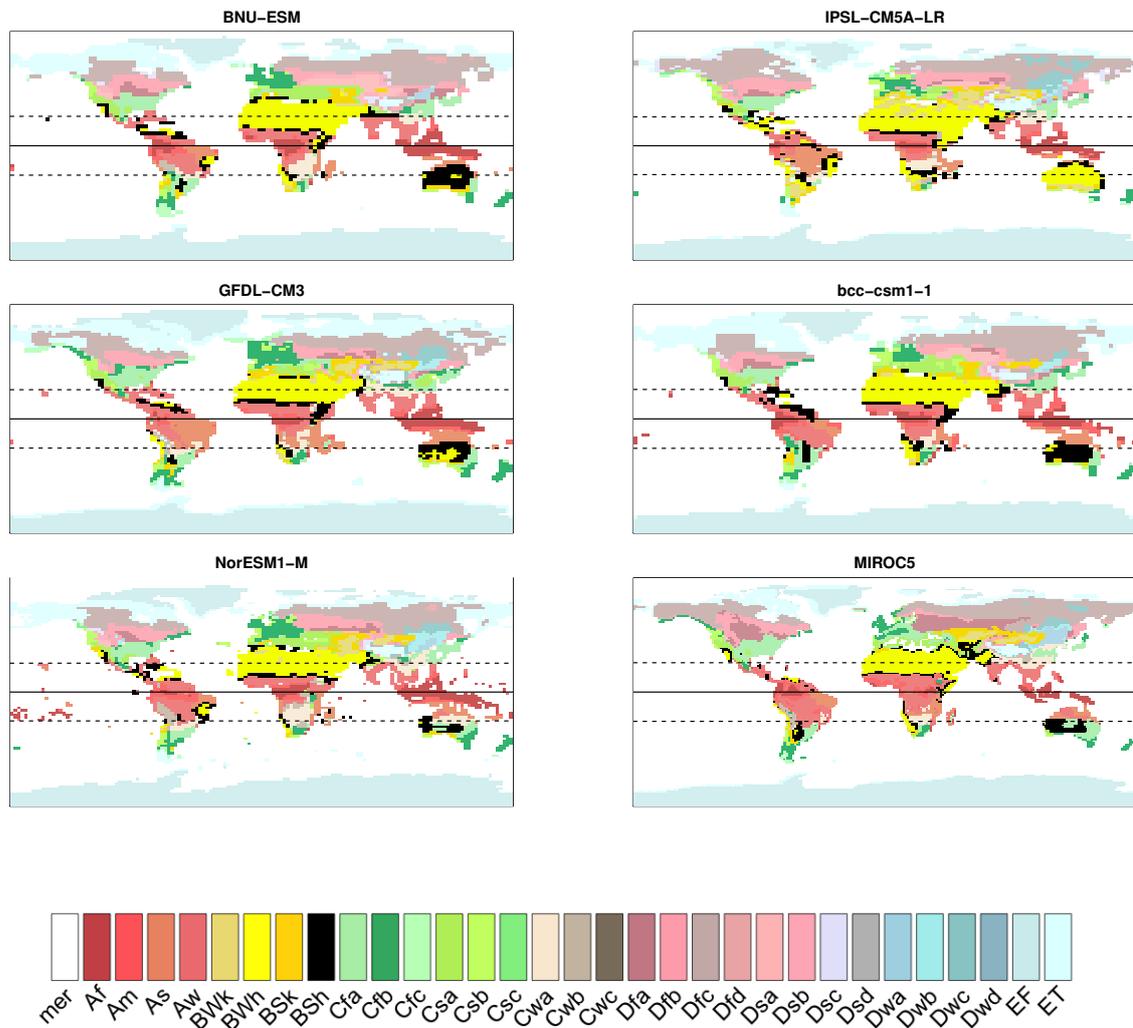


FIGURE 2.10 – *Paysage bioclimatique selon la classification de Köppen pour la fin du 20^e siècle (période moyenne 1987-2001). Chaque modèle est traité séparément, à sa résolution d'origine (pas de regrillage). Les lignes horizontales pleines et pointillées représentent respectivement l'équateur et les tropiques.*

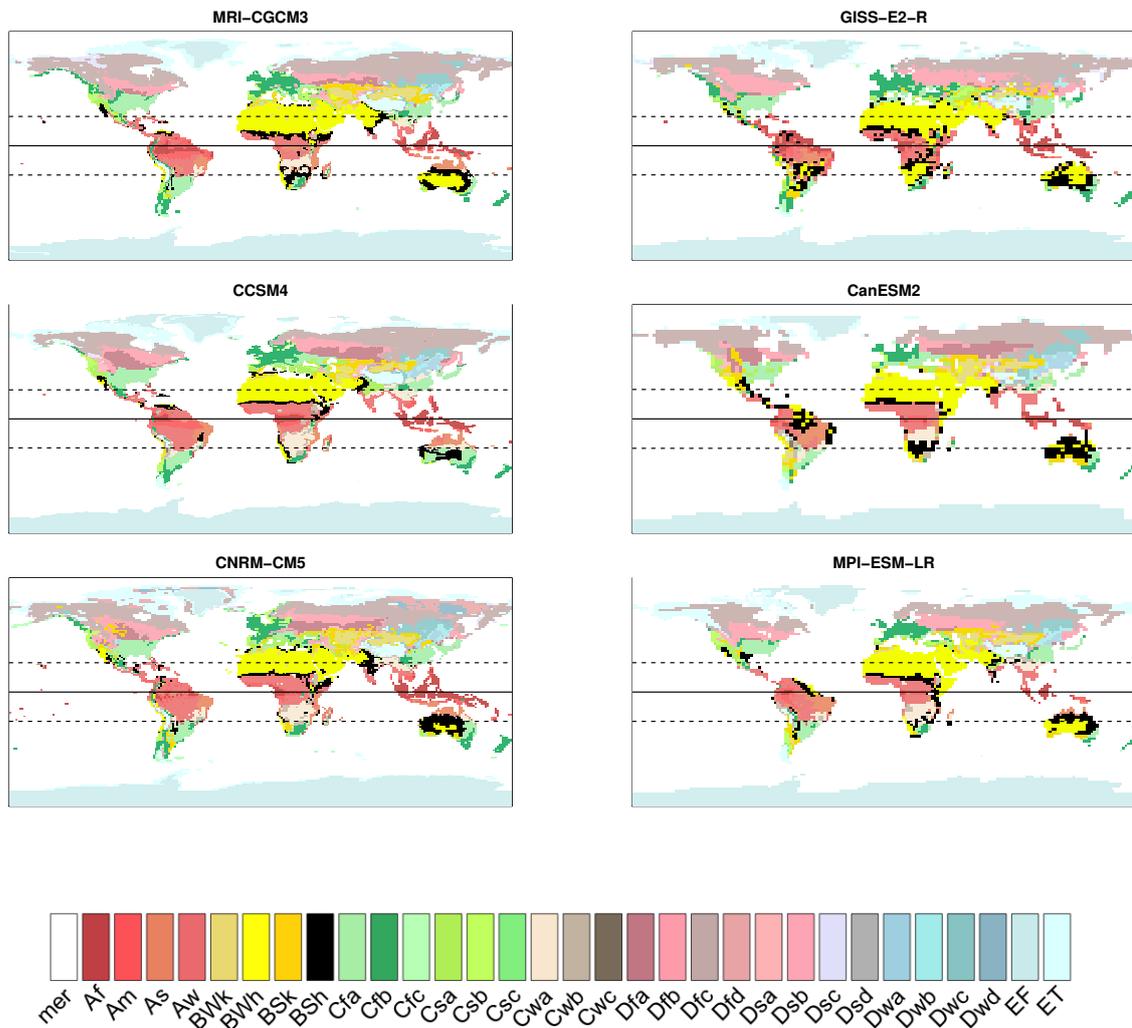


FIGURE 2.10 – suite : Paysage bioclimatique selon la classification de Köppen pour la fin du 20^e siècle (période moyenne 1987-2001). Chaque modèle est traité séparément, à sa résolution d'origine (pas de regrillage). Les lignes horizontales pleines et pointillées représentent respectivement l'équateur et les tropiques.

	Minimum	Moyenne	Maximum	Surface CRU
NordAmérique	635 <i>MRI-CGCM3</i>	1229	2697 <i>CanESM2</i>	590
NordAfrique	1824 <i>IPSL-CM5A-LR</i>	2846	3744 <i>GFDL-CM3</i>	2968
Asie	415 <i>GFDL-CM3</i>	861	1628 <i>CNRM-CM5</i>	1178
SudAmérique	268 <i>CCSM4</i>	1210	2873 <i>CanESM2</i>	945
SudAfrique	391 <i>NorESM1-M</i>	1291	2560 <i>GISS-E2-R</i>	2064
Océanie	562 <i>IPSL-CM5A-LR</i>	3189	5265 <i>BNU-ESM</i>	2768

TABLE 2.5 – *Surface totale tropicale semi-aride par grande région à la fin du 20^e siècle.* Le découpage régional correspond à celui indiqué sur la figure 2.7. Les surfaces sont données en milliers de km², calculées sur l'ensemble des résultats obtenus séparément avec les données issues de chaque modèle. Les modèles montrant les résultats extrêmes sont indiqués dans les cases correspondantes. La colonne de droite indique la surface obtenue avec les données du CRU.

► En résumé, les modèles identifient bien l'existence de la plupart des régions tropicales semi-arides, mais montrent une forte dispersion dans l'estimation de leurs surfaces. En raison des surfaces impliquées, les régions SudAfrique et Océanie sont les régions dans lesquelles les plus grands écarts de surface entre les modèles et par rapport aux observations sont obtenus. Sur le continent américain, l'est du Brésil et le bassin caribéen sont les deux principales zones de divergence. La région sahélienne est globalement bien représentée par les modèles.

Les différences de résolution entre les modèles et avec les données du CRU compliquent la visualisation des différences sur les cartes et augmentent l'incertitude dans les estimations de surface régionale.

NB : La remarque méthodologique faite à la fin de la section précédente (section 1.3.1) s'applique également ici : la comparaison entre les résultats obtenus avec les modèles et avec les données du CRU est effectuée à partir d'un seul intervalle de 15 ans, en négligeant une partie de la variabilité interannuelle. Ce choix permet de donner des estimations des différences, et de les discuter à partir des cartes de classification climatique établies pour ces périodes de référence.

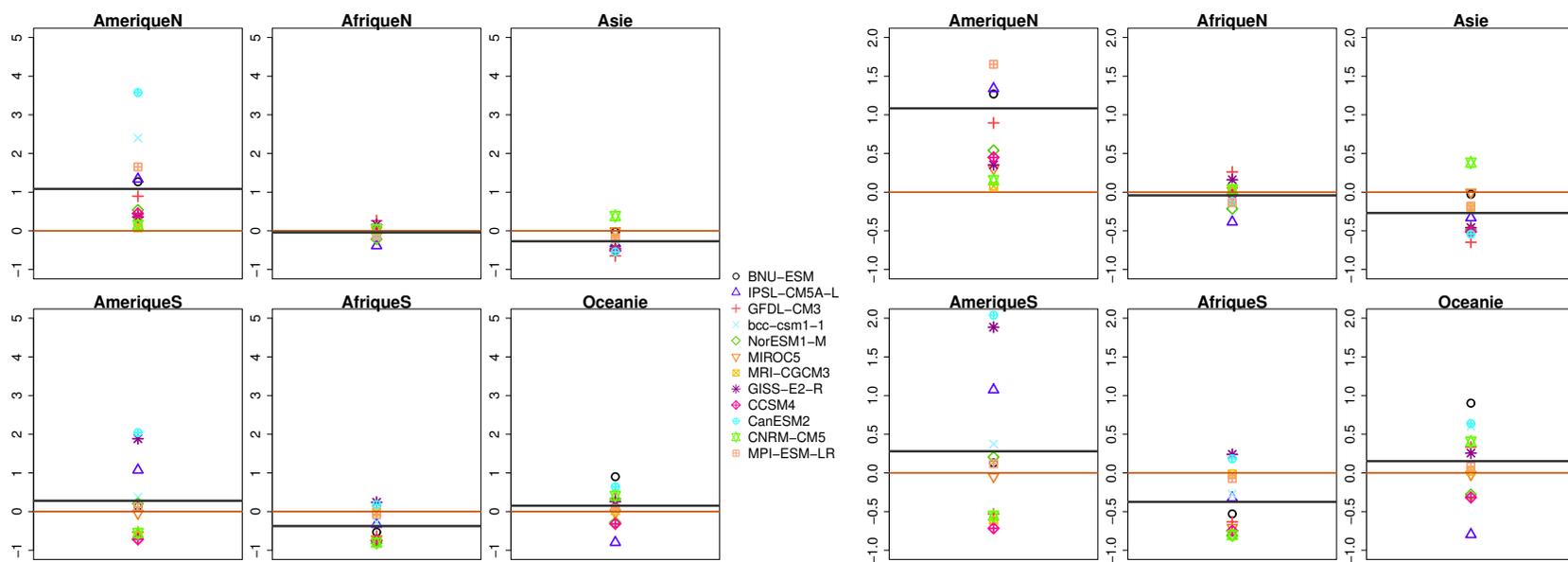


FIGURE 2.11 – *Anomalies de surface semi-aride chaude totale régionale par modèle par rapport à la surface obtenue à partir des données du CRU, pour la période 1987-2001. Les résultats sont donnés pour six régions du globe (voir figure 2.7). Les valeurs en ordonnées sont normalisées par rapport à celles du CRU. Les lignes horizontales gris foncé et orangée représentent respectivement la moyenne des valeurs obtenues pour les modèles, et la valeur valeur de référence (0). A gauche sont représentés tous les modèles (12) de l'ensemble. A droite les ordonnées sont restreintes le long de l'axe des ordonnées (bornes (-1;2)) pour zoomer sur le groupe des modèles cohérents entre eux, masquant donc, pour la région Amérique du Nord, les modèles CanESM2 et bcc-csm1-1 qui donnent des valeurs extrêmes.*

Tendance à l'augmentation de la surface tropicale semi-aride

Les résultats obtenus à partir des sorties de modèles montrent également une tendance à l'augmentation de la surface totale semi-aride chaude à la fin du 20^e siècle, à l'instar des résultats obtenus à partir des données du CRU. La tendance est visible pour au moins 6 des 12 modèles analysés (figure 2.12).

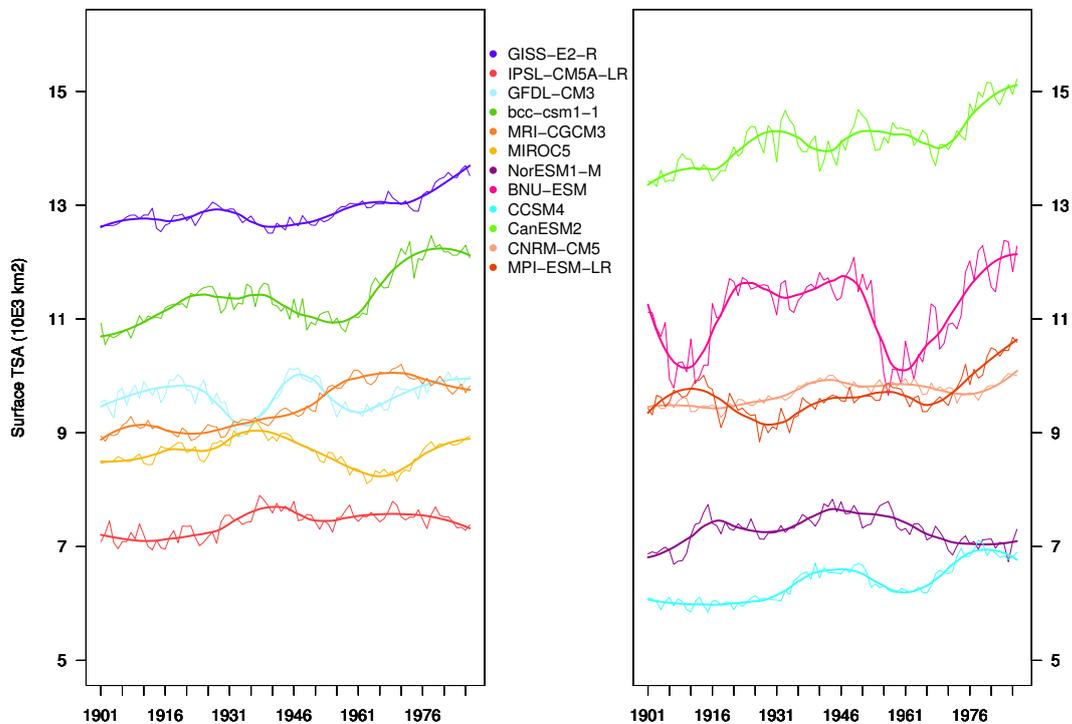


FIGURE 2.12 – *Evolution de la surface totale tropicale semi-aride (TSA) calculée pour chaque modèle sur la série des moyennes glissantes par 15 ans. Les ordonnées sont exprimées en milliers de km². La courbe de lissage est obtenue à partir d'une régression loess (comme pour la figure 2.8). Les modèles ont été arbitrairement répartis en deux sous-groupes sur la figure, afin de faciliter la lecture.*

Au début du 20^e siècle, la proportion du domaine tropical semi-aride strictement localisée au sein de la ceinture tropicale est de 69% en moyenne sur l'ensemble des modèles, donc du même ordre que les résultats obtenus à partir des observations du CRU. Cette proportion diminue à la fin du siècle selon tous les modèles sauf deux (GISS-E2-R et MRI-CGCM3, figure 2.13) à 67% en moyenne. **Les résultats obtenus à partir des sorties de modèles représentent donc bien l'évolution du rapport de surface tropicale et subtropicale dans le domaine tropical semi-aride entre le début et la fin du 20^e siècle.**

Faible élargissement zonal du domaine tropical semi-aride au cours du 20^e siècle

La limite nord d'extension du domaine tropical semi-aride (75% de la surface), si elle montre une forte disparité entre les modèles, est néanmoins incluse dans l'intervalle de variation des valeurs obtenues à partir des données du CRU (18-32°N, figure 2.9,

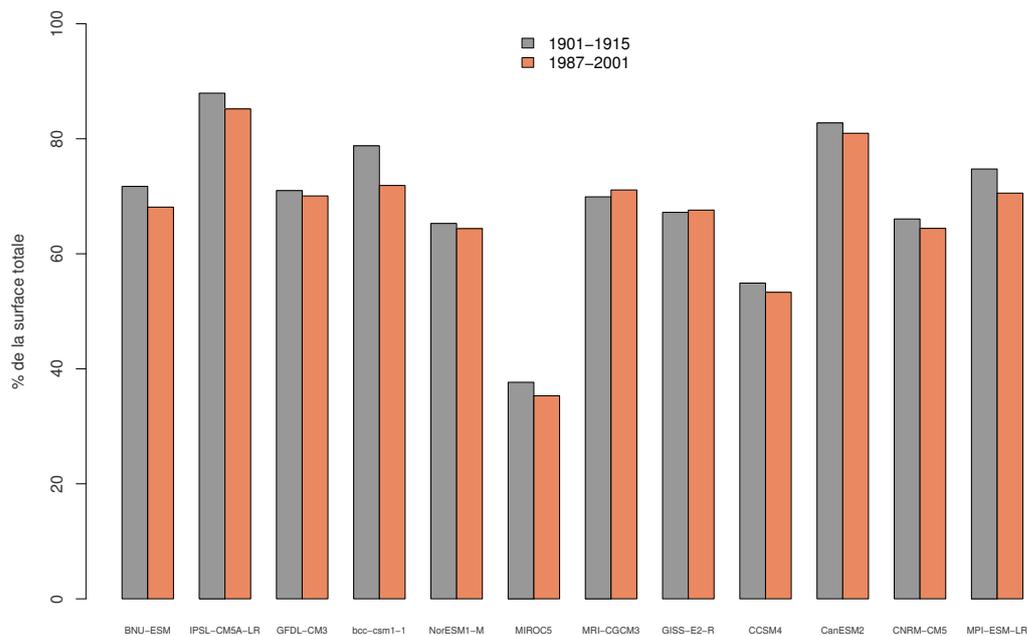


FIGURE 2.13 – *Evolution de la proportion strictement tropicale du domaine tropical semi-aride global entre le début et la fin du 20^e siècle, pour l'ensemble des modèles.*

et représentation de ces limites par les lignes horizontales pointillées sur la figure 2.14) pour 7 à 9 modèles sur 12. Le positionnement extrême de cette limite pour un modèle (MIROC) peut être expliqué par la surestimation de la surface tropicale semi-aride dans la région moyen-orientale, subtropicale, associée à une valeur relativement faible de la surface analogue dans les régions tropicales (Sahel, Afrique de l'est, Amérique centrale), comme on peut l'analyser à partir des figures 2.10 et 2.11. **Les résultats obtenus à partir des sorties de modèles représentent donc correctement, pour la majeure partie des modèles de l'ensemble, la limite nord telle que 75% du domaine tropical semi-aride de l'hémisphère Nord soit compris entre cette limite et l'équateur.**

Cependant, deux modèles seulement (MPI-ESM-LR et bcc-csm1-1) montrent une augmentation de la courbe d'évolution de la limite d'extension du domaine à la fin du siècle (figure 2.14). Trois modèles (BNU-ESM, GFDL-CM3 et CNRM-CM5) ne montrent même aucune variation de cette limite de latitude. Quant aux résultats pour l'hémisphère Sud, non présentés ici, ils ne manifestent aucune variabilité de la limite sud d'extension du domaine tropical semi-aride. **Les résultats obtenus à partir des sorties de modèles échouent donc à représenter la migration vers le nord de la limite incluant 75% du domaine tropical semi-aride.** Une raison de cet échec peut être un défaut des modèles pour représenter cette zone climatique, mais ce n'est pas la seule : la résolution des modèles est beaucoup plus grossière que celle des observations, ce qui accentue l'incertitude sur les estimations en degrés de latitude. Toutefois, d'autres tests réalisés avec des valeurs plus importantes de la proportion de surface concernée (par exemple, limite nord telle que la surface tropicale semi-aride incluse entre cette limite et l'équateur représente 85% du domaine total pour cette hémisphère) révèlent que certains modèles

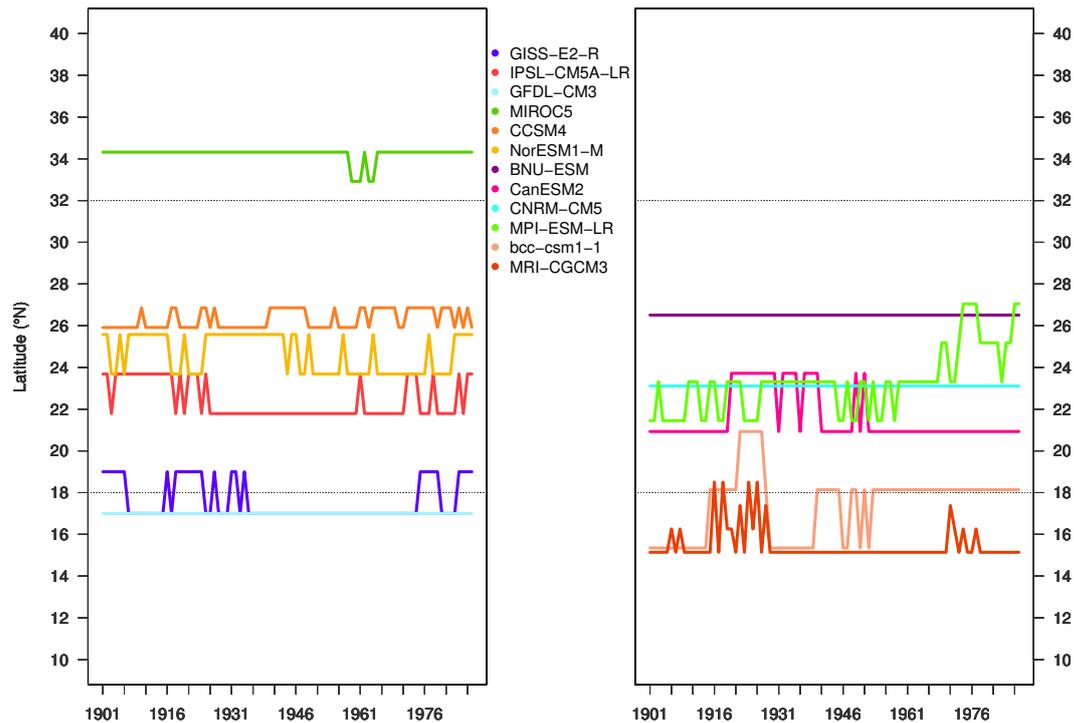


FIGURE 2.14 – *Evolution de la limite zonale incluant 75% de la surface totale classée chaude semi-aride à partir des sorties de modèles, pour l'hémisphère Nord, sur la série des moyennes glissantes par 15 ans. Les modèles ont été arbitrairement répartis en deux sous-groupes sur la figure, afin de faciliter la lecture. Cette figure est à rapprocher de la figure 2.9, construite de la même façon à partir des données d'observations du CRU. Les lignes horizontales pointillées indiquent les valeurs minimale et maximale obtenues à partir des données du CRU. Attention : les couleurs sont différentes de celles de la figure 2.12 pour limiter les superpositions sur le graphique.*

montrent une tendance à la migration de ces nouvelles limites. C'est ainsi le cas des modèles CCSM4, BNU-ESM, bcc-csm1-1, CNRM-CM5 et GISS-E2-R pour la limite 85% (figure A1 en annexe). Ceci montre que **l'extension se produit bien, mais qu'elle est plus faible qu'avec les données d'observations**. En outre, le tracé de la limite d'extension maximale, pour l'hémisphère Nord, du domaine tropical semi-aride montre qu'elle atteint les mêmes valeurs en début et en fin de siècle, pour la majorité des modèles (figure A2 en annexe) pour au moins 8 modèles sur 12. **L'augmentation de la surface de ce domaine se produit, selon les résultats obtenus à partir des modèles comme à partir des observations, sans modification de ses limites extrêmes.**

L'élargissement de la circulation de Hadley dans la seconde moitié du 20^e siècle a été démontrée avec différents jeux d'observations, comme il est rapporté par Johanson et Fu (2009). Cependant, ce phénomène n'est pas, ou plus faiblement, reproduit par les modèles de climat (Johanson et Fu, 2009; Hu et Fu, 2007; Seidel *et al.*, 2008). Les résultats obtenus ici corroborent donc ceux des autres travaux rapportés dans la littérature.

► Les modèles capturent globalement bien la position des zones semi-arides chaudes à la fin du 20^e siècle, malgré des variations importantes notamment en Amérique du Nord et du Sud. En outre, ils représentent correctement, pour la plupart, le positionnement de la limite latitudinale telle que 75% du domaine tropical semi-aride total de l'hémisphère Nord soit incluse entre cette limite et l'équateur. La limite maximale d'extension de ce domaine reste fixe entre le début et la fin du siècle, comme avec les résultats obtenus à partir des observations. A l'intérieur de cette limite, les modèles représentent, dans l'ensemble, l'augmentation de la surface totale du domaine tropical semi-aride à la fin du 20^e siècle, quoique dans une proportion plus faible que celle estimée à partir d'observations.

Enfin, la migration vers le pôle de la limite délimitation du domaine tropical semi-aride est observée seulement de manière marginale, pour une minorité de modèles. Ce résultat mitigé est cohérent avec les résultats de la littérature démontrant une tendance des modèles à sous-estimer (Seidel *et al.*, 2008) l'élargissement observé de la circulation de Hadley.

→ Les résultats obtenus en appliquant la classification aux données issues de modèles permettent de représenter la répartition géographique globale du domaine tropical semi-aride et de reproduire l'accroissement de sa surface à la fin du 20^e siècle. Leur performance pour reproduire l'élargissement subtropical de ce domaine est plus limitée, mais reste cohérente avec les résultats de la littérature. Par conséquent, le choix de la méthode et des données est approprié pour explorer l'évolution futur du domaine tropical semi-aride.

2.4 Application aux projections pour le 21^e siècle

Pour analyser l'évolution future des zones chaudes semi-arides, nous utilisons les sorties de modèles obtenues pour les projections climatiques futures. Nous comparons le paysage bioclimatique de la fin et du début du 21^e siècle en restant « dans le monde des modèles ».

2.4.1 Tendances à l'accroissement de la surface semi-aride chaude corrélée au réchauffement global

La tendance est à un accroissement global de la surface chaude semi-aride

De la même façon que dans la section précédente, la surface totale occupée par le domaine tropical semi-aride global est calculée, pour chaque modèle, sur l'ensemble de la série temporelle des moyennes glissantes. Cette fois-ci, la série temporelle couvre, en plus du 20^e siècle, toute l'étendue du 21^e siècle selon les trois scénarios RCP utilisés. Dans la suite, ces scénarios seront représentés sur toutes les figures selon le même code coloré : respectivement en bleu, vert et rouge pour les RCP 2.6, 4.5 et 8.5. Ces RCP couvrent précisément la période 2006-2100. Les résultats pour la période historique couvrent la période 1901-2005. L'évolution de la surface tropicale semi-aride globale ainsi calculée est tracée séparément pour chaque modèle et chaque scénario (figure A3, en annexe), et synthétisée par l'intervalle de dispersion (quantiles 1 et 3) et la moyenne des valeurs obtenues sur l'ensemble des modèles, sur la série temporelle 1901-2100 (figure 2.15).

L'augmentation de surface à la fin du 20^e siècle obtenue avec une majorité de modèles à la section précédente est bien représentée par la moyenne des résultats obtenus sur l'ensemble des modèles (figure 2.15, courbe noire et aplats grisés). Les profils moyens obtenus pour le 21^e siècle montrent que cette augmentation se poursuit au début de ce siècle, pour les trois scénarios (figure 2.15, courbes et aplats bleus, verts et rouges). Cette tendance s'infléchit dès la période 2016-2030 pour le RCP 2.6, un peu plus tard (2042-2056) pour le RCP 4.5, tandis qu'elle se poursuit de façon quasi-linéaire pour le RCP 8.5 jusqu'à la fin du siècle. Cette tendance globale est visible à l'échelle de chaque modèle (figure A3, en annexe), quoique pour des niveaux variables de surface, conformément à la dispersion déjà observée avec la figure 2.12 pour la période historique. La comparaison de la surface moyenne obtenue en fin de 21^e siècle (période moyenne 2086-2100) à celle obtenue en fin de 20^e siècle (période moyenne 1987-2001) montre une augmentation nette pour chaque scénario respectivement de +14%, +19% et +38%. Les valeurs des quantiles 1 et 3 sont indiquées dans le tableau 2.6, partie a).

Si cette tendance à l'accroissement est continue sur l'ensemble du 21^e siècle pour le RCP 8.5, ce n'est pas le cas pour les deux autres scénarios, pour lesquels la tendance s'affaiblit avant 2100. En effet, le gain de surface réalisé entre le début et la fin du 21^e siècle est atteint dès le milieu du siècle pour le RCP2.6, sans augmentation supplémentaire par la suite (tableau 2.6a). Pour les RCP 4.5 et 8.5, en revanche, cette augmentation se poursuit après 2050-2065, de façon plus marquée pour le RCP 8.5.

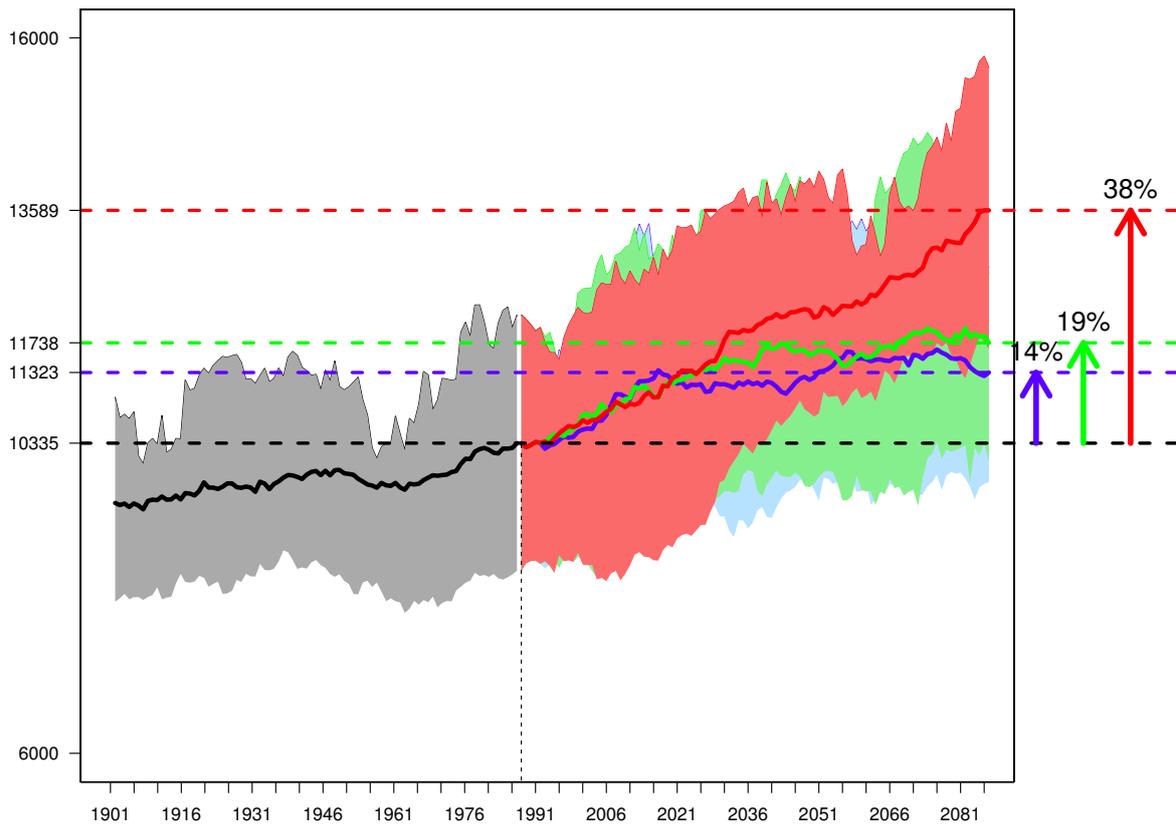


FIGURE 2.15 – *Evolution de la surface totale chaude semi-aride selon les simulations de modèles pour la période « historique » (1901-2005, en noir), et pour la période « future » (2006-2100) pour trois scénarios (RCP 2.6, 4.5 et 8.5 respectivement en bleu, vert et rouge). Les résultats sont présentés pour l'ensemble des modèles : les courbes pleines figurent la moyenne obtenue sur l'ensemble des modèles, et l'aplatissement coloré montre la dispersion de cet ensemble (quantiles 1 et 3). Les ordonnées sont exprimées en milliers de km².*

scenario	2050-2065				2086-2100			
a) GLOBE	quant1	mean (sigma)	%1987-2001	quant3	quant1	mean (sigma)	%1987-2001	quant3
RCP 2.6	401	1002 (744)	14%	1399	527	988 (617)	14%	1325
RCP 4.5	933	1307 (556)	16%	1662	805	1403 (924)	19%	1945
RCP 8.5	1520	1560 (465)	19%	1975	2715	3254 (1078)	38%	3717
scenario	2050-2065				2086-2100			
b) TROPICS	quant1	mean (sigma)	%1987-2001	quant3	quant1	mean (sigma)	%1987-2001	quant3
RCP 2.6	216	425 (363)	9%	618	223	409 (269)	6%	484
RCP 4.5	278	459 (382)	10%	713	152	326 (566)	9%	578
RCP 8.5	235	490 (363)	13%	795	808	1020 (487)	23%	1326
scenario	2050-2065				2086-2100			
c) EXTRA-TROPICS	quant1	mean (sigma)	%1987-2001	quant3	quant1	mean (sigma)	%1987-2001	quant3
RCP 2.6	141	576 (504)	33%	905	122	579 (548)	27%	910
RCP 4.5	654	848 (371)	33%	1019	526	1076 (616)	46%	1384
RCP 8.5	855	1291 (551)	51%	1554	2234	2209 (944)	80%	2791

TABLE 2.6 – *Changement net de surface totale chaude semi-aride entre la fin du 21^e siècle et la fin du 20^e siècle d'après l'ensemble de 12 modèles extraits de l'exercice CMIP5. Toutes les valeurs de surface sont exprimées en milliers de km². Les pourcentages d'augmentation à la moitié et à la fin du 21^e siècle sont calculés par rapport à la surface obtenue à la fin du 20^e siècle.*

L'accroissement de la surface chaude semi-aride est corrélé au réchauffement global

L'augmentation de la surface du domaine tropical semi-aride est donc continue au cours du 21^e siècle pour le RCP 8.5, et au début de ce siècle pour les RCP 2.6 et 4.5. Les RCP sont notamment caractérisés par le niveau de réchauffement global atteint à la fin du 21^e siècle et par le profil de température global au cours de ce siècle : augmentation continue pour le RCP 8.5 et stabilisation à un niveau de réchauffement inférieur pour les RCP 4.5 et 2.6 avant la fin du siècle.

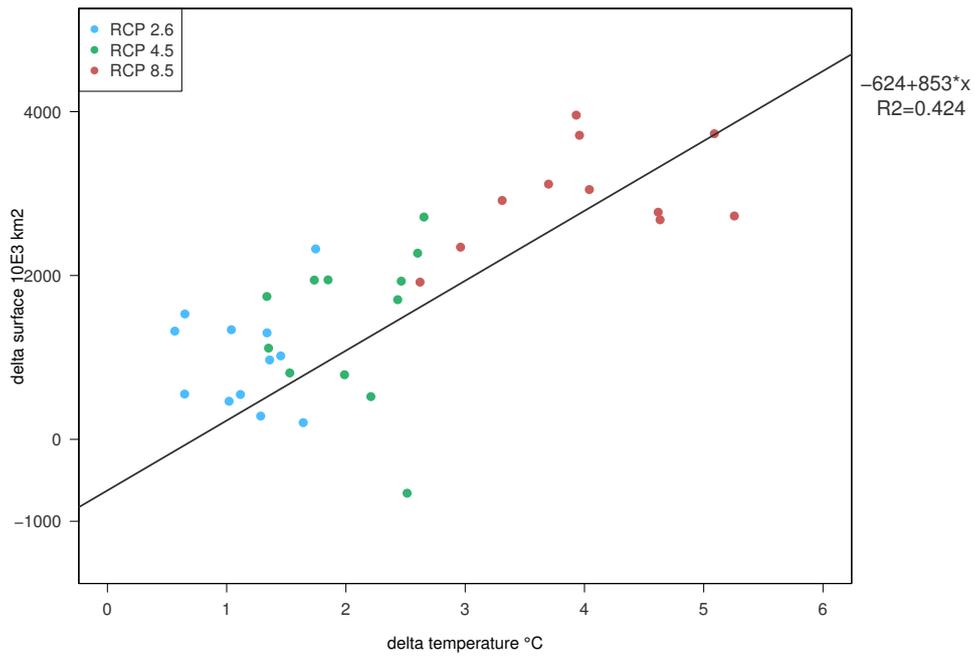
Ces profils sont analogues aux profils de réchauffement global de chaque RCP, ce qui suggère une corrélation directe entre le réchauffement global et l'augmentation nette de surface tropicale semi-aride. Cette hypothèse est testée en traçant le diagramme de dispersion des différences nettes de surface tropicale semi-aride entre le début et la fin du 21^e siècle en fonction du réchauffement global net, calculé entre les mêmes périodes (figure 2.16). Par définition, le réchauffement global est voisin de 1 °C, de 3 °C et de 4 °C respectivement pour les RCP 2.6, 4.5 et 8.5, ce qui détermine le positionnement horizontal des points associés à chaque RCP sur le diagramme. La régression linéaire entre l'augmentation nette de surface par modèle et par scénario, et l'augmentation nette de température moyenne globale aboutit à un coefficient de régression égal à 0.424. Cet accroissement global surface est donc bien directement corrélé au réchauffement global.

Cette corrélation n'est cependant pas retrouvée uniformément dans toutes les régions du globe. En effet, les diagrammes analogues, tracés séparément pour les zones tropicales et subtropicales (figure 2.16b), montrent que la relation est conservée dans la région subtropicale, avec un bon coefficient de régression (0.61), mais très affaiblie dans la région tropicale, où le coefficient directeur est plus faible (177 au lieu de 559.10e3 km² / °C dans la région subtropicale) et le coefficient de régression très faible. Qui plus est, le niveau d'augmentation de surface tropicale semi-aride atteint à la fin du siècle dans la ceinture tropicale est inférieur à celui atteint dans la zone subtropicale : respectivement +6%, +9% et +23% en moyenne sur l'ensemble des modèles pour les RCP 2.6, 4.5 et 8.5, dans la zone tropicale, au lieu de +27%, +46% et jusqu'à +80% dans la zone subtropicale (tableau 2.6b-c). Dans le cas du RCP 2.6, cependant, l'augmentation de surface en termes absolus est plus importante dans la région tropicale, contrairement aux RCP 4.5 et 8.5 pour lesquels augmentations absolue et relative sont supérieures en-dehors des tropiques. **Dans un niveau de réchauffement mondial, ce ne sont donc pas les zones tropicales qui connaîtront le plus fort changement en termes de surface tropicale semi-aride.**

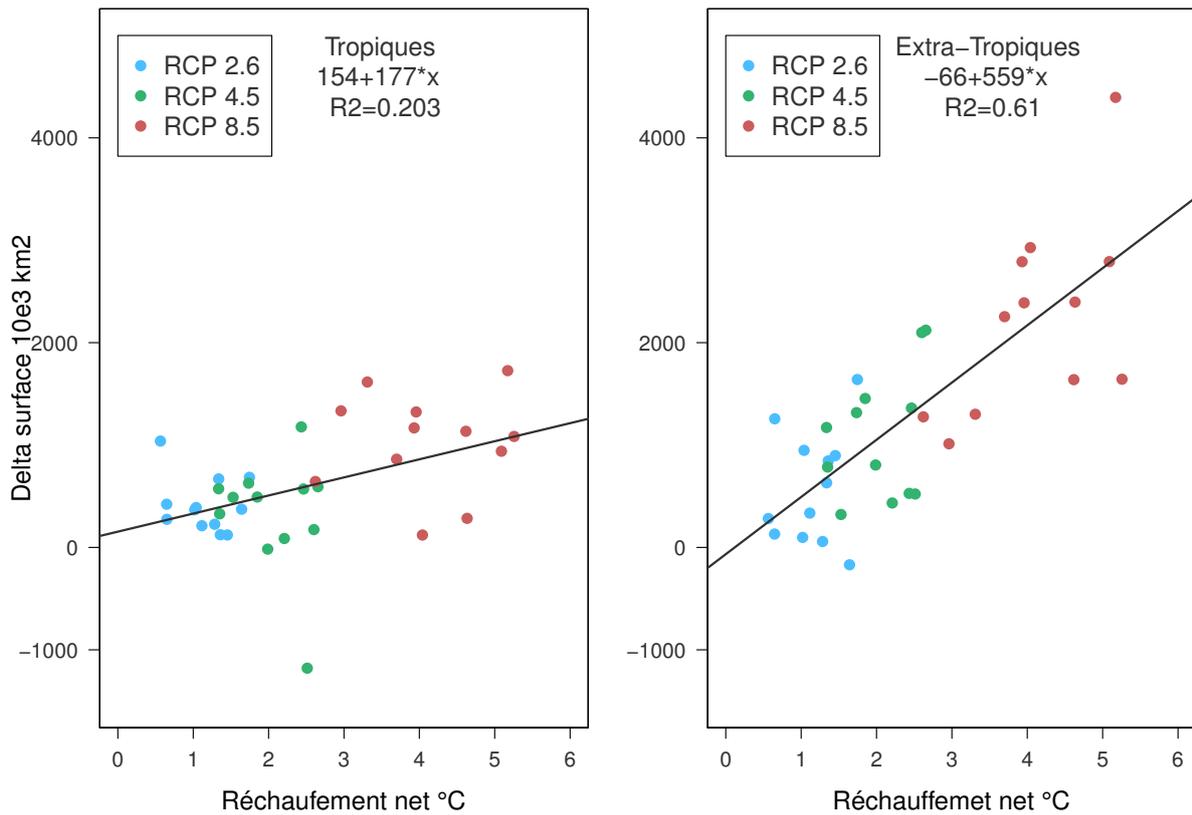
Les deux extrêmes sur les graphiques correspondent au modèle BNU, pour lequel la surface tropicale semi-aride diminue entre les périodes historique et future selon le RCP 4.5, principalement dans la zone tropicale, et CanESM, pour lequel cette surface connaît l'augmentation la plus forte en-dehors de la zone tropicale, selon le RCP 8.5.

► Les projections d'évolution de la surface totale semi-aride chaude au cours du 21^e siècle montrent que cette surface va s'accroître au cours du siècle. Directement corrélé au réchauffement climatique global, cet accroissement se poursuivra jusqu'en 2100 d'après le RCP 8.5 (+38%), tandis qu'il s'infléchira pour le RCP 4.5(+19%), voire se stabilisera pour le RCP 2.6 (+14%). Cependant, cet accroissement de surface se produit de manière hétérogène, plus important dans la zone subtropicale.

→ L'augmentation globale du domaine tropical semi-aride selon les scénarios futurs



(a) Echelle globale



(b) Séparation des zones tropicale (à gauche) et subtropicale (à droite)

FIGURE 2.16 – *Diagramme de dispersion de la différence nette de surface tropicale semi-aride globale en fonction du réchauffement global net, entre les périodes 2086-2100 et 1987-2001. Chaque modèle est représenté une fois par scénario, et les scénarios sont représentés respectivement en bleu (RCP 2.6), vert (RCP 4.5) et rouge (RCP 8.5). Les ordonnées représentent des surfaces en milliers de km².*

ne se produit pas de manière homogène. L'analyse des disparités entre les zones tropicale et subtropicale va être approfondie dans la suite à l'échelle des hémisphères et des régions.

2.4.2 Nouvelle répartition des régions tropicales semi-arides

Hétérogénéité entre les hémisphères

Ainsi, pour les RCP 2.6 et 4.5, l'accroissement de surface semi-aride chaude observé à la fin du 21^e siècle est du même ordre de grandeur relatif pour chaque hémisphère : respectivement +14 et +17%, pour l'hémisphère Nord, et +13 et +20%, pour l'hémisphère Sud (figure 2.17). Néanmoins la dispersion de des valeurs obtenues pour l'ensemble multimodèle est nettement plus importante pour l'hémisphère Sud, tant pour la période historique que pour les trois scénarios RCP. Pour cet hémisphère, la variabilité interannuelle est également plus importante que celle obtenue pour l'hémisphère Nord.

Enfin c'est pour le RCP 8.5 qu'apparaît le plus grand écart d'augmentation de surface à la fin du 21^e siècle entre les deux hémisphères : de +26% en moyenne dans l'hémisphère Sud, elle atteint 52% en moyenne dans l'hémisphère Nord, même si l'importante dispersion inter-modèles affaiblit la significativité du résultat dans l'hémisphère Sud.

L'accroissement de surface est donc plus important, et plus homogène entre les modèles, au moins pour le RCP 8.5, dans l'hémisphère Nord. Dans l'hémisphère Sud, l'augmentation est peu différenciée entre les scénarios, et montre une très forte dispersion entre les modèles.

Hétérogénéité entre les régions

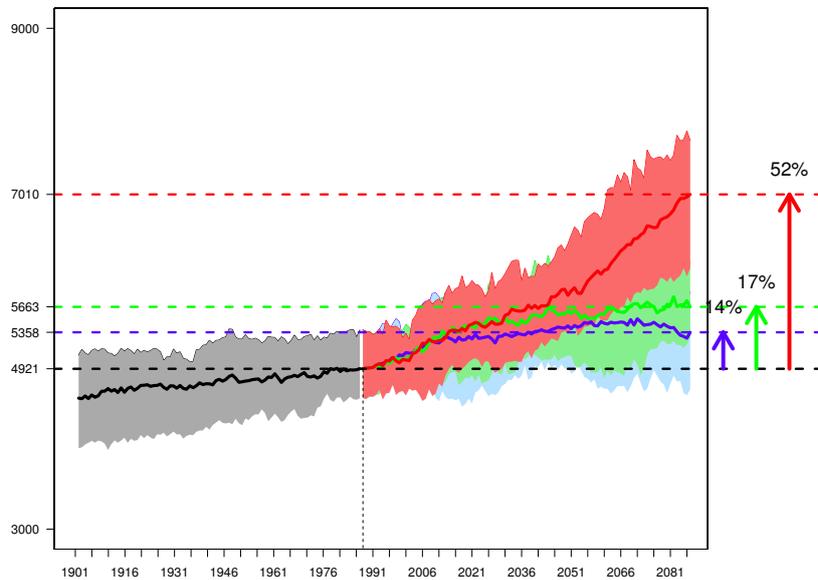
Au sein de chaque hémisphère, l'accroissement de surface est manifesté dans les trois grandes régions la composant (régions délimitées sur la figure 2.7, section 2.3). La figure 2.18-a représente ainsi l'augmentation relative de surface régionale entre la fin de la période historique (1987-2001 : point de départ commun aux trois scénarios) et la fin du 21^e siècle pour les trois RCP. Chaque boîte à moustache représente la dispersion entre les modèles.

Pour le RCP 8.5, les modèles montrent une augmentation de la surface tropicale semi-aride dans toutes les régions (plus de 75% de la distribution des modèles est au-dessus de 0, figure 2.18) sauf l'Océanie. Une augmentation plus faible (valeurs médianes et maximales inférieures) est obtenue pour le RCP 4.5 dans toutes les régions sauf l'Océanie et l'Asie. Pour le RCP 2.6, une augmentation analogue, mais encore inférieure, est obtenue pour les régions NordAmérique, NordAfrique et SudAfrique. Dans les trois autres régions, la divergence entre les modèles est plus importante, plus de 25% indiquant une diminution de surface. **De manière générale, la surface tend à augmenter dans toutes les régions, quoique de façon plus incertaine pour le RCP 2.6 et pour l'Asie, sauf pour la région Océanie. Pour cette région, les résultats divergent trop entre les modèles pour permettre de conclure.**

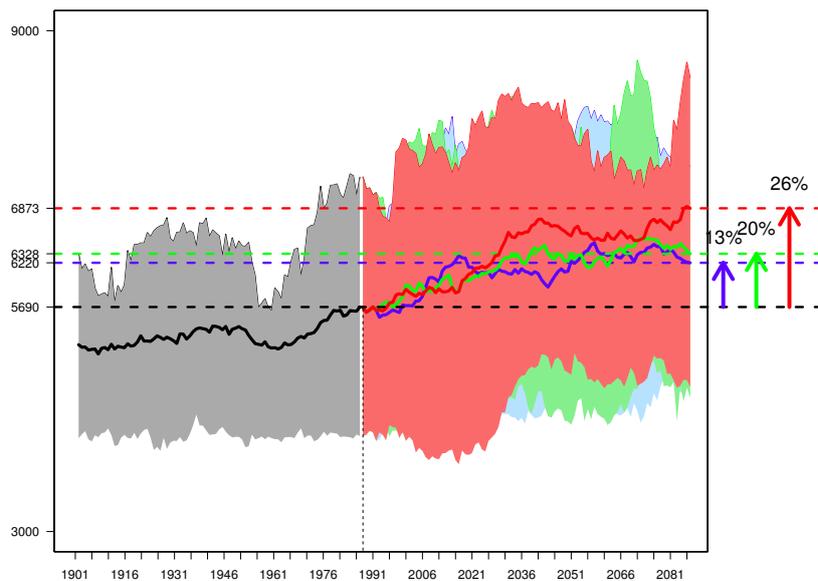
La dispersion entre les modèles est généralement plus importante pour le RCP 8.5, et en particulier dans les régions NordAmérique, SudAmérique et SudAfrique (figure 2.18).

Dans le cas du RCP 8.5, l'augmentation de surface en termes absolus (figure 2.18b) est la plus importante dans la région NordAfrique.

L'approche régionale montre donc que les résultats seront plus robustes en-dehors de la région Océanie, et que l'augmentation de surface sera la plus

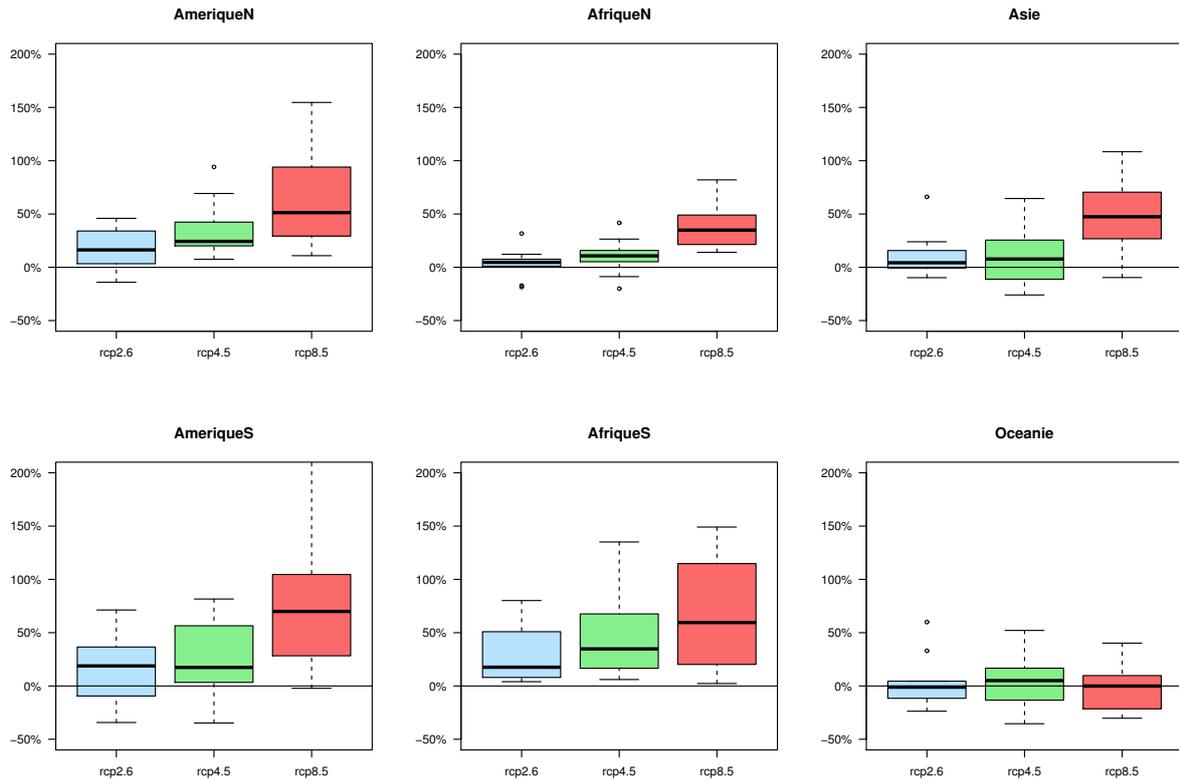


(a) hémisphère Nord



(b) hémisphère Sud

FIGURE 2.17 – *Evolution de la surface totale chaude semi-aride par hémisphère. Les courbes en gras montrent la moyenne multi-modèle, et les aplats colorés la dispersion multi-modèle (quantiles 1 et 3). Les pourcentages à droite expriment le gain de surface en 2086-2100 relatif à la surface en 1987-2001, pour la moyenne multi-modèle. Les couleurs bleu, vert et rouge représentent respectivement les RCP 2.6, 4.5, 8.5. Les surfaces en ordonnées (à gauche) sont exprimées en milliers de km²*



(a) Surface future en % de celle de 1987-2001

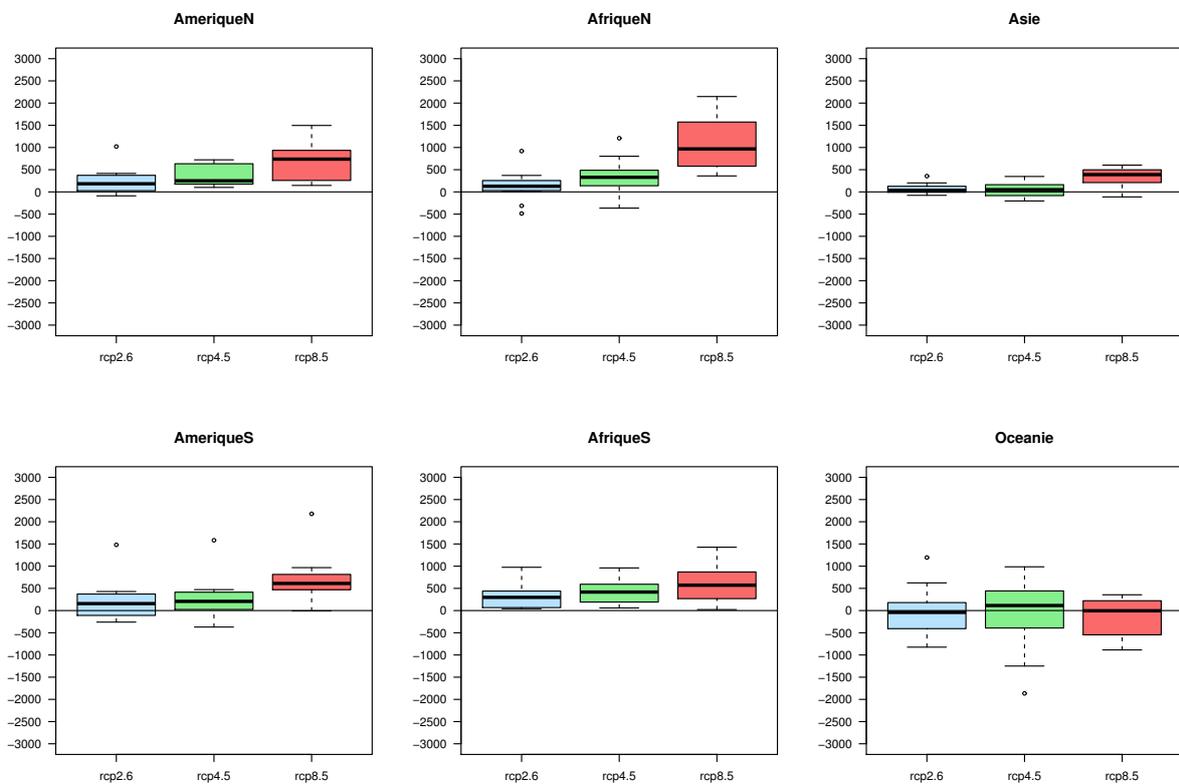
(b) Différence de surface entre 2086-2100 et 1987-2001, en milliers de km²

FIGURE 2.18 – *Changement de surface semi-aride chaude entre la fin du 21^e siècle et celle du 20^e siècle. Les régions sont traitées séparément, de manière à montrer les disparités régionales, tant en termes de signe que d'amplitude de changement relatif. Chaque boîte à moustache représente la dispersion entre les modèles.*

importante en Afrique du Nord, en valeur absolue, et en Amérique du Nord et du Sud et en Afrique du Sud, en valeur relative. La différence est très marquée entre le RCP 8.5 et les deux autres scénarios.

Hétérogénéité entre les latitudes

A l'intérieur même de ces régions, on observe des disparités zonales d'augmentation de la surface tropicale semi-aride.

La figure 2.19 compare la distribution de surface tropicale semi-aride en total par bandes de 5 degrés de latitude, pour la fin du 20^e siècle (1987-2001, en blanc), et pour la fin du 21^e siècle (2086-2100, en couleur). Pour le RCP 2.6, les différences entre les deux périodes sont peu remarquables, à l'exception d'une légère augmentation dans l'hémisphère Nord subtropical, où la médiane de la dispersion intermodèle est plus élevée dans la période future. Le même résultat est obtenu pour le RCP 4.5, de manière plus significative : c'est tout l'intervalle de dispersion (quantiles 1 et 3) qui est supérieur dans le futur, et cette augmentation est élargie à un intervalle zonal (jusqu'à 40-45 ° N) vers le nord. Dans l'hémisphère Sud, les valeurs médianes obtenues en bout de spectre de distribution zonale (25-35 ° S) sont plus élevées pour la période future, mais l'intervalle de dispersion intermodèle continue à chevaucher celui de la période historique. Les résultats sont encore plus marqués pour le RCP 8.5. Dans l'hémisphère Sud, la surface augmente en bout de spectre (30-35 ° S) de façon plus importante que pour les autres RCP avec lesquelles les intervalles de dispersion formés par les quantiles 1 et 3 se chevauchent. C'est néanmoins toujours dans l'hémisphère Nord que l'augmentation est la plus importante : la surface tropicale semi-aride s'accroît à partir de l'intervalle de latitude 15-20 ° N et sur toute la région subtropicale. A partir de 30-35 ° N la distribution future est nettement supérieure (intervalles de dispersion non chevauchants) à celle de la période historique. En outre, cette augmentation de surface se poursuit en-dehors du spectre historique et gagne jusqu'à l'intervalle 45-50 ° N.

A l'intérieur des limites tropicales, les différences entre les périodes historique et future sont moins significatives, quel que soit le RCP. Quelques traits communs apparaissent néanmoins : dans l'hémisphère Nord, les valeurs médianes des surfaces diminuent dans le futur, excepté pour l'intervalle 15-20 ° N. Dans l'hémisphère Sud, ces valeurs augmentent légèrement à proximité de l'équateur, et de façon plus marquée pour l'intervalle 10-15 ° S, malgré une très forte dispersion intermodèle. Ainsi, au sein de la ceinture tropicale, les évolutions montrées par les trois RCP vont dans le même sens, ne différant (peu) que par leur amplitude.

En conséquence, alors que 67% (en moyenne sur les modèles) de la surface tropicale semi-aride était comprise à l'intérieur de la ceinture tropicale à la fin du 20^e siècle, cette surface va s'étendre au-delà de la limite tropicale, de sorte qu'à la fin du 21^e siècle, d'après le RCP 8.5, seulement 58% de la surface tropicale semi-aride sera comprise à l'intérieur de la ceinture tropicale.

En adoptant la limite zonale incluant 75% de la surface globale chaude semi-aride comme marqueur de l'extension zonale de cette surface, la progression peut en être visualisée sur la figure 2.20.

Pour les trois RCP, la limite zonale montre une migration en direction des pôles dans l'hémisphère Nord. Cette migration se stabilise pour les RCP 2.6 (en bleu) et 4.5 (en vert), mais pas pour le RCP 8.5 (en rouge). Dans l'hémisphère Nord, la limite va ainsi progresser de 23.65 ° N (pour la moyenne multi-modèle) à la fin du 20^e siècle à 24.86 ° N,

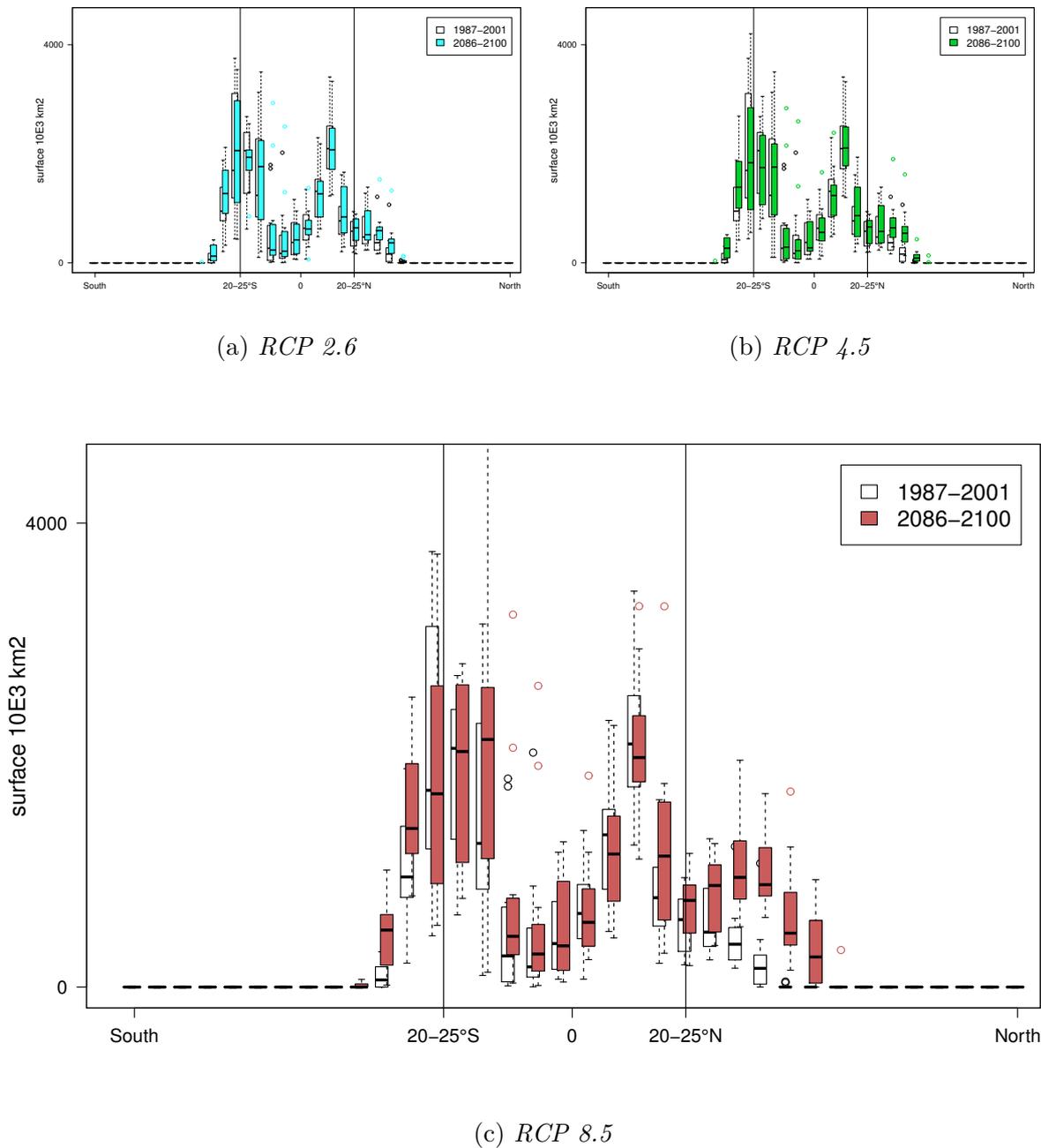


FIGURE 2.19 – *Distribution de la surface zonale pour l'ensemble des modèles entre les périodes historique et future. La fin du 21^e siècle (2086-2100) est en couleur, celle du 20^e siècle (1987-2001) en blanc. Les surfaces représentent la somme par bande de latitude de largeur 5 degrés, exprimées en milliers de km². Chaque boîte à moustache représente la dispersion entre les modèles, dont la médiane est matérialisée par un tiret noir.*

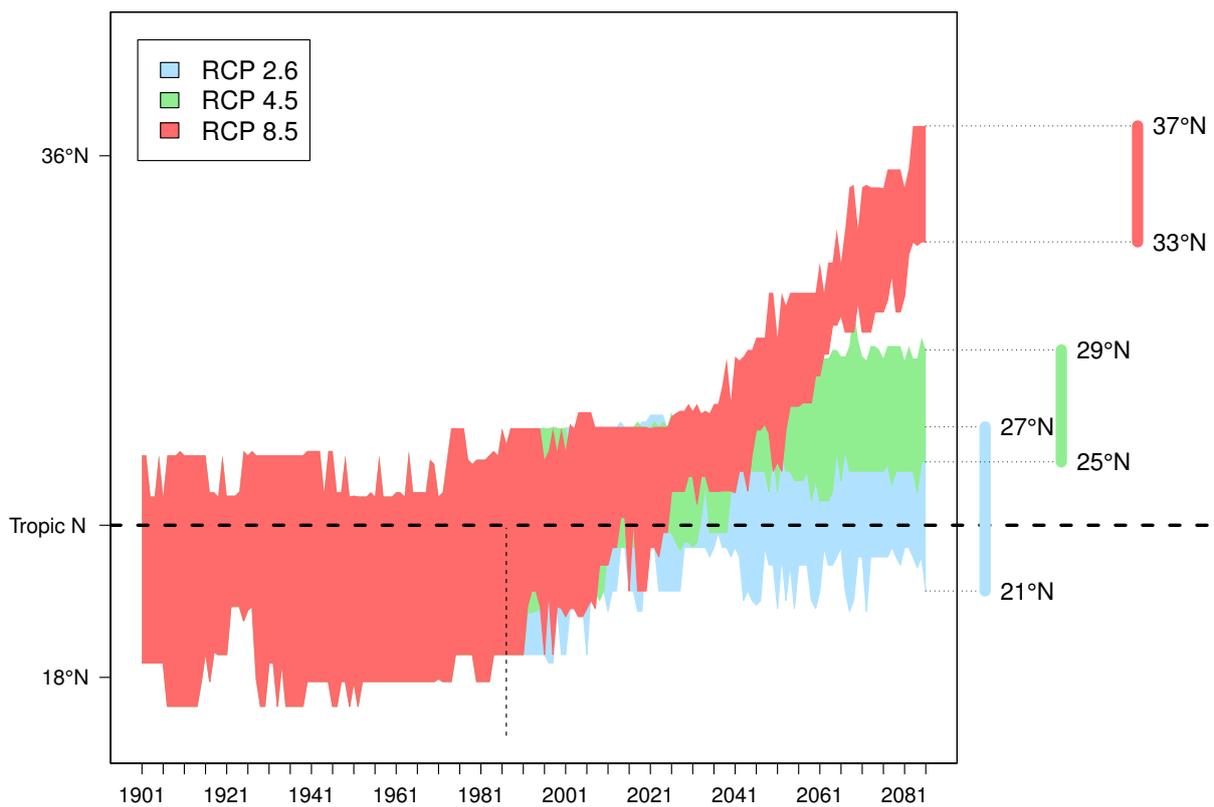


FIGURE 2.20 – *Evolution de la limite zonale incluant 75% de la surface tropicale semi-aride pour l'hémisphère Nord. Les RCP 2.6, 4.5 et 8.5 sont représentés respectivement en bleu, vert et rouge. L'aplat coloré représente la dispersion multi-modèle (quantiles 1 et 3). Les valeurs à droite expriment les valeurs de latitude atteintes par la limite d'extension zonale pour les quantiles 1 et 3 de l'ensemble multi-modèle à la fin du 21^e siècle (2086-2100)*

27.54 ° N, 34.81 ° N respectivement pour les RCP 2.6, 4.5 et 8.5 à la fin du 21^e siècle. Les résultats vont dans le même sens (migration vers le pôle sud) dans l'hémisphère Sud, mais de manière moins marquée et surtout soumise à une très forte dispersion intermodèle (non montré).

La surface tropicale semi-aride va donc s'accroître globalement, selon les trois scénarios étudiés. Cependant, les modifications sont plus marquées pour le scénario extrême, RCP 8.5. L'accroissement de surface se produira majoritairement dans l'hémisphère Nord, en-dehors de la zone tropicale. Par conséquent, on observera une migration vers le nord de la limite d'extension zonale de cette classe bioclimatique.

Nouvelle répartition géographique en accord avec l'hypothèse du déplacement futur de la circulation de Hadley

Nous proposons ici de visualiser cette transformation de la distribution zonale de la surface terrestre chaude semi-aride sur une carte représentant la moyenne de l'ensemble multi-modèle (figure 2.21). Une telle représentation est à manipuler avec précaution, puisqu'elle est obtenue à partir d'une climatologie moyenne (les moyennes multi-modèles des précipitations et des températures sont calculées séparément) difficile à interpréter, mais elle est efficace pour donner une idée rapide de l'allure de l'évolution du paysage bioclimatique. Nous proposons ici la carte de modification des zones chaudes semi-arides pour le RCP 8.5, qui montre un déplacement de +11 ° N dans l'hémisphère Nord.

Cette carte donne l'occasion de visualiser la position géographique approximative des principales aires d'accroissement du domaine tropical semi-aride, en gardant à l'esprit que la dispersion intermodèle n'est pas représentée. Dans l'hémisphère Sud, cet accroissement apparaît dans le sud de l'Australie (mais avec une faible significativité, du fait de la divergence entre les modèles, comme vu avec la figure 2.18), en Argentine, dans le nord-est brésilien et, surtout, en Afrique du Sud : cette dernière région explique l'augmentation de surface sur l'intervalle 25-30 ° S de la figure 2.19. Dans l'hémisphère Nord, les principales aires d'accroissement sont situées dans le bassin caribéen (incluant l'Amérique centrale et le nord du Vénézuéla), expliquant l'augmentation de surface sur l'intervalle 15-20 ° N (figure 2.19), le bassin méditerranéen et la région moyen-orientale, au-delà de 35 ° N. La région nord-américaine semi-aride chaude montre plutôt, sur cette carte moyenne, un déplacement vers l'est du domaine, tandis que les régions sahélienne, est-africaine et indo-pakistanaise démontrent une certaine stabilité.

La répartition géographique de ces aires d'accroissement du domaine tropical semi-aride à la fin du 21^e siècle (figure 2.21) est compatible avec le schéma théorique d'un élargissement de la circulation de Hadley (figure 2.22), tel que proposé dans l'AR5 (Collins *et al.*, 2013). Seule la région caribéenne semble située en-dehors des aires d'assèchement théoriquement projetées.

► La surface tropicale semi-aride va s'accroître globalement, selon les trois scénarios étudiés. Cependant, les modifications sont plus marquées pour le RCP 8.5. L'accroissement de surface se produira majoritairement dans l'hémisphère Nord, en-dehors de la zone tropicale. Par conséquent, on observera une migration vers le nord de la limite d'extension zonale de cette classe bioclimatique. Cet accroissement de surface est corrélé au réchauffement global, particulièrement en-dehors des tropiques. Il est de plus explicable par l'élargissement projeté de la circulation de Hadley.

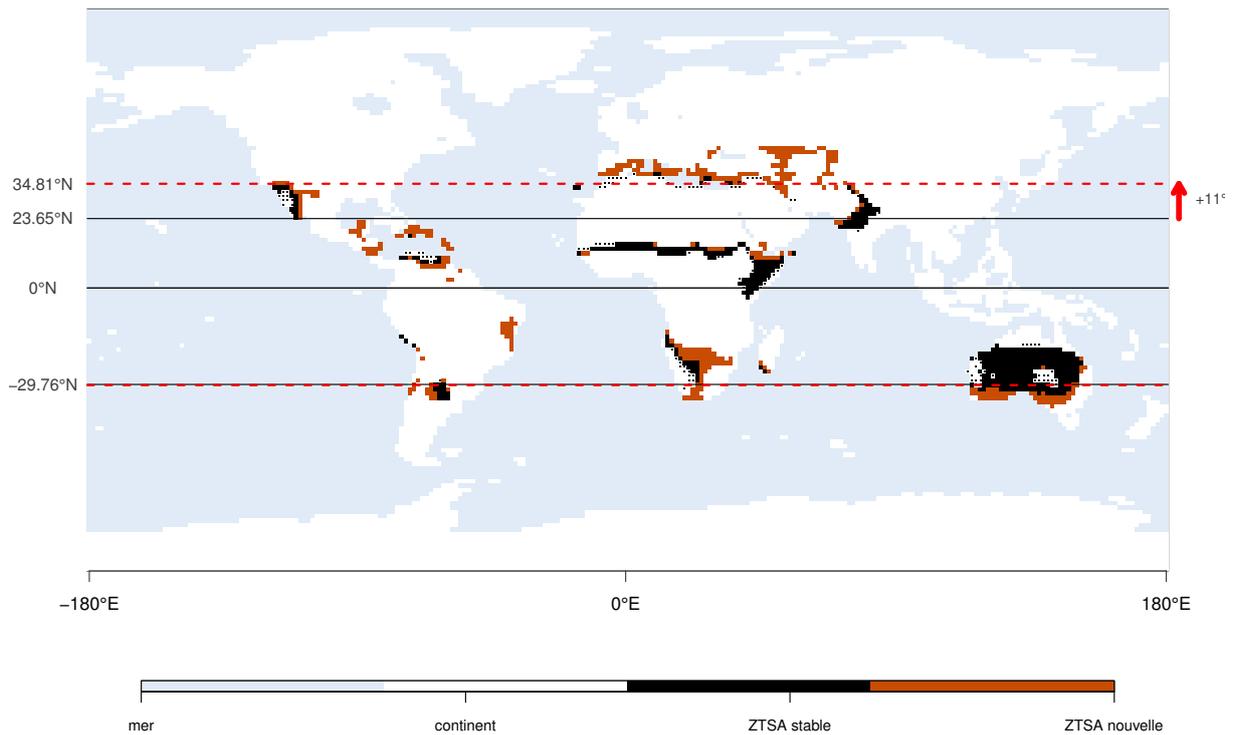


FIGURE 2.21 – *Carte moyenne d'évolution de la surface des zones tropicales semi-arides d'après le RCP 8.5, entre le début et la fin du 21e siècle, obtenue à partir d'une climatologie moyenne sur l'ensemble multi-modèle. Les zones tropicales semi-arides (ZTSA) stables au cours du 21e siècle, et apparues en fin de siècle, sont représentées respectivement en noir et en brun. Les points noirs marquent la disparition, dans le futur, de zones classées tropicales semi-aride au début du 21e siècle. Les lignes horizontales noires marquent les tropiques. Les lignes horizontales pointillées rouges marquent la limite latitudinale incluant 75% de la surface semi-aride chaude totale par hémisphère à la fin du 21e siècle. La flèche rouge indique le déplacement de cette limite pour l'hémisphère Nord, entre les deux périodes, exprimé en °N.*

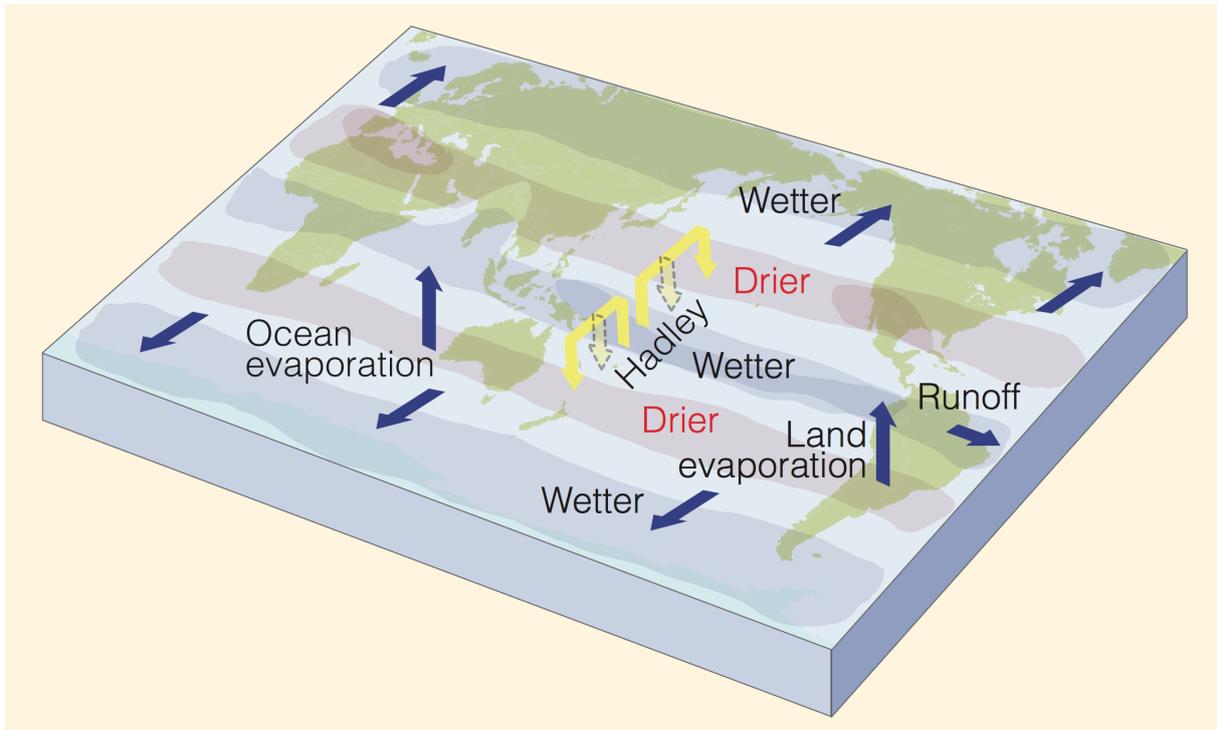


FIGURE 2.22 – *Représentation schématique des changements projetés dans les composantes majeures du cycle de l'eau, extraite de l'AR5.* Les flèches bleues indiquent les principaux types de changements dans les mouvements de l'eau au sein du système climatique terrestre : transport vers les pôles par les vents extratropicaux, évaporation de la surface et ruissellement des continents vers les océans. Les régions grisées montrent les surfaces qui deviendront plus probablement plus sèches (drier) ou plus humides (wetter). Les flèches jaunes indiquent un changement de circulation atmosphérique important par la Circulation de Hadley, dont le mouvement ascendant favorisent les pluies tropicales, tandis qu'elle supprime les pluies subtropicales. Les projections de modèles indiquent que la circulation de Hadley va décaler sa branche descendante vers les pôles, dans les hémisphères nord et sud, avec un effet associé asséchant. Des conditions plus humides sont projetées dans les hautes latitudes, car une atmosphère plus chaude va permettre des précipitations plus importantes, avec un mouvement d'eau accru dans ces régions.

→ Cette expansion subtropicale, si elle trouve une explication dans l'altération projetée de la circulation atmosphérique globale, n'est pas nécessairement homogène en termes de types de transitions bioclimatiques impliquées. La démarche adoptée ici va permettre d'approfondir cet aspect et d'analyser le futur domaine tropical semi-aride en fonction de l'historique de ces transitions.

2.4.3 Caractérisation et répartition des différentes transitions impliquant la classe semi-aride chaude

Un des intérêts de la classification de Köppen est qu'elle permet d'identifier facilement les changements de classe climatique entre deux périodes données et de quantifier des taux de transformation d'une classe en une autre. Ainsi, dans cette nouvelle section, proposons-nous de re-dessiner le futur paysage des zones tropicales semi-arides en distinguant celles-ci selon leur « pédigrée » : la classe climatique à laquelle elles appartenaient précédemment. La figure 2.23 quantifie les surfaces totales converties entre les principaux groupes bioclimatiques et la classe semi-aride chaude entre la fin du 21^e siècle (2086-2100) et la fin du 20^e siècle (1987-2001). Les groupes climatiques (dont la nomenclature dans la classification de Köppen est rappelée entre parenthèses) concernés par ces conversions sont :

- le groupe des climats équatoriaux (A) (en rose sur la figure 2.23) : tous sont pris en compte, mais ce sont surtout les classes sub-humides qui sont concernées ;
- le groupe des climats tempérés chauds (C) (en vert) ;
- dans le groupe aride (B), la classe pleinement aride chaude (en jaune) ;
- dans le groupe aride (B), les classes aride et semi-aride froides (en brun).

Au sein du groupe des climats arides, les classes caractérisées par des températures moyennes chaudes et froides sont traitées séparément parce qu'elles impliquent des mécanismes différents de transition vers la classe semi-aride chaude appartenant au même groupe : détermination plutôt par une augmentation des précipitations dans le cas des déserts chauds, plutôt par un réchauffement dans le cas des climats froids (semi-arides principalement). La classe aride froide, qui relèverait de la combinaison de ces deux mécanismes, est de fait peu concernée par ces transitions dans les résultats (non montré ici).

La somme des surfaces impliquées dans l'une ou l'autre transition est représentée sur la figure 2.23 : pour les groupes de climats tempérés chauds (en vert), équatoriaux subhumides (en rose) et arides froids (en brun), le sens prépondérant de la transition est dirigé *vers* la classe semi-aride chaude. En revanche, la surface totale *devenant* pleinement aride, à partir de surfaces tropicales semi-arides est plus importante que celles connaissant la transition inverse (*disparaissant*). Ces résultats sont valables pour les trois RCP (barres superposées pour chaque type de transition sur la figure), toujours rangés par ordre d'amplitude croissante, du RCP 2.6 au RCP 8.5, excepté dans le cas de la transition *aride chaud vers tropical semi-aride*, pour laquelle les RCP 2.6 et 4.5 montrent le même résultat, et pour la transition *tropical semi-aride vers tempéré chaud*, pour lesquelles les surfaces impliquées sont très proches pour les trois RCP, légèrement inférieure pour le RCP 4.5. Enfin la transition *tropical semi-aride vers semi-aride froid* n'est pas représentée. Ce dernier résultat est évident en contexte de réchauffement climatique.

Les autres résultats sont également cohérents avec le contexte global d'aridification.

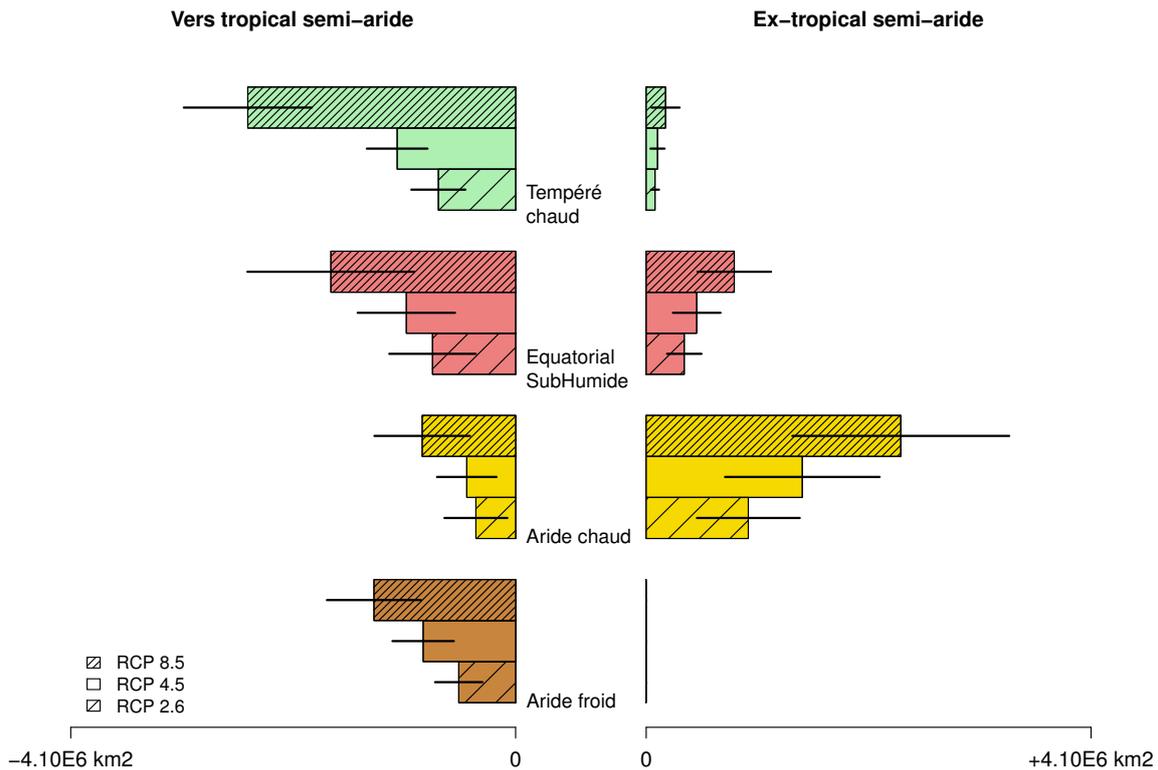


FIGURE 2.23 – *Transitions bioclimatiques impliquant le domaine tropical semi-aride entre le début et la fin du 21^e siècle : surface totale convertie en climat tropical semi-aride (à gauche) ou de la classe semi-aride chaude vers une autre classe bioclimatique (à droite). Les barres verticales représentent la moyenne multi-modèle, et les segments de droite la dispersion multi-modèle (quantiles 1 et 3). Les valeurs sont données séparément pour chaque RCP : en hachures serrées pour le RCP 8.5, larges pour le RCP 2.6, et sans hachures pour le RCP 4.5. Les valeurs correspondantes sont données dans le tableau 2.7 pour le RCP 8.5.*

Transition	quantile 1	Moyenne	quantile 3
Aride chaud (BWh)	1171	2290 (21%)	2654
Equatorial suhumide (A)	465	792 (7%)	842
Tempéré chaud (C)	0	175 (1%)	191
Tropical semi-aride (BSh)	4744	6245 (58%)	8028

TABLE 2.7 – *Assignation future des surfaces classées tropicales semi-arides dans la période historique, selon le RCP 8.5 : dans la colonne de gauche est indiquée la nouvelle classe climatique de ces surfaces. Dans le dernier cas, la surface reste classée tropicale semi-aride (55% du domaine historique). La moyenne de l'ensemble des modèles et leur dispersion (quantiles 1 et 3) sont exprimées en milliers de km² pour les différents types de transitions (seules celles non négligeables sont représentées). La dernière ligne correspond à la surface du domaine tropical semi-aride qui demeure assignée à cette classe dans le futur. Les valeurs entre parenthèses, accompagnant la moyenne, indiquent la valeur de cette moyenne relativement à la surface totale du domaine historique.*

Transition	quantile 1	Moyenne	quantile 3
Aride froid (Bk)	868	1274 (12%)	1652
Aride chaud (BWh)	364	841 (7%)	1005
Equatorial suhumide (A)	807	1661 (12%)	2200
Tempéré chaud (C)	1844	2409 (18%)	3340
Tropical semi-aride (BSh)	4744	6245 (45%)	8029

TABLE 2.8 – *Composition de la surface du domaine tropical semi-aride futur (fin 21^e siècle), selon le RCP 8.5, en fonction du « pédigrée ». Tableau à rapprocher du tableau 2.7. La moyenne de l'ensemble des modèles et leur dispersion (quantiles 1 et 3) sont exprimées en milliers de km² pour les différents types de transitions (seules celles non négligeables sont représentées). La dernière ligne correspond à la surface du domaine tropical semi-aride qui demeure assignée à cette classe dans le futur. Les valeurs entre parenthèses, accompagnant la moyenne, indiquent la valeur de cette moyenne relativement à la surface totale du domaine futur.*

Premièrement, la somme totale des surfaces impliquées est plus importante dans le sens des conversions *vers* la classe semi-aride chaude, ce qui est cohérent avec les résultats précédents, montrant un gain net de cette surface à la fin du 21^e siècle. Deuxièmement, la transition majoritaire du domaine tropical semi-aride historique vers la classe plus aride est cohérente avec le pronostic d'aridification globale de ce domaine sous l'effet de la circulation atmosphérique. Enfin, pour la même raison, les transitions *vers* la classe semi-aride chaude s'effectuent en majeure partie à partir de classes moins arides, ce qui confirme que le domaine tropical semi-aride s'élargit par aridification plutôt que par désaridification, même si ce dernier processus n'est pas totalement absent, comme en témoigne la surface issue de la classe aride chaude. Cependant, la répartition du « pédigrée » des futures nouvelles zones tropicales semi-arides entre des classes climatiques diversifiées demandent un examen plus approfondi.

Les transitions impliquant le domaine tropical semi-aride sont cohérentes avec un contexte général d'aridification dans les latitudes concernées : une partie de ce domaine (21% en moyenne pour le RCP 8.5) devient plus aride dans le futur, tandis qu'il s'agrandit, d'autre part, par l'aridification de zones plus humides.

Ces différents types de conversion sont préférentiellement localisés selon la latitude, comme nous le voyons sur la figure 2.24. Sur cette figure, seule la moyenne multi-modèle des surfaces converties est représentée. Les profils obtenus sont analogues entre les trois RCP, mais d'amplitude croissante pour les RCP 2.6, 4.5 et 8.5 successivement.

Les conversions de classes tempérées (vert) vers la classe semi-aride chaude ont lieu principalement en-dehors des latitudes tropicales, tandis que celles des classes équatoriales vers la classe semi-aride chaude se produit dans les latitudes tropicales. Ceci est bien sûr lié à la distribution actuelle des zones climatiques équatoriales et tempérées, et ne peut pas nous surprendre. Quant aux transitions impliquant des classes arides froides, elles se produisent également en-dehors des latitudes tropicales, où les températures sont supérieures au critère de sous-classification chaud/froid (tableau 2.1). Le cas des conversions impliquant les zones aujourd'hui désertiques chaudes est moins évident : une surface importante devient semi-aride chaude dans des latitudes tropicales et subtropicales, principalement dans l'hémisphère Sud (dans l'hémisphère Nord, ces conversions sont majori-

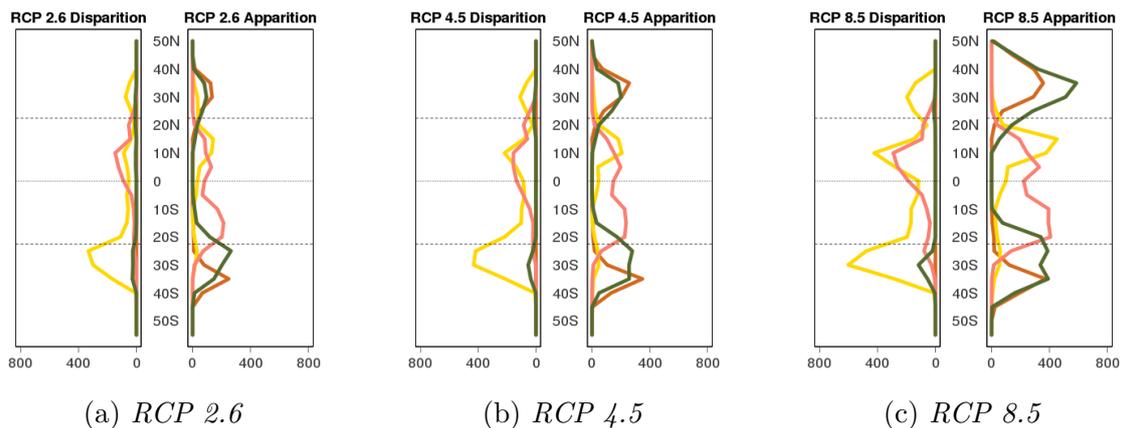


FIGURE 2.24 – *Profils zonaux des surfaces ayant subi différents types de conversion entre le début et la fin du 21^e siècle. Les trois RCP 2.6, 4.5 et 8.5 sont représentés successivement de gauche à droite. Pour chaque RCP, le compartiment de gauche représente les surfaces semi-arides chaudes converties en une autre classe climatique à la fin du 21^e siècle, tandis que le compartiment de droite représente les surfaces devenues chaudes semi-arides dans le même intervalle. Les couleurs indiquent le type de conversion, dans l'un ou l'autre sens pour les classes : équatoriales (rose), tempérées chaudes (vert), désertiques chaudes (jaune), arides et semi-arides froides (brun). Le nord est situé vers le haut des figures. Les ordonnées sont graduées en degrés de latitude. Les abscisses sont graduées en milliers de km².*

tairement circonscrites dans les tropiques). Les régions australienne et sud-africaine sont principalement concernées par ces conversions, comme nous allons le voir dans la suite.

Nous proposons à présent de tracer les cartes de « pédigrée » des futures zones semi-arides chaudes, de façon à localiser plus précisément les lieux des différents types des conversions. Ces cartes peuvent être tracées modèle par modèle, comme sur la figure A6, en annexe, pour le RCP 8.5.

Quelques schémas principaux ressortent de l'analyse des cartes obtenues avec les différents modèles :

- une bande sahélienne qui reste en grande partie semi-aride chaude dans le futur (sauf pour les modèles BNU et MIROC5) ;
- la région australienne conserve une zone semi-aride chaude, tandis que le reste de cette zone est transformée en d'autres classes climatiques à la fin du 21^e siècle ;
- le pourtour méditerranéen est largement converti vers des zones chaudes semi-arides, à partir de climats tempérés chauds et semi-arides froids ;
- la région indienne conserve une partie semi-aride chaude, et voit cette surface s'élargir à partir de climats tempérés chauds et semi-arides froids, principalement ;
- la zone semi-aride chaude sud-africaine est élargie à partir de climats tempérés chauds, principalement. La plupart des modèles montrent également une transformation partielle de cette zone semi-aride chaude dans d'autres classes climatiques ;
- en Amérique du Sud, il est plus difficile d'identifier un motif commun à l'ensemble des modèles : certains (MPI, GISS, CCSM4, CanESM2, et BNU dans une moindre mesure, voire NorESM1) montrent une large augmentation de la surface semi-aride chaude à partir de la conversion de climats équatoriaux sub-humides, qui s'accompagne d'une perte de surfaces semi-arides chaudes actuelles. Les autres modèles

(IPSL, MRI, MIROC5, GFDL, CNRM, bcc) montrent plutôt une certaine stabilité de cette surface ;

- en Amérique du Nord, la plupart des modèles montrent une augmentation de la surface semi-aride chaude à partir de la conversion de classes tempérées chaudes ;
- enfin, la transition aride chaud vers semi-aride chaud (en jaune) se manifeste principalement dans le nord-est sahélien et le nord de la corne africaine (pour 7 modèles). Trois modèles situent cette transition en Australie (CNRM, MRI, NorESM), six modèles en Inde, quatre en Amérique du sud, mais de façon ponctuelle.

La discussion peut être facilitée en visualisant les résultats de la moyenne multi-modèle, comme sur la figure 2.25 pour le RCP 8.5. La moyenne multi-modèle est obtenue en calculant d'abord les séries moyennes de température et de précipitations (projetées sur une grille commune, en l'occurrence celle de résolution 2x2, régulière, choisie comme résolution intermédiaire pour l'ensemble des modèles) sur l'ensemble des modèles utilisés, et en appliquant la classification de Köppen à cette climatologie moyenne.

Cependant, cette carte moyenne échoue à représenter certaines informations recueillies de l'analyse modèle par modèle : en particulier, la conversion massive dans certains modèles de zones semi-arides chaudes en déserts dans la région australienne, n'est pas capturée par la moyenne multi-modèle.

► La surface occupée par le domaine tropical semi-aride qui évolue vers d'autres classes climatiques dans le futur est minoritaire (jusqu'à 35% en moyenne pour le RCP 8.5, dont 24% vers la classe plus aride). Les grandes régions tropicales semi-arides du début du 21^e siècle, Sahel, Afrique de l'Est, nord de l'Inde, Australie, sont conservées dans le futur, selon les trois RCP (cf. en annexe les cartes de pedigree pour les RCP 2.6 et 4.5, figures A7 et A8), et représentent 55% (RCP 8.5, tableau 2.7) à 72% (RCP 2.6, non représenté) de la surface calculée pour la période historique. D'autre part, le domaine tropical semi-aride futur est en partie issu de la transition depuis d'autres classes climatiques : ces transitions sont minoritaires pour les RCP 2.6 et 4.5 (27 et 34% de la surface totale du domaine futur, respectivement), mais représentent 54% de la surface du domaine futur pour le RCP 8.5, dont 34% pour les transitions issues des classe équatoriales subhumides et tempérées chaudes (tableau 2.8). Ces transitions se produisent en Afrique du Sud, dans le bassin méditerranéen et en Amérique du Nord (Californie notamment). Le bassin caribéen, classé équatorial subhumide au début du 21^e siècle, devient en grande partie tropical semi-aride selon le RCP 8.5 à la fin du siècle (mais pas selon les autres RCP).

Evolution des moyennes de température et de précipitations associées à ces transitions.

Pour analyser l'évolution des conditions climatiques présidant à l'évolution du domaine tropical semi-aride et aux transformations subies par les surfaces *devenant* tropicales semi-arides dans le futur, les deux variables utilisées dans la classification de Köppen sont examinées. L'analyse est réalisée pour le RCP 8.5, qui montre les résultats les plus prononcés.

Evolution des niveaux de précipitations annuelles. Les distributions de sommes de précipitations annuelles sur le domaine tropical semi-aride du début du 21^e siècle et sur

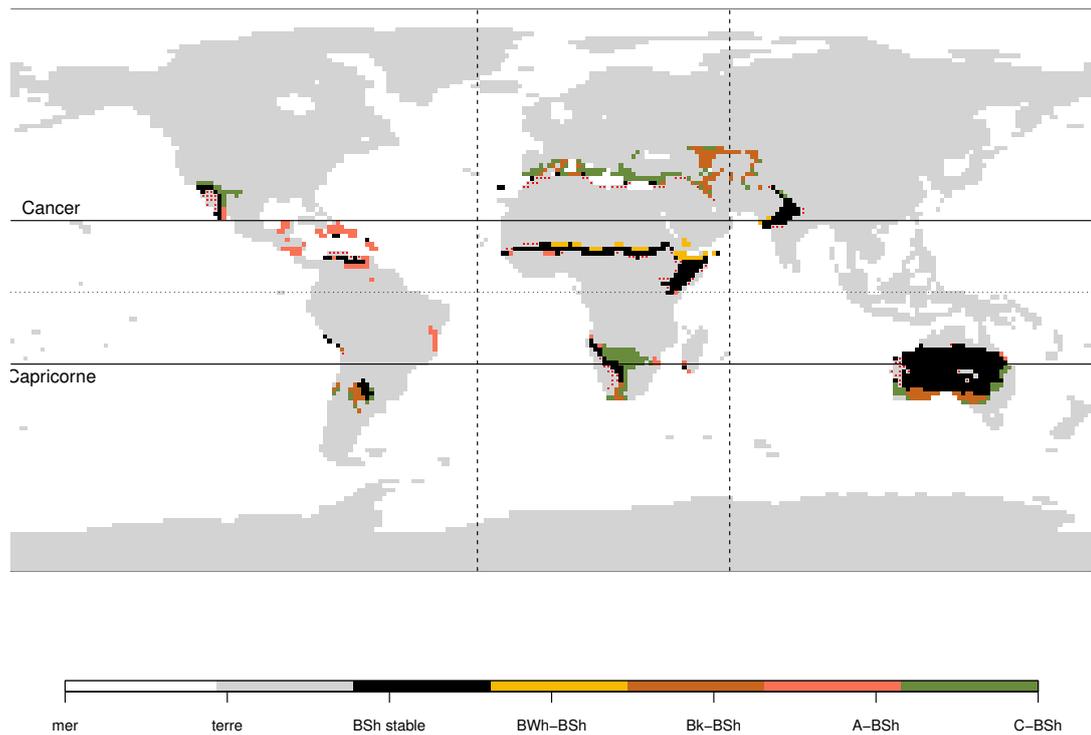


FIGURE 2.25 – *Carte de « pédigrée » du domaine tropical semi-aride futur, selon le RCP 8.5, en fonction de la classe climatique assignée à chaque point de ce domaine au début du 21^e siècle. Les points représentent les zones tropicales semi-arides au début du 21^e siècle qui seront converties dans une autre classe climatique à la fin du 21^e siècle. Les conversions sont indiquées en légende dans le sens de la classe d'origine (eg BWh) vers la classe BSh, selon la nomenclature donnée dans le tableau 2.3. Cette carte est construite à partir de la climatologie moyenne de l'ensemble des modèles et ne rend donc pas compte de la variabilité intermodèle : les cartes obtenues séparément avec chaque modèle sont disponibles en annexe (figure A6) ; celles pour les deux autres scénarios également (figures A7 et A8).*

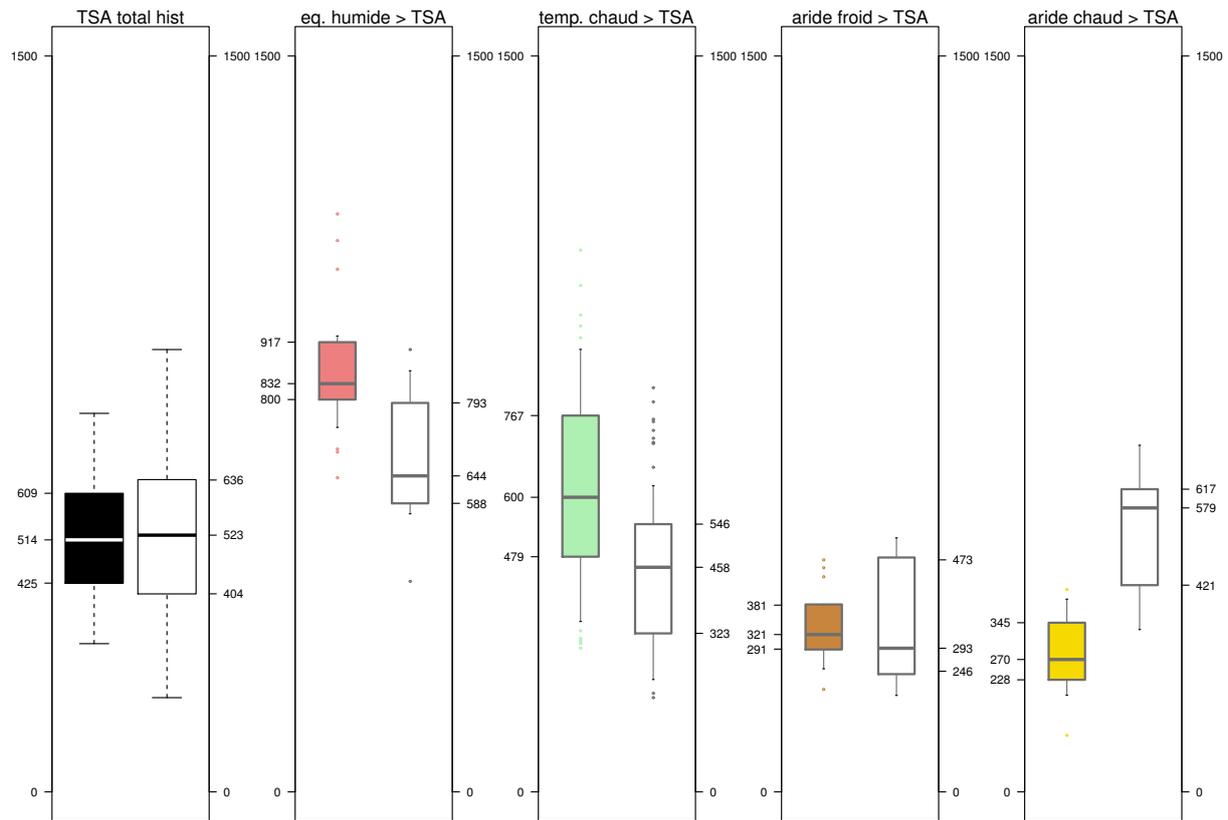


FIGURE 2.26 – *Evolution de la distribution spatiale des valeurs de sommes de précipitations annuelles pour les nouvelles aires tropicales semi-arides (TSA) dans le futur, pour le modèle IPSL. Chaque sous-figure représente un type de conversion. Seul le RCP 8.5 est représenté. Pour chaque modèle, le premier compartiment contient les résultats pour l'ensemble du domaine tropical semi-aride au début du 21^e siècle (noir) et à la fin (blanc) ; les compartiments suivants montre la dispersion au début (couleur) et à la fin du 21^e siècle (blanc) des valeurs obtenue sur l'aire géographique appartenant au groupe A (rose), C (vert), ou à la classe semi-aride froide (brun) ou aride chaude (jaune) et qui est classée tropicale semi-aride à la fin du siècle. Les ordonnées sont graduées en mm/an.*

celui de la fin du 21^e siècle (ces deux domaines ne sont pas identiques, et ne contiennent pas le même nombre de points) sont tracées, et présentées en figure A4, en annexe. Les résultats sont assez homogènes entre les modèles, et la figure 2.26 montre ici ceux obtenus pour l'un d'entre eux. La comparaison du domaine tropical semi-aride historique avec celui obtenu pour la période future montre une légère augmentation de la dispersion des valeurs dans la période future, alors que la médiane n'est presque pas altérée (sauf pour 5 modèles, qui ne s'accordent pas sur le sens de cette variation) et reste proche de 500 mm de pluie par an pour tous les modèles. Cette dispersion s'accroît principalement vers des valeurs plus élevées.

Pour chaque modèle, les autres boîtes à moustache représentent les surfaces concernées par les différentes transitions vers la classe semi-aride chaude : en blanc sont représentées des surfaces qui appartiennent au domaine tropical semi-aride futur, en couleur est représentée la même aire géographique pour la période historique avant la transition. Comme la classe climatique est ici modifiée entre les deux périodes, on s'attend à voir changer les

conditions climatiques moyennes pour se rapprocher de celles de la classe tropical semi-aride. **Au sein du futur domaine tropical semi-aride, les ensembles de valeurs de précipitations annuelles sont regroupés selon l'origine (le « pédigrée ») des points de ce domaine**, ce qui s'analyse en comparant les résultats pour la période future (en blanc sur la figure 2.26) :

- les surfaces subissant la transition *équatorial subhumide (A) vers semi-aride chaud* atteignent les niveaux de précipitations les plus élevés de la distribution globale du domaine tropical semi-aride futur ;
- les surfaces subissant la transition *tempéré chaud (C) vers semi-aride chaud* ont un niveau de précipitations situé vers la médiane de l'intervalle de dispersion du domaine futur (entre les quantiles 1 et 3) ;
- les surfaces subissant la transition *semi-aride froid (Bk) vers semi-aride chaud* ont des niveaux de précipitations inférieurs situés dans la queue de distribution des valeurs du domaine futur ;
- les surfaces subissant la transition *aride chaud (BWh) vers semi-aride chaud* ont des niveaux de précipitations situés dans le coeur (quantiles 1 et 3) de l'intervalle de dispersion du domaine futur.

Les transitions de classe impliquant le plus fort changement de précipitations annuelles sont celles *équatorial subhumide (A) vers semi-aride chaud*, dans le sens d'une diminution des précipitations, et *aride chaud (BWh) vers semi-aride chaud*, dans le sens d'une augmentation.

Evolution des températures moyennes annuelles. Les températures moyennes annuelles augmentent dans le futur, comme attendu dans ce contexte de réchauffement. Les résultats sont présentés selon un format analogue à celui utilisé pour les précipitations, en annexe (figure A5) pour l'ensemble des modèles traités séparément, et dans ce chapitre pour un modèle (figure 2.27). Les résultats montrent une bonne homogénéité (niveau de valeur et sens de variation) entre les modèles. Toutes les surfaces effectuant une transition vers la classe semi-aride chaude montrent une dispersion de valeurs inférieure à celle du domaine tropical semi-aride. En outre, l'augmentation de température dans la période future est nette, et les intervalles de dispersion historiques et futurs séparés dans la plupart des cas. Le domaine tropical semi-aride montre aussi une augmentation de température, mais sa dispersion est plus importante, pour la période historique, et s'accroît encore dans la période future, en gardant sa valeur seuil (18°C) comme minimum.

Ainsi, les précipitations et les températures annuelles, les deux principaux critères de détermination de la classe semi-aride chaude (avec la répartition des précipitations entre été et hiver), contribuent différemment à ces transitions. Au sein du groupe aride, les changements attendus par définition de ces classes sont bien ceux obtenus : les zones d'abord arides froides conservent leur niveau de précipitations et leur passage dans la classe semi-aride chaude est déterminé par le réchauffement, tandis que les zones arides chaudes voient leur niveau de précipitations augmenter. Au contraire, c'est une diminution forte des précipitations qui convertit les classes équatoriales subhumides tropicales semi-arides. Enfin, dans le cas de la transition *tempéré chaud vers semi-aride chaud*, elle est induite par la conjonction de la diminution des précipitations et de l'augmentation des températures.

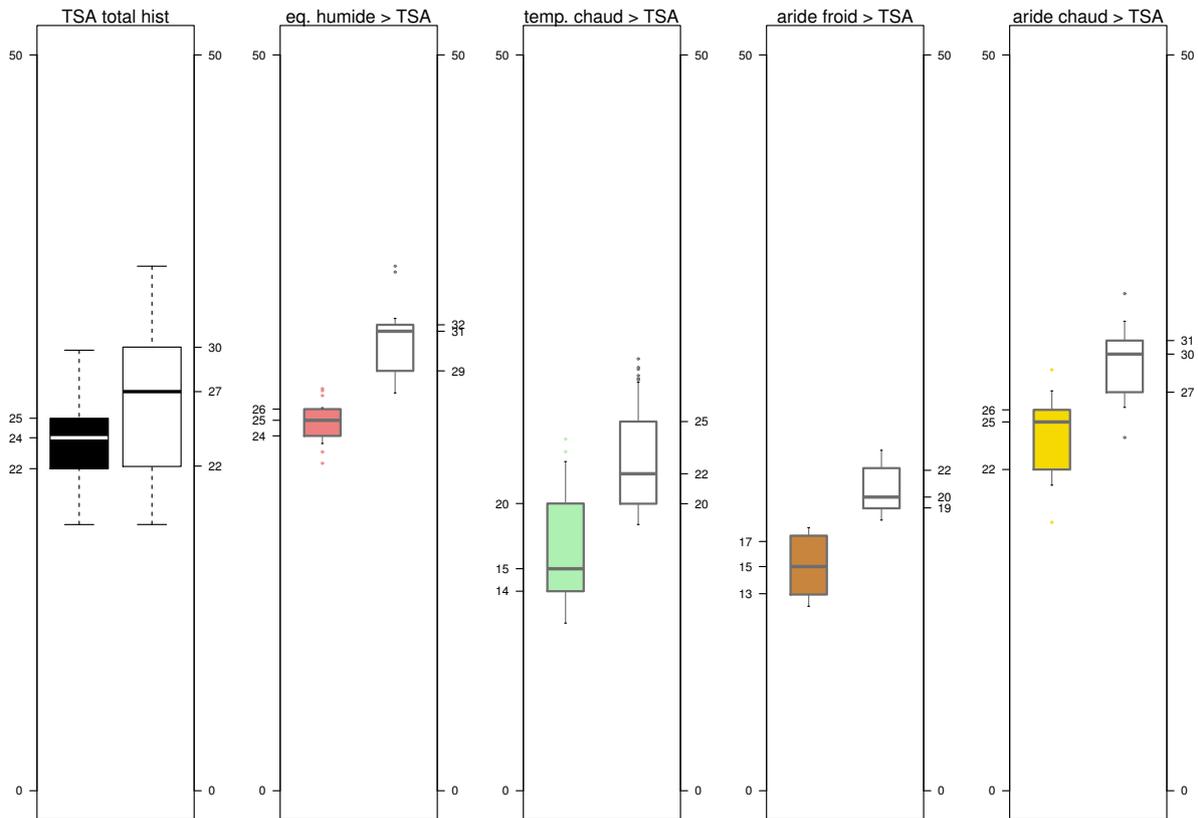


FIGURE 2.27 – *Evolution de la distribution spatiale des valeurs de températures moyennes annuelles pour les nouvelles aires tropicales semi-arides (TSA) dans le futur, pour le modèle IPSL. Chaque sous-figure représente un modèle. Seul le RCP 8.5 est représenté. Pour chaque modèle, le premier compartiment contient les résultats pour l'ensemble du domaine tropical semi-aride au début du 21^e siècle (noir) et à la fin (blanc) ; les compartiments suivants montre la dispersion au début (couleur) et à la fin du 21^e siècle (blanc) des valeurs obtenue sur l'aire géographique appartenant au groupe A (rose), C (vert), ou à la classe semi-aride froide (brun) ou aride chaude (jaune) et qui est classée tropicale semi-aride à la fin du siècle. Les ordonnées sont graduées en °C.*

► L'augmentation globale de la surface chaude semi-aride est induite par la conversion de différentes classes climatiques selon les latitudes et les régions : dans les régions de la ceinture tropicale (bassin caribéen notamment), ce sont principalement des zones au climat équatorial sub-humide qui sont transformées, par assèchement. Dans les régions des latitudes sub-tropicales, principalement le sud de l'Amérique du Nord (Californie notamment), le bassin méditerranéen et le Moyen-Orient, ce sont des zones arides ou semi-arides froides, qui sont réchauffées jusqu'à atteindre les mêmes conditions que la classe semi-aride chaude et des zones au climat tempéré chaud qui sont converties par la combinaison d'une diminution des précipitations et du réchauffement. En Afrique du Sud, la zone tropicale semi-aride s'élargit vers le nord-est, principalement par conversion de surfaces tempérées chaudes, tout en s'aridifiant au sud-ouest. En Amérique du Sud, la surface tropicale s'accroît par conversion de surfaces équatoriales subhumides, mais la dispersion intermodèle est très forte et complique le diagnostic géographique. La même restriction vaut pour le cas de l'Australie, qui semble néanmoins montrer une tendance générale à l'aridification. La représentation de la moyenne multi-modèle est visuellement ergonomique mais à utiliser avec précaution, notamment dans ces régions à forte variabilité.

La transition d'une partie du domaine tropical semi-aride vers d'autres classes climatiques est continue au cours du 21^e siècle

La conversion progressive des zones semi-arides chaudes en d'autres classes climatiques peut être analysée régionalement à partir de la figure 2.28 : la majeure partie de cette surface demeure semi-aride chaude, mais nous voyons qu'elle subit, notamment en Amérique du Nord et en Océanie, une forte transition vers la classe désertique chaude. Les figures proposées sont exprimées en surface relative, néanmoins, les surfaces concernées, en valeur absolue, sont largement plus importantes en Australie qu'en Amérique du Nord.

→ La disparition constatée d'une partie du domaine tropical semi-aride entre le début et la fin du 21^e siècle, par conversion vers d'autres classes climatiques, se fait de manière continue au cours du temps. Cela est vrai également pour l'apparition progressive, donc, des nouvelles surfaces tropicales semi-arides.

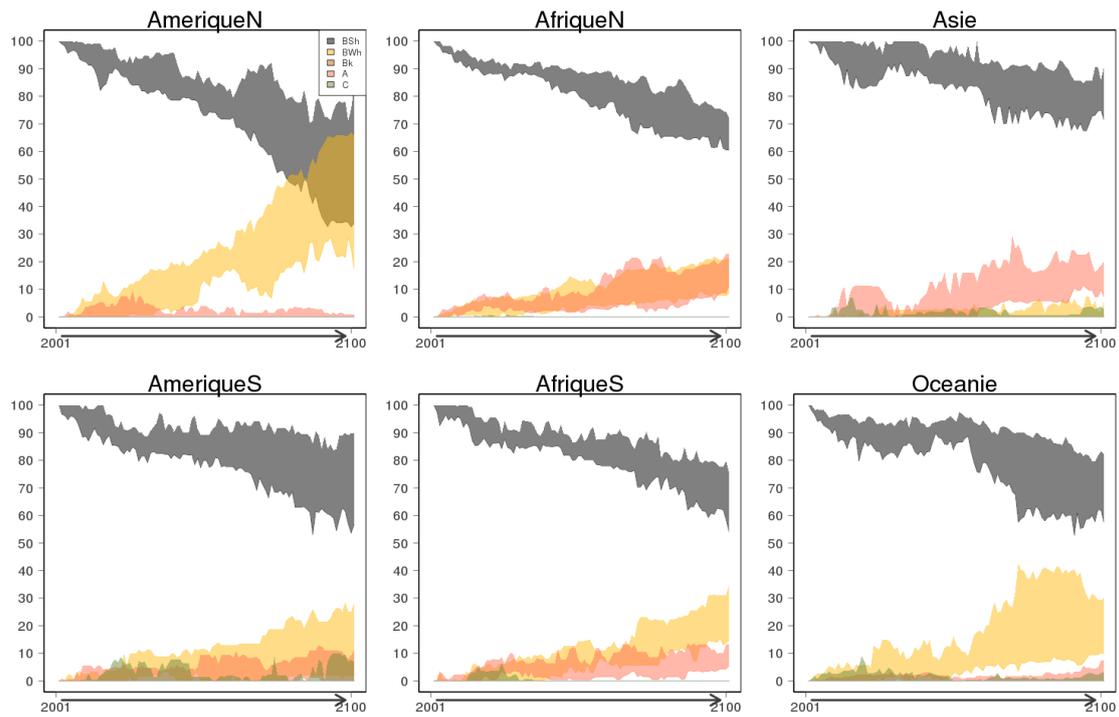


FIGURE 2.28 – *Evolution au cours du 21^e siècle de l'assignation des surfaces incluses dans le domaine tropical semi-aride délimité au début du siècle. Les classes de destination sont colorées en jaune pour la classe aride chaude, en rose pour les classes équatoriales sub-humides et en vert pour les classes tempérées chaudes. La surface demeurant tropicale semi-aride est en gris. Les aplats de couleurs représentent la dispersion multi-modèle (quantiles 1 et 3). Les surfaces sont exprimées en pourcentage (de 0 à 100% en ordonnées) de la surface tropicale semi-aride totale de la région regardée au début du 21^e siècle. Chaque compartiment représente une grande région telle que définie sur la figure 2.7.*

2.5 Interprétation dans la perspective de reforester les régions tropicales semi-arides

L'approche bioclimatique fondée sur la classification de Köppen est utile pour interpréter l'évolution climatique en termes d'implications pour la végétation (Chen et Chen, 2013). L'identification des zones de changement de classe climatique peut être interprétée pour la planification de programmes de restauration écologique : en Chine par exemple, Kim *et al.* (2008) utilise la classification de Köppen et met en garde contre la reforestation dans une région soumise à un accroissement de la surface semi-aride à la fin du 20^e siècle.

Un changement de classe est en effet pourvu de sens écologique, même s'il est limité par le niveau de précision grossier de la classification. La transition, analysée plus haut, des classes tempérées chaudes et équatoriales subhumides vers la classe semi-aride chaude correspond *a priori* à un changement de conditions climatiques favorables à différents types de forêt ou de savanes arborées vers des conditions favorables à des savanes ou des steppes herbacées.

Une validation de la correspondance entre la classification climatique et les formations écologiques est proposée dans Rohli *et al.* (2015) : les répartitions géographiques des classes climatiques selon la classification de Köppen et de huit biomes (selon Olson *et al.* (2001)) sont croisées pour la période 1981-2010. Ils montrent (Rohli *et al.* (2015), tableaux 1 et 2) que la classe climatique semi-aride chaude (BSh) est majoritairement occupée par le biome « *grassland* » (prairie), pour 59.92% de la surface, mais que les biomes « désert » et « SSW » (*subtropical scrub/woodland*, en anglais, soit taillis/bois subtropicaux) sont aussi représentés dans cette classe, à 14.93 et 21.81% respectivement. Ce dernier biome, SSW, est majoritairement associé à la classe climatique Aw (« équatoriale subhumide », 26.99%), immédiatement suivie par la classe semi-aride chaude (22.29%). Les résultats obtenus par Rohli *et al.* (2015) montrent que certaines classes constituent des indicateurs fiables de l'occupation écologique : déserts très majoritairement (71.94%) associés à la classe très aride chaude, forêts tropicales aux classes équatoriales avec mousson ou humides toute l'année (> 80%). Les classes Aw et BSh occupent des positions intermédiaires, abritant plusieurs biomes parcourant un gradient de densité arborée : déserts (aucun arbre), prairies (pas ou très peu d'arbres) et SSW (différentes densités arborées) pour la classe semi-aride chaude, prairies, SSW et forêt tropicale (couvert arboré total) pour la classe équatoriale subhumide.

Ces résultats sont compatibles avec les travaux portant sur l'écosystème de savane dynamique (par exemple Higgins et Scheiter (2012)), décrit comme un système dynamique à deux états stables (la prairie et la forêt) et pouvant revêtir tous les niveaux de densité arborée entre ces deux états. L'état du système dépend des conditions climatiques mais pas uniquement (voir aussi le chapitre 1). Les classes climatiques Aw et BSh, comme il vient d'être décrit, sont favorables à l'existence de ces systèmes, la première étant plus propice à l'augmentation du couvert arboré, la seconde à sa diminution. Le suivi de l'évolution de la surface semi-aride chaude permet donc de circonscrire les zones dans lesquelles le maintien d'un couvert arboré *ouvert* (selon les résultats de Rohli *et al.* (2015) le couvert forestier de cet écosystème n'est atteint que pour la classe Aw) est possible. **La transition entre cette classe et celle équatoriale subhumide signale une augmentation ou une diminution de ce potentiel pour un couvert arboré, mais sans rupture nette sur l'écosystème favorisé.**

Du point de vue climatique, la classe semi-aride chaude étudiée ici occupe souvent (au Sahel, en Afrique du Sud et en Australie, notamment) des zones de transition entre des domaines plus étendus assignés aux classes voisines de la classification - principalement la classe très aride chaude et les classes équatoriales subhumides et tempérées chaudes. D'autres auteurs (Stern *et al.*, 2000; Chen et Chen, 2013) ont signalé que les frontières entre les zones d'occupation des classes climatiques devraient être considérées comme des régions bioclimatiques à part entière, aux délimitations floues. Ces régions-frontières ont un positionnement géographique instable à l'échelle interdécennale, les fluctuations climatiques provoquant le franchissement répété des seuils de délimitation entre les classes climatiques voisines (Chen et Chen, 2013). La comparaison visuelle du positionnement de ces zones instables selon Chen et Chen (2013) (figure 2b), du positionnement de la classe semi-aride chaude obtenue ici (par exemple figure 2.7) et de la carte des changements de classe obtenue par Fraedrich *et al.* (2001) (figure 2.5) suggère que la classe semi-aride chaude constitue en elle-même une de ces zones frontières entre des classes climatiques plus étendues, ce qui est cohérent avec la correspondance écologique de cette classe, telle que discutée plus haut.

L'évolution de la classe semi-aride chaude qui nous intéresse ici est peu discutée dans ces travaux adoptant une approche régionale ou globale portant sur toutes les classes climatiques (par exemple Fraedrich *et al.* (2001)). En revanche, les résultats peuvent être comparés à ceux d'études focalisées sur les zones semi-arides identifiées par l'indice d'aridité. Feng et Fu (2013) a ainsi démontré l'expansion avérée, au 20^e siècle, et projetée, au 21^e siècle, de la surface totale semi-aride.

L'accroissement au cours du 20^e siècle de la surface aride (classée dans le groupe B) selon la classification de Köppen a été relevée et mise en relation avec l'expansion de la circulation de Hadley, sans qu'un lien de cause à effet ait été formellement démontré (Chen et Chen, 2013). Les résultats présentés ici montrent la corrélation avec le réchauffement et la migration de la limite du domaine dans le même sens que l'extension de la circulation de Hadley : sans permettre de conclure, ces résultats constituent des éléments supplémentaires corroborant cette hypothèse.

→ Les résultats obtenus dans ce chapitre sont limités pour l'interprétation par les limites de classe arbitraires et rigides (Stern *et al.*, 2000) et la correspondance limitée à un seul type de formation végétale alors qu'un gradient de densité arborée pourrait être envisagé, comme expliqué plus haut.

Dans la suite, le choix est fait de conserver une perspective globale et d'anticiper les effets du changement climatique à l'échelle d'une unité fonctionnelle bioclimatique. Dans cette logique, un modèle de végétation est choisi comme outil d'analyse générique de la réponse de la végétation aux changements climatiques au sein de cette unité bioclimatique. L'effet de ces changements, qui inclut entre autres le niveau d'aridité, sera analysé directement sur le fonctionnement de la végétation. Ce sont donc les règles d'action des variables climatiques sur la végétation qui seront utilisées pour produire un nouveau genre de classification fonctionnelle au sein d'une unité bioclimatique.

2.6 Résumé du chapitre 2

La classification climatique de Köppen a été appliquée à des données issues d'observations pour le 20^e siècle. L'analyse de la surface totale assignée à la classe semi-aride chaude a démontré un accroissement de 13% de celle-ci à la fin du siècle (depuis les années 1970, dans l'hémisphère Nord, et 1980, dans l'hémisphère Sud) ainsi qu'un déplacement vers les pôles de la limite d'extension du domaine, particulièrement dans l'hémisphère Nord.

La même méthodologie a ensuite été appliquée aux sorties de simulations d'un ensemble de modèles de climat. La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus à partir des observations montrent que les modèles identifient correctement les grandes régions tropicales semi-arides, malgré des variations importantes notamment en Amérique du Nord et du Sud. En revanche, le déplacement de la limite d'extension du domaine tropical semi-aride n'est obtenu que pour une minorité de modèles.

Ces résultats corroborent ceux rapportés dans la littérature à partir de critères alternatifs des zones semi-arides, identifiées aux zones de subsidence de la circulation de Hadley. L'expansion de celle-ci a été démontrée à partir de différents jeux d'observations, mais elle est mal simulée par les modèles de climat pour des raisons encore mal expliquées (Seidel *et al.*, 2008).

L'application de la classification de Köppen aux sorties de modèles de climat pour trois scénarios climatiques futurs a démontré que la surface totale du domaine tropical semi-aride allait s'accroître au cours du 21^e siècle. Selon les scénarios, cet accroissement se poursuivra jusqu'en 2100 pour atteindre +38% en moyenne pour le RCP 8.5, s'infléchira en cours de siècle et sera limité à +19% pour le RCP 4.5, ou se stabilisera autour de +14% dès le milieu de siècle pour le RCP 2.6.

La corrélation de cet accroissement de surface avec le réchauffement global net entre le début et la fin du 21^e siècle a été mis en évidence; elle est particulièrement marquée en-dehors de la ceinture tropicale.

La limite nord d'extension du domaine tropical semi-aride se déplace, selon les résultats obtenus respectivement pour les RCP 2.6, 4.5 et 8.5, de +1, +4 et +11 degrés de latitude en moyenne sur les modèles entre le début et la fin du siècle.

L'augmentation globale de la surface chaude semi-aride est induite par la conversion de différentes classes climatiques selon les latitudes et les régions.

L'accroissement démontré de la surface tropicale semi-aride au cours du 21^e est en accord avec des travaux réalisés à l'échelle globale avec la classification de Köppen (Rugel et Kottek, 2010) et avec l'indice d'aridité (Feng et Fu, 2013). La corrélation avec le réchauffement et la migration de la limite du domaine dans le même sens que l'extension de la circulation de Hadley constituent des éléments supplémentaires corroborant l'hypothèse d'une influence de l'extension de la circulation de Hadley sous l'effet du changement climatique sur l'évolution du domaine tropical semi-aride.

Evaluer le « potentiel arboré » dans les régions tropicales semi-arides au moyen d'un modèle global de végétation

Le domaine tropical semi-aride forme une unité bioclimatique relativement homogène. Dans ces conditions climatiques, la température, toujours élevée, est peu limitante pour la croissance des plantes. Le niveau et la répartition des précipitations sont en revanche déterminants dans leur fonctionnement. La combinaison des différents paramètres climatiques, rayonnement, vent, pression de surface, température et précipitations module les cycles de croissance selon des processus trop complexes pour être agrégés en un indicateur simple du niveau de fonctionnement des plantes associé. A une échelle locale, la connaissance fine des écosystèmes, véhiculée ou non par l'utilisation d'un modèle spécifiquement adapté, permettrait sans doute de développer des fonctions de réponses *ad hoc* à l'état et à la variabilité climatiques. Une alternative est proposée ici à l'échelle globale.

Comme il a été vu au chapitre 1, les stratégies de reforestation, en particulier dans le contexte de changement climatique, relèvent simultanément des échelles locale et globale. La coordination à l'échelle globale doit permettre d'anticiper les problématiques mondiales, tant écoclimatiques que socio-économiques, avant d'harmoniser les programmes d'adaptation et de développement mis en oeuvre localement. Les outils d'analyse tels que la classification climatique utilisée au chapitre 2 servent cette appréhension globale de la problématique. Une des questions qui accompagnent celle de la reforestation dans le domaine tropical semi-aride est la question du « potentiel arboré » dans ces conditions limitantes : quelle densité de couvert arboré ces milieux peuvent-ils supporter ? Comment définir, selon quels critères, un optimum de densité arborée ?

Dans ce chapitre 3 est proposée une méthodologie permettant d'aborder cette question de l'évaluation du potentiel climatique d'entretien d'un couvert arboré dans les régions tropicales semi-arides. Elle est pensée de manière à pouvoir être appliquée à différentes périodes temporelles, afin d'anticiper l'évolution des conditions climatiques pour l'élaboration de stratégies globales. Ce dernier point fera l'objet d'un chapitre dédié (chapitre 4).

Le premier levier de la méthodologie proposée est l'utilisation d'un modèle de végétation pour simuler ce potentiel arboré dans l'enveloppe de conditions climatiques du domaine tropical semi-aride. Le modèle global de végétation constitue la courroie de trans-

mission « naturelle » entre la modélisation du climat global (seul outil d'anticipation des conditions futures) et la modélisation du fonctionnement de la végétation à la surface terrestre. La méthodologie proposée ici tire parti d'un tel modèle pour apporter des réponses à la problématique globale d'évaluation du potentiel¹ *climatique* de fonctionnement d'un couvert arboré.

L'utilisation d'un **modèle global de végétation** offre en effet la possibilité de prendre en compte de manière mécaniste tous les facteurs climatiques déterminant, de façon combinée, la croissance de la plante. Il permet ainsi d'évaluer les réponses de la végétation à des conditions climatiques contrastées et à leur évolution. En contrepartie, son manie-ment impose d'accepter des hypothèses simplificatrices qui permettent une appréhension à l'échelle globale, mais pas la descente à l'échelle locale. Le modèle global de végétation retenu pour ce travail est le modèle ORCHIDEE. Il va donc servir de matériel pour la réalisation d'un ensemble d'expériences numériques ayant pour objectif d'évaluer le po-tentiel arboré des surfaces appartenant au domaine tropical semi-aride.

Le second levier de la méthodologie proposée est une **typologie des profils de ré-sultats** obtenus en sortie des expériences de modélisation. Ces profils délimitent des sous-régions caractérisées chacune par une relation distincte du niveau de productivité au niveau d'occupation du sol. Au sein de celles-ci, les résultats pourront être interprétés en termes de potentiel arboré typique du profil, de manière à redessiner, dans le domaine tropical semi-aride global, les contours de surfaces plus ou moins favorables à l'entretien d'un couvert arboré.

1. Les notions introduites sont définies dans le glossaire p. 112

3.1 La méthodologie

3.1.1 Démarche expérimentale

L'hypothèse de base du protocole expérimental est celle d'une compétition intra-spécifique au sein du peuplement arboré, imposant un profil de développement de l'arbre décroissant avec la densité de plantation.

Cette densité constitue en effet un critère majeur de la gestion forestière et des stratégies d'aménagement, jusqu'à devenir cruciale dans les contextes très limitants comme c'est le cas pour les régions semi-arides. Schématiquement, les plantes se développent d'autant mieux que les ressources ne leur sont pas limitées. Il existe donc un seuil critique au-delà duquel le partage de la ressource disponible entre tous les individus est insuffisant pour permettre le développement maximal de chacun. L'idée ici est de rechercher la densité de plantation arborée permettant d'assurer un développement de l'arbre jugé suffisant tout en maximisant la performance du peuplement dans son ensemble. A niveau de développement égal, en effet, une population plus élevée d'individus produit une plus grande quantité de biomasse, qu'il s'agisse, par exemple, de bois ou de fruits.

L'objectif du protocole est donc d'évaluer le niveau de productivité des arbres en fonction de leur densité de plantation.

L'expérience de modélisation consiste en un ensemble de simulations indépendantes ne différant que par la densité arborée imposée (figure 3.1). Chaque simulation est réalisée sur l'ensemble des points du domaine tropical semi-aride, couverts de la même densité arborée et soumis à des données climatiques propres à chaque point et identiques entre toutes les simulations. En sortie d'expérience, on dispose donc, en chaque point du domaine étudié, du profil de réponse de la végétation à l'imposition d'un gradient de densités arborées.

Ces résultats, obtenus à l'échelle du domaine tropical semi-aride, forment un ensemble au sein duquel il est possible d'identifier des groupes de profils homogènes : les *régimes*² constituant la typologie exposée ensuite.

3.1.2 Typologie des profils de résultats

Ce regroupement de profils de réponse de la végétation selon le gradient de densité arborée suit un arbre de décision, représenté sur la figure 3.2. Cet arbre est composé d'une cascade de cinq règles de décision exclusives, appliquées au critère de développement des arbres. Il réalise une partition complète de l'ensemble des profils obtenus sur le domaine étudié. Les régimes sont délimités par quatre seuils, définis en fonction du niveau de développement maximal des arbres :

- Seuil0 : développement nul ;
- Seuil1 : 30% du maximum de développement des arbres ;
- Seuil2 : 50% du maximum de développement des arbres ;
- Seuil3 : 80% du maximum de développement des arbres.

Ces seuils ont été décidés de manière arbitraire, de manière à discriminer les résultats. Il serait possible de fixer le Seuil3 à 90% du maximum, le Seuil1 à 20% et le Seuil2 à 60%,

2. Les notions introduites sont définies dans le glossaire p. 112

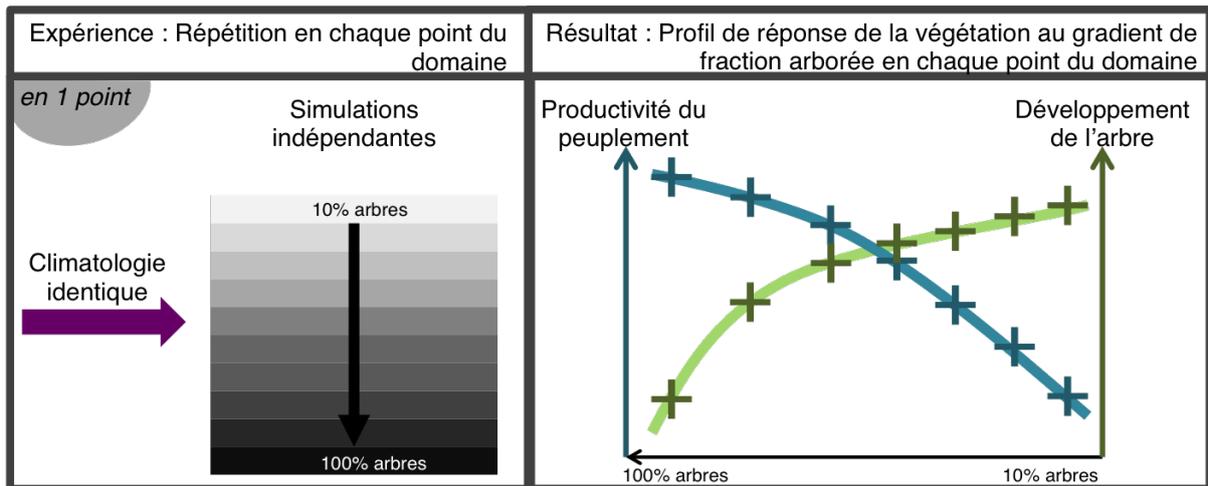


FIGURE 3.1 – *Représentation schématique du protocole expérimental.* A gauche : En chaque point du domaine étudié sont réalisées un ensemble de simulations indépendantes, recevant les mêmes données climatiques, et ne différant que par la densité d'arbres au sol. A droite : En chaque point du domaine, le niveau de développement atteint pour les arbres présents (axe vertical de droite) et la productivité totale calculée pour le peuplement pris dans son ensemble (axe vertical de gauche), sont analysés en sortie de chaque simulation indépendante, donc pour chaque valeur de densité arborée testée. A partir de ces deux ensembles de points sont tracées les courbes d'influence de la densité arborée sur le développement des arbres présents (courbe verte) et sur la productivité du peuplement arboré (courbe bleue). L'ensemble de ces deux courbes forme le « profil » (selon la définition donnée dans le glossaire) de réponse de la végétation à un gradient de densité arborée, en un point donné du domaine étudié. La représentation est idéalisée c'est pourquoi les résultats obtenus et présentés dans la suite ne lui sont pas superposables (eg figure 3.3)

par exemple. Ce qui compte ici, c'est que ces seuils soient respectivement *proche*, *éloigné* et *intermédiaire*, par rapport au maximum de développement. Les règles de décision positionnent alors les profils de développement obtenus en chaque point par rapport à ces seuils, en considérant soit le minimum, soit le maximum de développement sur le gradient de densité arborée. Le nom des régimes ainsi déterminés est indiqué sur la figure 3.2.

La figure 3.3 permet de visualiser la partition ainsi réalisée en appliquant la typologie aux résultats d'une expérience réalisée sur l'ensemble du domaine tropical semi-aride (à partir des données climatiques issues d'observations du CRU, comme au chapitre 2). Le diagramme est organisé comme celui de la figure 3.1, mais cette fois-ci les différents régimes sont distingués.

Les courbes de développement qui ont servi à identifier les régimes sont tracées en trait plein. Elles sont distribuées verticalement selon la position de leur minimum par rapport aux quatre seuils. Pour tous les régimes, *la courbe de développement diminue de façon continue à mesure que la densité arborée augmente, ce qui traduit l'effet de la compétition intra-spécifique au sein du peuplement arboré.* L'écart entre les courbes est induit par les différences de conditions climatiques et de ressources disponibles auxquelles est soumise la végétation dans les régimes correspondants. Pour la densité arborée la moins élevée (à droite), la compétition intra-spécifique est la moins importante.

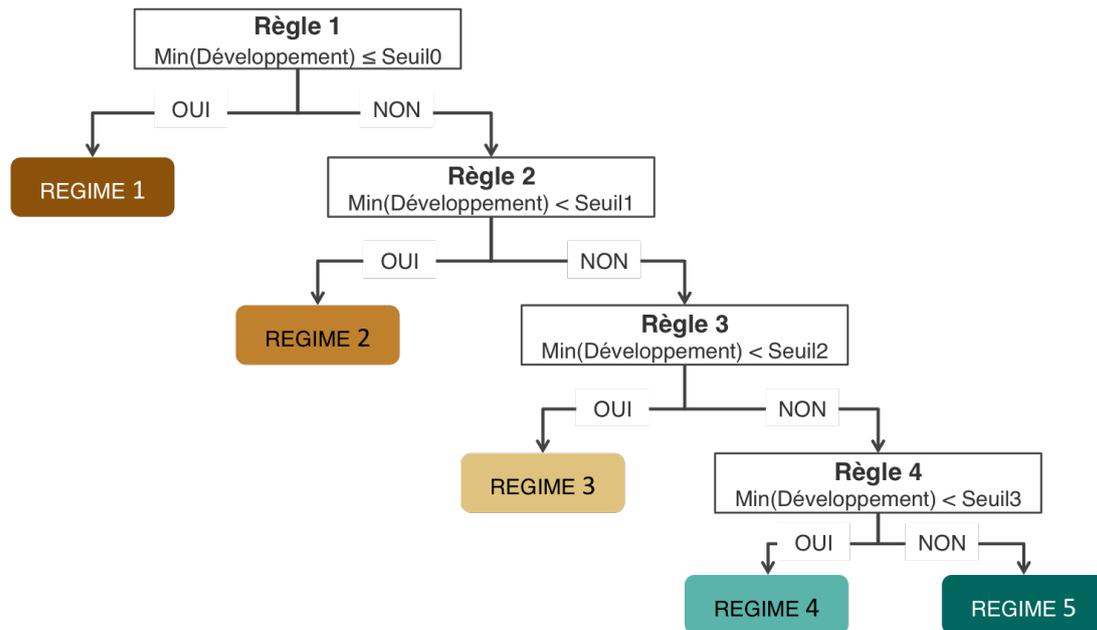


FIGURE 3.2 – *Arbre de décision permettant d'identifier les régimes.* Les seuils sont définis par rapport au développement des arbres, tel qu'indiqué dans le texte. Les règles de décision s'appliquent ici au profil de développement des arbres en fonction de la densité arborée. Les minima s'entendent sur les valeurs obtenues sur l'ensemble du gradient de densité arborée. L'application de cet arbre de décision est réalisée en chaque point du domaine étudié. Les couleurs associées à chaque régime seront réutilisées par la suite.

Les valeurs de développement qui y sont atteintes sont donc les moins influencées par cette compétition, et sont en majeure partie induites par la différence de ressources climatiques disponibles sur les points correspondant à chaque régime. Ces valeurs de la droite du graphique sont proches les unes des autres, dénotant la relative homogénéité des conditions climatiques du domaine tropical semi-aride étudié. Le fait qu'elles soient néanmoins distinctes reflètent, en la quasi-absence de compétition, des conditions plus ou moins favorables au développement dans chaque régime. Cet ordre des régimes du plus au moins favorable reste identique pour chaque fraction arborée. Une exception à cette règle est cependant observable sur la figure 3.3 : les positions relatives des régimes 1 et 2 sont inversées pour la plus petite densité arborée. Cette apparente contradiction avec le message précédent doit en réalité être nuancée par l'origine de la figure présentée ici : les courbes sont directement issues des résultats de l'expérience réalisée à partir des données d'observation qui fera l'objet de la section 3.3. Cette expérience est désignée dans la suite comme « expérience de référence ». Les courbes représentent donc des profils moyens obtenus sur des ensembles de points, dont la dispersion, hors de propos à ce stade de la présentation, n'est pas représentée. Néanmoins, c'est en partie cette dispersion qui détermine les positions relatives des valeurs moyennes.

Les courbes de productivité totale du peuplement arboré en fonction de la densité arborée sont représentées en trait pointillé. Leur augmentation est continue pour les régimes 2 à 5 le long du gradient de densité arborée. Or la productivité à l'échelle de l'arbre (assimilée ici au « développement ») diminue au contraire avec l'augmentation de la densité arborée du fait de la compétition inter-spécifique accrue (courbes pleines). Ce contraste traduit l'effet multiplicatif à l'échelle du peuplement, qui compense la perte

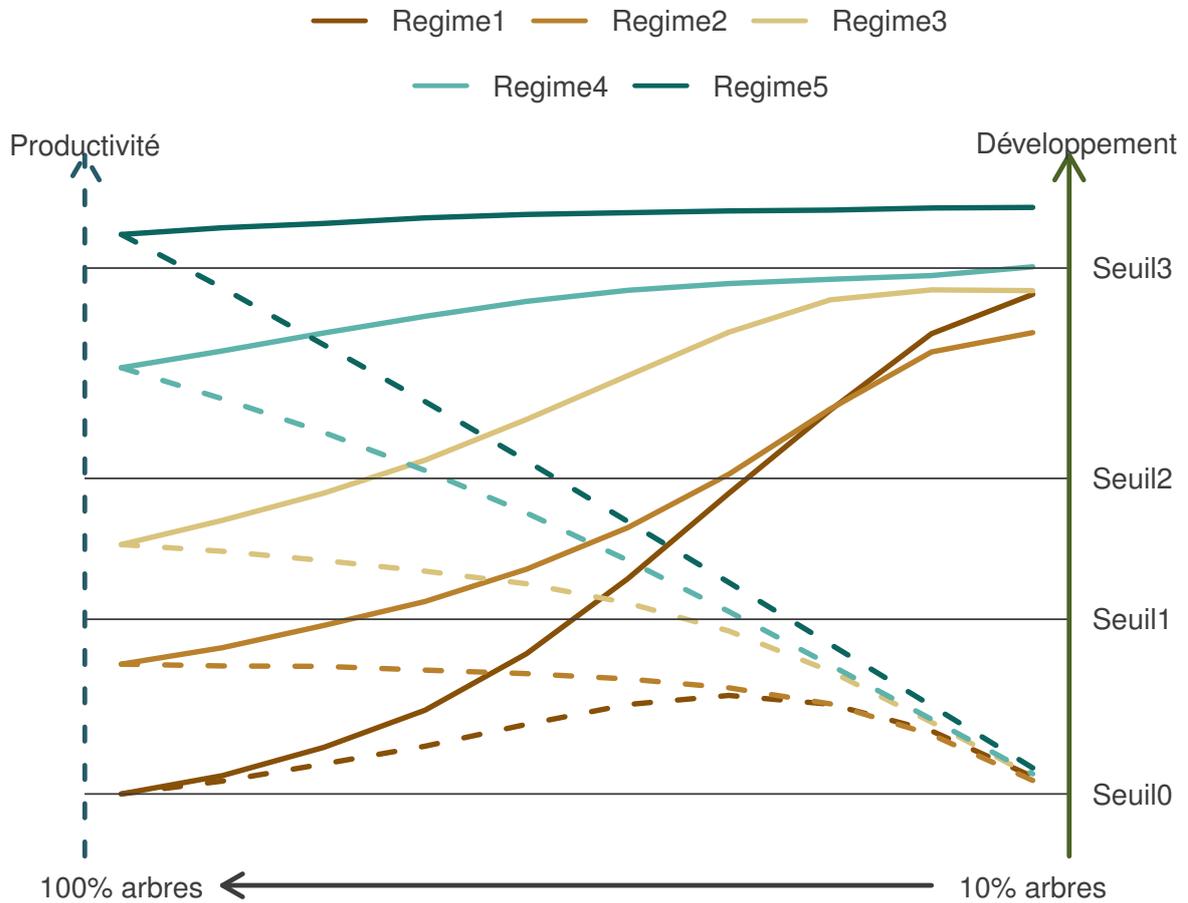


FIGURE 3.3 – *Schéma de répartition des régimes* selon les axes de densité arborée (abscisses), de développement de l'arbre (ordonnées à droite) et de productivité totale du peuplement (à gauche). Les deux axes verticaux partagent la même graduation, en biomasse produite par unité de surface. Les profils moyens représentés ici sont ceux calculés à partir des résultats (en $gC/m^2/an$) de l'application aux données d'observation du CRU, qui sont présentés à la section 3. Les courbes en trait plein figurent les profils de développement des arbres, ceux en trait pointillé les profils de productivité totale du peuplement. Pour la densité 100% d'arbres, la valeur atteinte à l'échelle du peuplement est égale à celle du développement des arbres. NB : cette figure sera retrouvée par la suite (figure 3.27). Elle a été lissée ici afin de mieux illustrer le propos.

<i>Définition</i>	
<i>régime 1</i>	Le développement des arbres est élevé pour les petites densités arborées et devient nul pour les celles les plus élevées, pour lesquelles aucun couvert arboré ne peut donc être maintenu.
<i>régime 2</i>	Le développement des arbres est élevé pour les petites densités arborées et jamais complètement nul sur l'ensemble du gradient, mais, pour les densités arborées les plus élevées, il devient très faible.
<i>régime 3</i>	Le développement des arbres est élevé pour les petites densités arborées, jamais nul, mais, pour les densités arborées les plus élevées, il devient moyen.
<i>régime 4</i>	Le développement des arbres est élevé pour toutes les densités arborées, tout en restant négativement influencé par celles-ci.
<i>régime 5</i>	Le développement des arbres est très élevé pour toutes les densités arborées et peu influencé par celles-ci.

 TABLE 3.1 – *Définition des régimes*

de productivité au niveau individuel. Le régime 1 se distingue des autres : l'allure convexe de la courbe de productivité totale signifie que la multiplication du nombre d'individus ne suffit pas, à partir d'un certain seuil de densité arborée, à compenser la diminution du développement de ces individus.

Les courbes de développement et de productivité se rejoignent, régime par régime, pour la densité 100% d'arbres, à gauche de la figure. C'est l'importation de ces courbes à partir des résultats de l'expérience de référence qui produit ce phénomène. Plus précisément, il s'agit d'un effet du modèle de végétation utilisé pour les simulations. La présentation plus approfondie du modèle et des modalités de mise en oeuvre de ce protocole d'expérience et d'analyse fait l'objet de la section 3.2. Une caractéristique du fonctionnement de ce modèle doit cependant déjà être signalée ici : la productivité totale d'un peuplement végétal « spécifique » (nous aborderons plus loin la notion de « type de végétation » avec laquelle est en réalité simplifiée la notion d'espèce) est calculée comme la pondération de la productivité des arbres par la proportion de surface qu'ils occupent en un point donné. Ainsi, si f est la fonction qui représente la simulation de la productivité des arbres par le modèle, si g représente la productivité totale du peuplement, et si x est la densité arborée exprimée entre 0 et 1, alors : $g(x) = x * f(x)$. Ceci explique que pour la densité arborée égale à 100% ($x=1$), la productivité totale du peuplement est égale à celle des arbres.

Une seconde implication de cette relation est que la partition de l'ensemble du domaine réalisée selon le critère de développement des arbres constitue en même temps une partition selon le critère de productivité totale du peuplement.

Les régimes ainsi construits sont présentés en quelques mots dans le tableau 3.1. Quelques précisions sont apportées ici :

- l'application des règles de décision à des fonctions continues permet d'affiner la définition des régimes : l'application stricte de la règle de décision permet d'affirmer que *il existe une fraction arborée telle que le développement des arbres est inférieur à un seuil*, la diminution continue du profil selon la densité arborée permet d'affirmer que toutes les valeurs du développement restent inférieures à ce seuil une fois franchi pour les fractions plus élevées ;
- les seuils de délimitation des régimes ont été fixés de manière arbitraire, non sur des valeurs de référence étayées par la littérature. Ils ont un sens conceptuel et méthodologique en permettant d'échelonner les niveaux de développement entre les valeurs les plus faibles, proches de zéro, et les plus élevées, proches du maximum obtenu sur le domaine étudié. De manière cohérente avec cette intention, les valeurs situées respectivement en-deça des seuils Seuil0, Seuil1 et Seuil2 seront qualifiées de « très faibles », « faibles » et « moyennes », tandis que celles situées au-dessus des seuils Seuil2 et Seuil3 seront qualifiées de « élevées » et « très élevées ». Dans le cadre d'une problématique spécifique, les valeurs de ces seuils gagneront bien entendu à être corrigées.

3.1.3 Commentaire sur la notion de compétition intra-spécifique dans les régimes

Cette approche a une correspondance avec la réalité dans le cas des écosystèmes fortement anthropisés : forêts exploitées, plantations arborées rentières et, dans une autre perspective, essais expérimentaux en milieu réel. Dans ce cas en effet, l'intervention humaine pourra ajuster les niveaux de développement des arbres plantés de manière à maintenir la densité arborée choisie. En revanche, dans le cas des écosystèmes naturels, la compétition induite par une densité arborée en contexte de ressources limitantes ne conduira pas directement au maintien d'un couvert arboré au niveau de développement homogène et faible. Les mécanismes de régulation de l'écosystème agissent sur la densité de peuplement et sur le niveau de développement des individus, et une densité « extrême » en termes de niveau de développement correspondant pourrait tout simplement ne pas exister. Dans cette logique, la lecture d'une configuration telle que : *pour les densités arborées élevées, le développement des arbres est nul* (régime 1), pourrait être interprétée en les *plantations arborées ne peuvent pas être maintenues pour des densités arborées élevées, et, en milieu naturel, la densité diminuera favorisant ainsi le maintien d'un peuplement moins dense d'individus au développement non nul, voire élevé*. Un axe d'interprétation de cette typologie est donc de déterminer les densités arborées « raisonnables ».

3.1.4 Glossaire des notions introduites

Deux notions ont été introduites pour l'élaboration de la typologie :

- ▶ **Profil** = ensemble des deux courbes de réponse de la végétation (productivité totale du peuplement et développement des arbres) au gradient de densité arborée, dans le cadre de l'expérience, en chaque point du domaine étudié ;
- ▶ **Régime** = regroupement formé par des profils similaires à l'échelle du domaine étudié.

Deux notions supplémentaires seront introduites et utilisées dans la suite :

- ▶ **Potentiel** = gamme ou enveloppe de valeurs de densité arborée pour lesquelles le niveau de développement des arbres est jugé acceptable, et des valeurs correspondantes de ce critères et de la productivité totale du peuplement ;
- ▶ **Optimum** = densité arborée permettant de réaliser le « meilleur compromis » entre les critères de développement des arbres et de productivité totale du peuplement, et leurs valeurs correspondantes.

Ces deux notions sont plus subjectives que les deux premières et seront abordées à partir de la section 3.4.

▶ La méthodologie proposée a vocation à dessiner, au sein du domaine tropical semi-aride, les contours de sous-régions homogènes en termes de relation entre productivité arborée et densité de peuplement. Elle repose sur un protocole expérimental utilisant un modèle global de végétation, et s'appuie sur une typologie des profils de résultats obtenus point par point pour partager le domaine en cinq *régimes*. Ceux-ci sont construits de manière à fournir un support d'interprétation en termes de *potentiel* climatique de maintien de couverts arborés. De manière générale, lorsque la densité arborée augmente le développement individuel des arbres diminue, du fait de la compétition intra-spécifique. Cette diminution peut être compensée à l'échelle du peuplement par la multiplication des individus. Les cinq régimes ainsi construits s'échelonnent du moins au plus favorable en termes de potentiel climatique.

→ Cette méthodologie a été appliquée à des données climatiques issues d'observations dans ce qui est désigné dans la suite comme l'*expérience de référence*. Dans la section suivante est présenté le modèle global de végétation utilisé pour réaliser cette expérience, ainsi que les modalités de la mise en oeuvre de la méthodologie avec ce matériel. Les résultats en seront exposés dans la section 3.3.

3.2 Mise en oeuvre avec le modèle global de végétation ORCHIDEE

3.2.1 Présentation du modèle

Le modèle ORCHIDEE, développé à l'IPSL³, constitue la composante du modèle intégré du système Terre représentant la surface continentale. Comme tout modèle numérique, la représentation d'une surface géographique donnée est discrétisée sous forme d'un maillage horizontal et vertical. Les bilans d'énergie, d'eau et de carbone sont résolus pour l'ensemble du système formé par le sol et la végétation, désigné par le terme « surface » dans le contexte du modèle.

Utilisé en mode dit « forcé », ORCHIDEE prend en entrée des données météorologiques qui forcent les processus de surface tels l'absorption, la réflexion et l'émission de rayonnement, l'émission de flux de chaleur et vapeur d'eau, l'évapotranspiration, l'infiltration, le ruissellement, le drainage, ainsi que tous les processus qui concernent le cycle du carbone dans les plantes et le sol. Les séries temporelles des variables climatiques sont considérées comme des données d'entrée du modèle ORCHIDEE.

Le modèle est structuré en fonction des processus simulés et des échelles temporelles de résolution de ces bilans. Seuls les modules utilisés dans ce travail sont décrits ici :

- le module SECHIBA (Ducoudré *et al.*, 1993) calcule les flux d'énergie et d'eau entre l'atmosphère et la surface, la photosynthèse et la respiration. Il s'agit des processus les plus rapides, traités à un pas de temps de 30 minutes ;
- le module STOMATE (Krinner *et al.*, 2005) simule la phénologie végétale et le cycle du carbone à une fréquence journalière.

Le modèle de végétation ne constitue pas un objet d'étude de ce travail de thèse, mais un outil. Il est donc présenté ici de manière à donner une vision d'ensemble de sa structure et de son fonctionnement, sans entrer dans les détails. Les hypothèses et les paramètres du modèle qui sont particulièrement pertinents au regard de la problématique sont plus approfondis. La présentation complète du modèle est réalisée dans Krinner *et al.* (2005).

3.2.1.1 Module SECHIBA : processus biogéophysiques

Bilan d'énergie. Le bilan d'énergie s'applique à l'interface entre l'atmosphère et la « surface », constituée du sol et de la végétation et dont l'épaisseur est négligée. Il s'écrit sous la forme :

$$R_n = G + H + LE$$

où R_n représente le rayonnement net, G le flux de chaleur vers le sol (calculé selon la loi de Fourier ; il ne sera pas spécifiquement examiné dans ce manuscrit), H le flux de chaleur sensible vers l'atmosphère et LE le flux de chaleur latente vers l'atmosphère. Le stockage de chaleur par la végétation et l'air en surface est négligé.

Le **rayonnement net** absorbé par la surface résulte du bilan entre les gains d'énergie radiative en provenance de l'atmosphère (énergie solaire et rayonnement infrarouge atmosphérique) et les pertes par réflexion de l'énergie solaire et par rayonnement infrarouge terrestre. Parmi les termes de ce bilan, l'**albédo** revêt une importance particulière dans le cadre de notre problématique. Sa valeur diffère selon le type d'occupation du sol (sol

3. Institut Pierre et Simon Laplace

nu ou type de végétation) et son état (saturation en eau du sol nu, état de la végétation). L'albédo du sol nu dépend de la couleur du sol prescrite dans le modèle d'après la carte de Wilson et Henderson-Sellers (1985). Neuf classes sont définies, pour lesquelles deux valeurs d'albédo sont associées : une pour le sol saturé en eau et une pour le sol sec. Pour la végétation, une valeur spécifique d'albédo est attribuée à chaque type de végétation (qui seront définis par la suite, et listés dans le tableau 3.2). La valeur effective d'albédo est pondérée par le développement foliaire de chaque type de végétation.

L'assimilation de la surface à une couche unique sans épaisseur impose des simplifications considérables. La température de surface, en particulier, ne correspond donc pas exactement à la température de l'air au niveau du sol, mais à une température moyenne de l'ensemble de la masse d'air comprise entre le sol et le haut de la canopée.

Les **flux turbulents** vers l'atmosphère (H et LE) sont modulés par des résistances. La **résistance aérodynamique** intervient dans le flux de chaleur (H) et dans le flux de vapeur d'eau (LE). Elle dépend notamment de la rugosité de surface, avec laquelle elle augmente, déterminée en fonction de la surface foliaire et de la hauteur prescrite de la végétation. Parmi d'autres paramètres, la **conductance stomatique** conditionne la transpiration des végétaux et donc le flux de chaleur latente vers l'atmosphère. Ce paramètre explicitement calculé par le modèle relève à la fois des processus biophysiques et biochimiques : en régulant la photosynthèse, il influence le flux de CO₂ vers la plante et la croissance de la végétation. La conductance stomatique et l'assimilation photosynthétique sont calculées ensemble en résolvant un système d'équations (différent selon que la photosynthèse suit un modèle en C3 ou en C4).

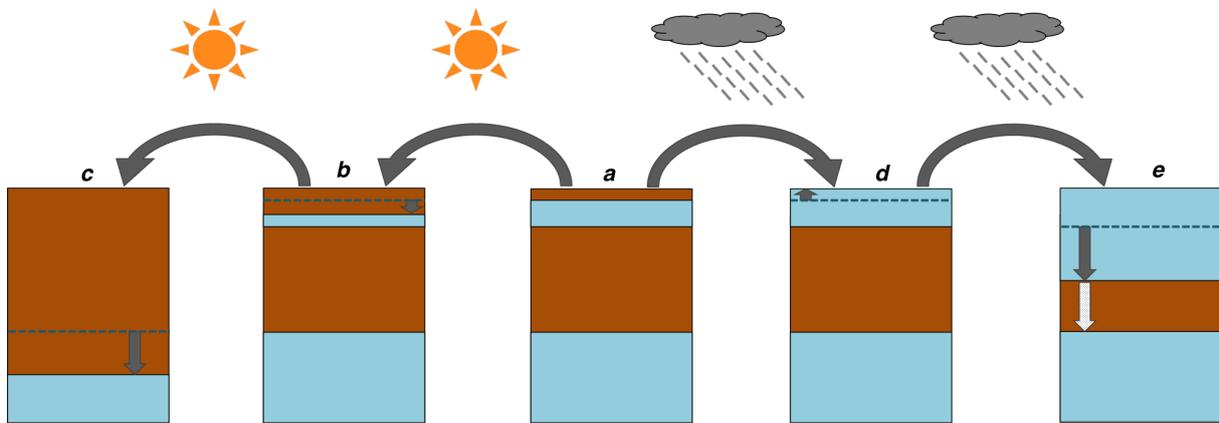


FIGURE 3.4 – *Schéma d'hydrologie du sol selon Choissnel dans le modèle ORCHIDEE.*

La figure se lit du centre (a) vers les bords. Dans la situation de référence (a) deux réservoirs d'eau (bleu) existent : un réservoir superficiel et un réservoir profond. Ces deux réservoirs sont saturés en eau, tandis que les couches de sol sec (brun) sont complètement désaturées. La profondeur du sol est de 2 m. Par temps sec, l'évaporation en surface induit la vidange progressive du réservoir superficiel (b). Lorsque ce dernier est vide (c), la vidange du réservoir profond prend le relais. Par temps de pluie, le réservoir superficiel se remplit : la couche sèche de surface devient saturée en eau (d), puis le réservoir superficiel continue à se remplir (e). Lorsque celui-ci rejoint le niveau du réservoir profond (flèche pointillée), le sol est complètement saturé en eau.

Schéma d'hydrologie du sol. Le bilan d'eau dans le sol est réalisé entre la surface du sol, un réservoir superficiel et un réservoir profond (figure 3.4). Toute la profondeur

du sol est potentiellement accessible par les plantes via une profondeur et une densité d'enracinement paramétrées pour chaque type de plante. Le fonctionnement de ce sous-modèle est schématisé et expliqué figure 3.4. Sur chaque maille, les contenus en eau des deux réservoirs sont calculés séparément pour chaque type d'occupation du sol à chaque pas de temps (30 min). Les réservoirs profonds sont ensuite « mélangés » à la fin de chaque pas de temps, de sorte que tous les types de plante présents disposent du même contenu en eau dans le réservoir profond, mais de réservoirs superficiels distincts, au pas de temps suivant. Ce partage implique qu'une certaine compétition pour l'eau entre les différents types de végétation présents sur la maille peut être simulée.

3.2.1.2 Module STOMATE : processus biogéochimiques

Types fonctionnels de végétation. En 2016, les types fonctionnels de plante (en anglais *Plant Functional Type*, PFT) constituent encore la représentation la plus courante des couverts végétaux dans les modèles globaux de végétation : les grandes familles d'espèces végétales connues sur la surface du globe sont regroupées en un nombre restreint de PFT - 13 dans le cas du modèle ORCHIDEE. Ainsi, l'ensemble des prairies herbacées de la surface du globe sont représentées par deux PFT, distinguant les deux principaux types de fonctionnement photosynthétique : celui des herbacées en C3 et celui de celles en C4. Ce dernier type est adapté aux climats chauds, où la forte demande évaporative fait courir le risque d'une perte d'eau trop élevée par transpiration. Les stomates, par lesquels s'effectuent les échanges gazeux, sont préférentiellement fermés en conditions arides, ce qui limite les pertes d'eau mais aussi l'entrée du CO₂ nécessaire à la photosynthèse. Le cycle photosynthétique en C4 permet d'optimiser l'utilisation du CO₂ et ainsi de maintenir une photosynthèse efficace avec une ouverture minimale des stomates.

Les différents PFT sont présentés dans le tableau 3.2. La modélisation du fonctionnement de la végétation, qui sera plus détaillée dans la suite, fait appel à différents paramètres (parmi d'autres : l'albédo et la hauteur prescrite) permettant de représenter les spécificités de fonctionnement associées à chaque PFT.

Sur chaque maille, plusieurs PFT peuvent être présents en même temps, ce qui permet de tenir compte de la variabilité sous-maille quand celle-ci est trop élevée pour être représentée par un seul type de végétation. Ainsi, comme le montre la figure 3.7, une savane peut être modélisée comme la combinaison d'arbres et d'herbacées.

► Dans la suite, nous réduirons l'étude à un seul type d'arbre, adapté aux climats tropicaux et à des conditions limitantes en eau : le PFT3, « arbre feuillu décidu tropical ». Il sera combiné au PFT11, « herbacée en C4 » pour simuler des couverts arborés clairsemés.

Pour tous les PFT végétaux, les principales étapes saisonnières de leur fonctionnement sont :

- le déclenchement de la croissance ;
- la production (photosynthèse) et la destruction (respiration) de carbone organique ;
- l'allocation du carbone organique entre les différents organes et la production de biomasse ;
- le renouvellement des organes (feuilles, racines...) et la production de litière ;
- la senescence et la fin de la saison de croissance.

Indice du PFT	Type végétal	Climat	Albédo moyen des feuilles VIS
1	Sol nu	-	-
2	Arbre feuillu sempervirent	Tropical	0.12
3	Arbre feuillu décidu	Tropical	0.14
4	Arbre résineux sempervirent	Tempéré	0.14
5	Arbre feuillu sempervirent	Tempéré	0.14
6	Arbre feuillu décidu	Tempéré	0.14
7	Arbre résineux sempervirent	Boréal	0.14
8	Arbre feuillu décidu	Boréal	0.14
9	Arbre résineux décidu	Boréal	0.14
10	Herbacée en C3	-	0.20
11	Herbacée en C4	-	0.20
12	Culture en C3	-	0.20
13	Culture en C4	-	0.20

TABLE 3.2 – *Définition des types fonctionnels de plante (PFT) propres au modèle ORCHIDEE. Les valeurs d'albédo des feuilles (sans unité) sont calculées en moyenne pour l'ensemble du domaine visible et proche infra-rouge. Les deux PFT qui seront utilisés par la suite (PFT3 et PFT11) sont surlignés.*

Simulation de la productivité primaire. La figure 3.5 illustre la modélisation des processus de photosynthèse et de respiration de la plante dans le modèle ORCHIDEE.

Les échanges de gaz entre la plante et l'atmosphère se produisent au niveau de la feuille. Ils sont déterminés par les conditions atmosphériques de rayonnement solaire, de concentration en CO_2 et de température et d'humidité de l'air au niveau de la canopée. Alors que ces dernières sont considérées comme identiques à tout niveau de la canopée, l'interception de rayonnement solaire tient compte de l'effet d'extinction au cours de la traversée de la canopée : l'interception est plus importante au sommet et diminue en suivant la loi de Beer-Lambert jusqu'à la base. Les autres déterminants des processus photorespiratoires sont des paramètres spécifiques du PFT considéré. Certains d'entre eux (par exemple la vitesse maximale de carboxylation, le principal processus de la photosynthèse) dépendent des conditions de température ainsi que de la position de la feuille dans la canopée : ceci permet de tenir compte à la fois de l'extinction lumineuse (moins de rayonnement disponible à la base de la canopée) et de la disponibilité en azote (moins importante au sommet de la canopée) qui influencent l'efficacité photosynthétique. La canopée est ainsi divisée verticalement en 20 niveaux.

Les bilans énergétiques sont réalisés à l'échelle de la feuille, où l'énergie reçue dépend donc du niveau occupé dans la canopée. Sur la somme du carbone organique (*Gross Primary Production* en anglais, GPP) total produit par la photosynthèse, un prélèvement (au maximum de 80%) est affecté à la respiration de maintenance. Le reste du carbone assimilé est distribué entre les différents organes ; une partie de cette allocation (au moins 20%) est prélevée au niveau de chaque organe et restituée à l'atmosphère au cours de la respiration (de croissance). La quantité nette de carbone organique restant dans la plante est la *production primaire nette* (*Net Primary Production* en anglais, NPP). Les taux d'allocation du carbone organique et de consommation par la respiration sont déterminés par des paramètres spécifiques du PFT. Enfin, une partie de la biomasse produite alimente

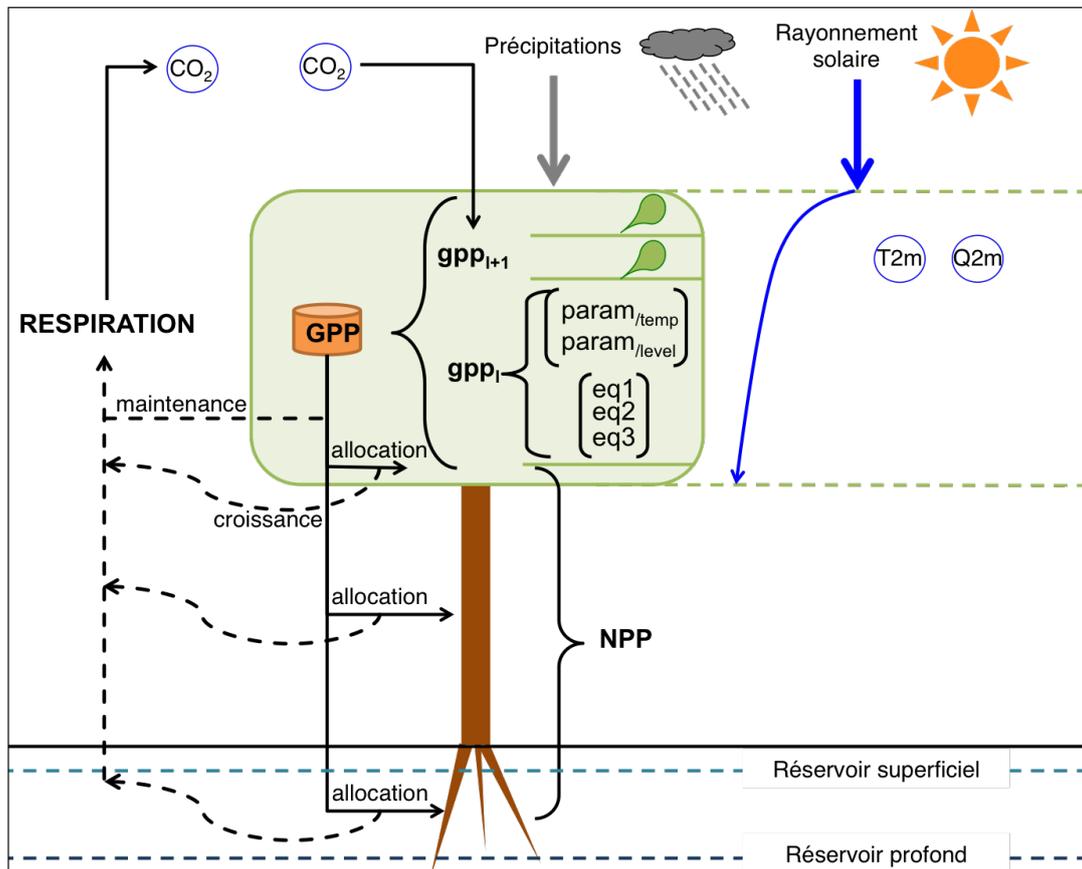


FIGURE 3.5 – *Simulation de la productivité de l'arbre dans ORCHIDEE.* A l'échelle de la feuille, un système d'équations est résolu permettant de calculer la quantité de carbone assimilé au cours de la photosynthèse. La canopée est divisée en 20 couches verticales sur lesquelles la productivité primaire brute intermédiaire (gpp_i) est calculée. La production intégrée à l'échelle de l'ensemble du feuillage constitue la productivité primaire brute totale (GPP). A celle-ci est soustraite une certaine quantité de carbone au titre de la respiration de maintenance. Le reste du carbone assimilé est alloué aux différents organes de l'arbre (flèches noires en trait plein), moins un prélèvement au titre de la respiration de croissance au niveau de chaque organe (flèches noires en trait pointillé).

une réserve qui sera utilisée pour le débourrement au début de la saison de croissance suivante. La productivité primaire est le processus de base du fonctionnement des plantes dans le modèle, donc aussi - pour la suite de ce travail - le meilleur indicateur de bon développement des arbres.

Simulation du début et de la fin de la saison de croissance. L'activité photosynthétique de la plante n'est déclenchée, au cours de la simulation, qu'entre les dates de début et de fin de saison de croissance. Cette saison est déterminée annuellement, à partir des conditions pédo-climatiques. Dans cet intervalle saisonnier, c'est l'état de la plante qui détermine sa capacité ou non à entrer en production. De la même façon, l'état de la plante et les conditions pédoclimatiques détermineront la senescence de la plante et l'arrêt de la production primaire, jusqu'à la saison suivante. Ces mécanismes ne sont décrits ici que dans le cas des deux PFT utilisés : l'arbre des régions tropicales semi-arides (PFT3) et l'herbacée en C4 (PFT11).

Comme l'**arbre** est adapté à des conditions tropicales dans lesquelles la température n'est jamais considérée comme limitante, la saison de croissance est entièrement déterminée par l'humidité du sol, elle-même pilotée par les précipitations et l'évaporation. Durant la saison sèche, en l'absence de couvert arboré, l'humidité du sol soit demeure à peu près constante (si elle est proche de zéro), soit diminue sous l'effet de l'évaporation de l'eau du sol. Lors des premières pluies, l'humidité du sol commence à augmenter : c'est cette inflexion de tendance qui constitue le signal de démarrage de la saison de croissance. Un délai de plusieurs jours est imposé, de manière à laisser l'humidité du sol augmenter à la faveur des pluies suivantes, avant de donner le signal de débourrement. Celui-ci est effectué en puisant dans la réserve de biomasse de la plante pour permettre aux premières feuilles de se développer et d'entamer l'activité photosynthétique. Le contenu de cette réserve de biomasse est critique : s'il est insuffisant, soit la plante ne débourrera pas, soit elle ne pourra pas assurer une productivité suffisante pour se développer, et elle entrera prématurément en senescence. La senescence est déclenchée soit faute de productivité suffisante, comme nous venons de le voir, soit lorsque l'humidité du sol devient trop faible, ce qui signale la fin de la saison de croissance. Un troisième mécanisme est celui de la senescence des feuilles, déterminée par l'âge de celles-ci et en permettant le renouvellement.

Dans ce travail, les conditions semi-arides rencontrées, associées à la forte dispersion des pluies, conduisent dans certaines configurations limites à des démarrages précoces de la végétation sous l'effet des premières pluies sur un sol presque entièrement sec. En effet, si c'est le contenu en eau du sol qui est représenté sur la figure 3.6 pour faciliter la compréhension, le critère réellement utilisé dans le modèle est celui du taux d'humidité disponible : la moyenne des 7 derniers jours écoulés est rapportée à celle des 20 derniers jours et l'inflexion de ce rapport déclenche le compteur qui induit le démarrage de la saison de croissance 50 jours plus tard si l'humidité n'a pas rediminué. Dans les situations extrêmes, comme un sol totalement sec en saison sèche (conditions quasi-désertiques) ou presque totalement saturé toute l'année (conditions équatoriales), ce critère est rendu trop sensible à des petites variations d'humidité, faisant courir le risque de faux départs. Le PFT3 utilisé ici n'est pas conçu pour ces situations extrêmes. Le protocole expérimental mis en oeuvre (détaillé dans la suite) demande néanmoins à tenir compte de ces situations extrêmes d'une façon aussi réaliste que possible : éviter les faux-départs dans les conditions quasi-désertiques et maintenir un couvert permanent dans les conditions

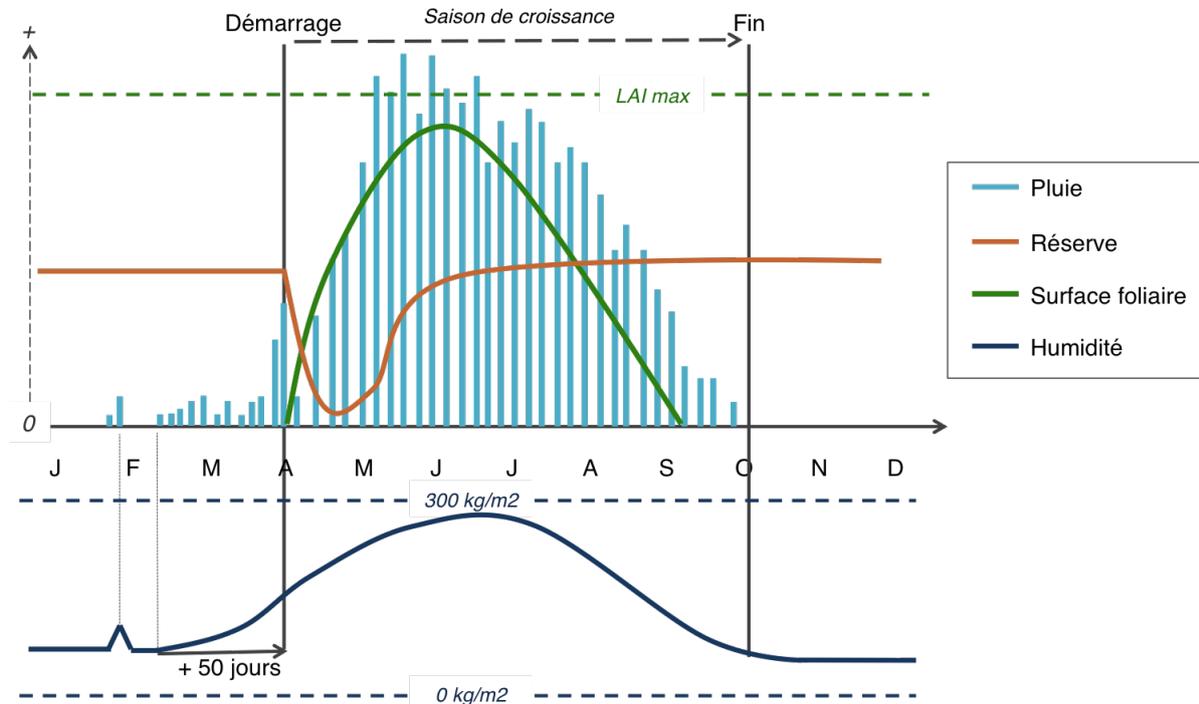


FIGURE 3.6 – *Simulation de la saison de croissance dans ORCHIDEE* : représentation schématique, à vocation illustrative. Les précipitations sont figurées par les barres bleu clair, en fonction du temps (axe horizontal gradué en mois). Chaque barre représente la somme des précipitations sur plusieurs jours. La courbe du bas, bleu foncé, représente le contenu en eau du sol. Stabilisé à une valeur basse au cours de la saison sèche, il connaît une brève augmentation lors des premières pluies, puis regagne sa valeur initiale. Ce pic éphémère n'est pas suffisant pour déclencher la saison de croissance (50 jours, par défaut). La reprise des pluies induit une nouvelle augmentation du contenu en eau du sol, qui se prolonge au-delà du seuil de déclenchement de la saison de croissance. La croissance commence par la production de feuilles en puisant dans la réserve de carbohydrates (courbe orangée) qui diminue alors. La courbe verte représente l'augmentation de la surface foliaire et la production de carbone organique. Cette activité permet de reconstituer la réserve de carbohydrates (la courbe orangée augmente de nouveau). La senescence peut être déclenchée par le franchissement d'un seuil critique de proportion de feuilles âgées et/ou par la diminution de l'eau disponible. L'âge des feuilles influe aussi sur leur efficacité photosynthétique. L'axe vertical montre l'augmentation des valeurs de pluies en mm, de surface foliaire (jusqu'au maximum de LAI (Leaf Area Index en anglais)) et de réserve en carbohydrates en masse de carbone.

équatoriales. Pour limiter les faux-départs dus à des fluctuations infimes de l'humidité, la condition d'inflexion du profil de disponibilité en eau du sol a donc été durcie en imposant un seuil minimal de variation. De la même façon, la réponse aux variations minimales d'humidité (qui pourraient déclencher la sénescence des plantes) dans les conditions très humides est limitée par un seuil de variation minimale.

Dans le cas des **herbacées** (PFT11), une condition thermique est ajoutée au critère d'humidité du sol pour déterminer le début de la saison de croissance : des températures basses induisent la fin de la saison et le débournement n'est autorisé qu'au terme d'une période de réchauffement de l'air.

→ Le fonctionnement global du modèle ORCHIDEE est schématisé sur les figures 3.7 et 3.8. La première décompose le traitement spatial d'un couvert du sol complexe incluant une variabilité sous-maille. La seconde illustre la séquence temporelle et l'imbrication de différentes fréquences de calcul dans le modèle.

Sur la figure 3.7, le maillage de la surface (partie haute de la figure) est occupé par différentes combinaisons de PFT : un seul PFT est utilisé pour simuler certains écosystèmes comme la forêt ou la prairie, tandis que la savane est simulée par la combinaison de deux PFT. Comme il est signalé en commentaire, chaque PFT représente en réalité un ensemble d'essences arborées ou herbacées. A l'échelle de chaque maille la simulation est conduite dans le temps (symbole en forme d'horloge) indépendamment des autres mailles. A l'échelle d'une maille, la séquence temporelle de simulation est conduite séparément pour les deux PFT représentés en surface et pour le réservoir de sol superficiel qui correspond à chacun (partie basse de la figure). Le réservoir profond est commun aux deux PFT.

Sur la figure 3.8 est illustrée l'imbrication des échelles de temps : la fréquence de calcul du module SECHIBA (30 min, partie c de la figure) est incluse dans celle du module STOMATE (1 jour, partie b) et l'enchaînement des journées à l'échelle annuelle est représentée dans la partie a (tous les jours ne sont pas représentés, pour faciliter la lecture).

Module SECHIBA : les variables climatiques (cercle bleu) sont utilisées pour calculer les bilans d'énergie et d'eau (cercle rouge). Le carbone assimilé (GPP) est stocké dans la plante.

Module STOMATE : les opérations d'allocation de la biomasse sont réalisées.

3.2.2 Mise en route du modèle

3.2.2.1 Forcer le modèle : données climatiques, de sol et de végétation

En mode forcé, l'état de l'atmosphère est imposé au modèle ORCHIDEE.

Données climatiques. Les variables atmosphériques nécessaires au forçage d'ORCHIDEE sont :

- la température de l'air ambiant (à 2 mètres au-dessus du sol) ;
- l'humidité relative de l'air ambiant (à 2 mètres au-dessus du sol) ;
- la pression de surface ;
- les précipitations ;

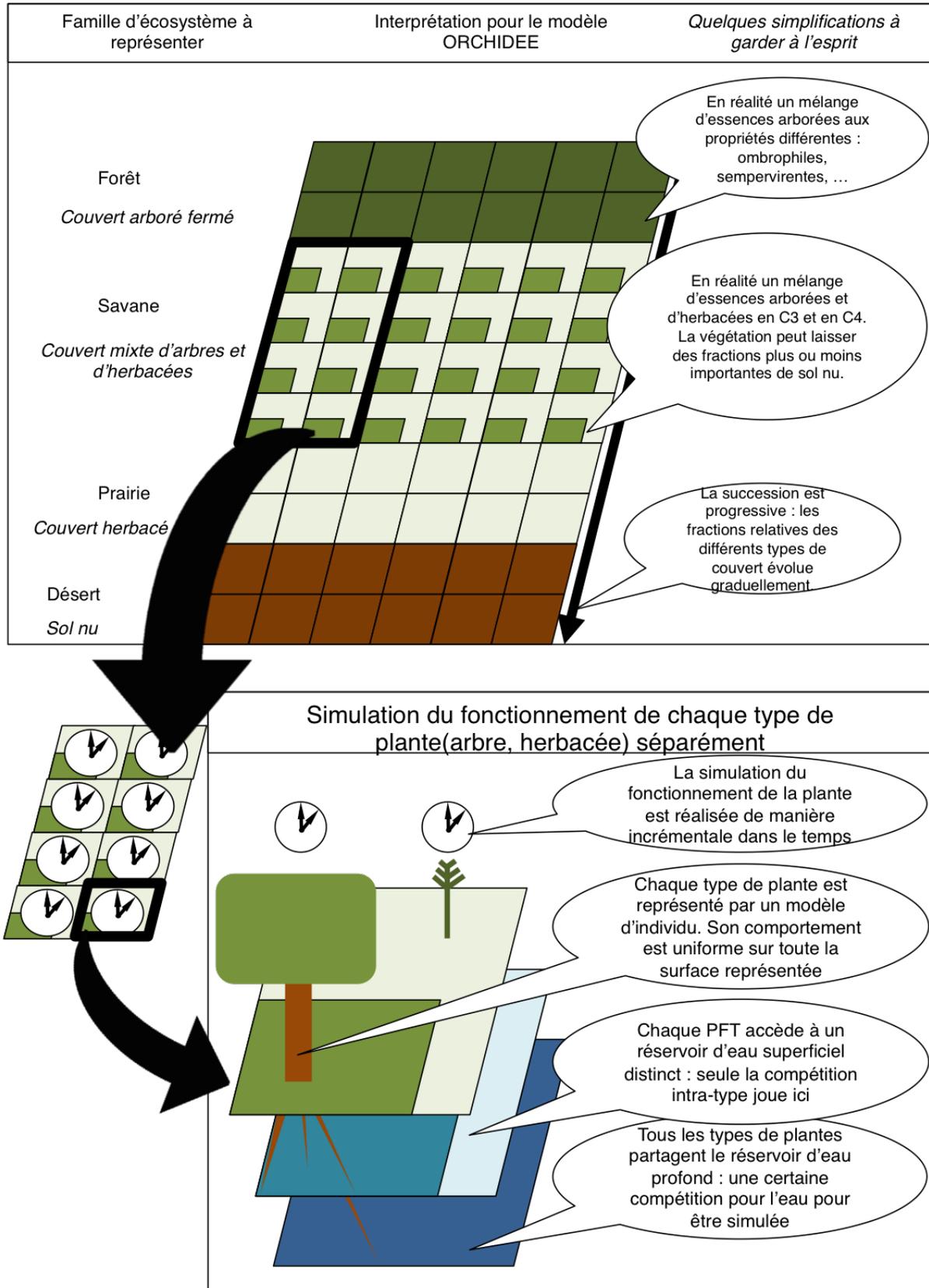


FIGURE 3.7 – *Représentation du fonctionnement du modèle ORCHIDEE : Représentation spatiale de la couverture du sol. Précisions et nuances sont apportées en commentaires sur la droite de la figure.*

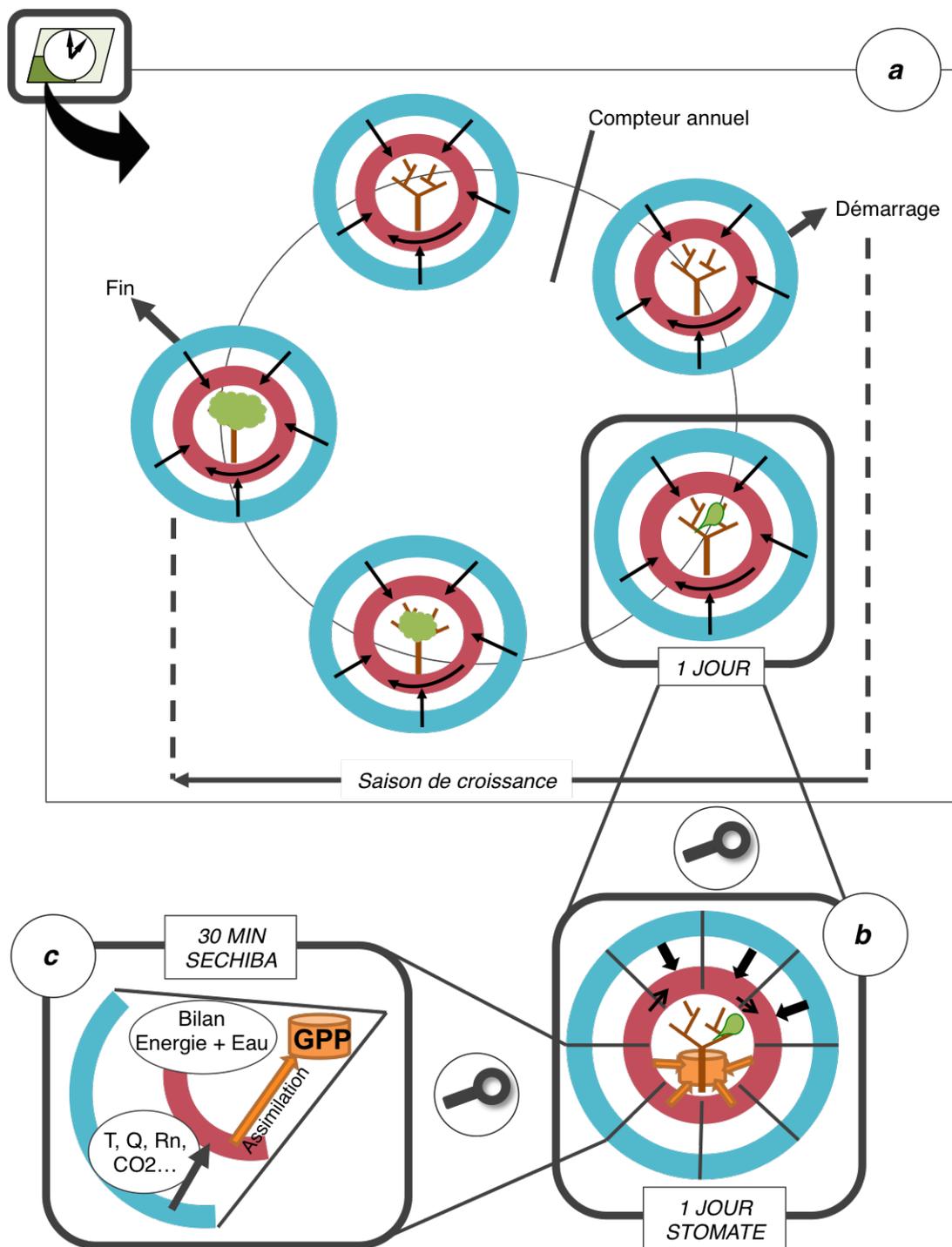


FIGURE 3.8 – *Représentation du fonctionnement du modèle ORCHIDEE : Séquence temporelle de la simulation.* a) Fréquence annuelle : le repère calendaire de milieu de période hivernale est fixé chaque année (compteur annuel). Les dates de début et de fin de saison de croissance sont déterminées à partir des conditions climatiques (figure 3.6); b) Fréquence journalière (module STOMATE); d) Fréquence subhoraire (module SECHIBA). Le cercle bleu figure les conditions climatiques, imposées lors de la simulation; le cercle rouge la surface (sol+canopée). L'état de l'arbre au centre est actualisé au pas de temps journalier.

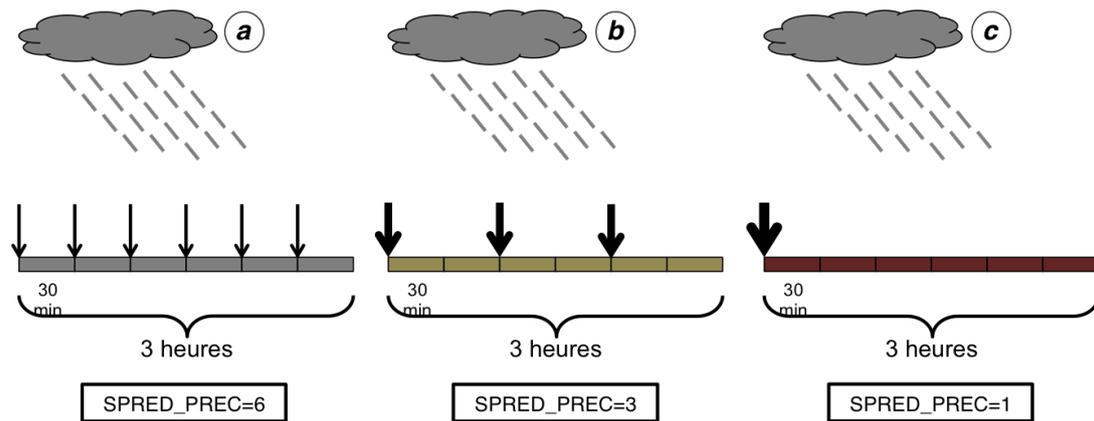


FIGURE 3.9 – *Différents modes de répartition des précipitations.* Lorsque les données de précipitations en entrée sont à une fréquence de 3 heures (cas des données CRU, par exemple), elles doivent être interpolées au pas de temps du module SECHIBA, de 30 min. Trois schémas de redistribution sont possibles : a) partition homogène de la valeur donnée pour 3 h en six demi-heures ; b) partition homogène en trois heures, telles que des pluies sont imposées un pas de temps sur deux ; c) la totalité des précipitations est imposée sur le premier pas de temps de l'intervalle de trois heures.

- le rayonnement incident dans l'infra-rouge ;
- le rayonnement incident dans le visible ;
- la vitesse du vent dans sa dimension horizontale (à 10 mètres au-dessus du sol).

A ces variables doit être ajoutée la teneur atmosphérique en CO_2 .

Les variables atmosphériques sont utilisées au pas de temps de la composante du modèle réalisant les bilans d'énergie et d'eau, soit 30 min. Toutefois, les données utilisées comme forçages peuvent être fournies avec un pas de temps plus large : dans ce cas, elles seront interpolées à l'échelle de la demi-heure selon différentes modalités et différents niveaux d'interpolation, introduisant une source supplémentaire d'incertitude dans les simulations (figure 3.9). Cette approximation permet par ailleurs des économies en espace de stockage et en temps de traitement des fichiers de forçages, qui doivent être préparés avant de pouvoir être utilisés pour faire tourner le modèle.

Le schéma de répartition des précipitations à l'échelle de la demi-heure est paramétrable par l'utilisateur du modèle, qui peut choisir soit de répartir également les précipitations sur l'ensemble de la période de 3 heures, soit d'imposer une application de la totalité des précipitations de la période de 3 heures sur le premier pas de temps, soit d'imposer une répartition intermédiaire. Chacune de ces options constitue une simplification, et ce d'autant plus qu'on travaille à échelle spatiale étendue, dans des conditions réelles hétérogènes : le régime (fréquence et intensité) des pluies diffère d'une région, d'un site, à l'autre. Dans ce travail, c'est l'option intermédiaire que nous avons retenue : il pleut toutes les heures si le volume des pluies sur 3 heures est non nul.

Prescription de la végétation. Le couvert du sol doit être prescrit pour chaque maille du domaine sur lequel est réalisée la simulation, à la résolution (spatiale) du forçage climatique. La « carte de végétation » admet toutes les combinaisons des PFT, dans la limite de ces deux contraintes :

- 100% de la surface de la maille doit être couverte ;
- les PFT ne peuvent pas être superposés.

Enfin, la carte de végétation peut être modifiée chaque année de simulation.

Les PFT sont traités séparément et sans hétérogénéité interne : tout se passe comme si chaque PFT était constitué par un seul individu occupant toute la surface de la maille, et soumis à des conditions environnementales homogènes sur toute cette surface. La combinaison du fonctionnement des différents PFT est calculée comme la somme des produits du fonctionnement de chacun des PFT présents, pondérée par leur taux d'occupation du sol.

Données de sol. Pour ce travail, la couleur du sol est imposée en chaque maille par la lecture de la carte de référence (Wilson et Henderson-Sellers, 1985).

3.2.2.2 Initialisation - Mise à l'équilibre

Différentes composantes du modèle doivent être initialisées : le contenu en eau et le contenu en carbone du sol. Le choix d'équilibrer les réservoirs permet de démarrer les simulations dans des conditions stabilisées et d'analyser les conséquences du fonctionnement de la biosphère terrestre sur cet équilibre. L'équilibrage du carbone est habituellement motivé par la problématique du stockage par les écosystèmes, qui n'est pas celle qui nous intéresse ici. C'est donc uniquement le contenu en eau qui est équilibré, par la méthode du *spinup*. Le principe est de réaliser une simulation itérative à partir d'un jeu de données climatiques et de suivre l'évolution d'une variable indicatrice (ici le contenu en eau du sol). L'équilibre est atteint une fois que la variable est stabilisée. Au démarrage de la simulation, le contenu en eau du sol est fixé à sa valeur maximale. Au cours des premières années de simulation, le réservoir d'eau du sol va être vidé par le prélèvement des plantes et l'évaporation, tout en étant alimenté d'autre part par les précipitations.

3.2.3 Configuration et protocole de simulation

L'objectif est de comparer les résultats obtenus en sortie de modèle avec plusieurs fractions arborées, afin d'identifier celle qui donne les résultats les plus satisfaisants, au regard de l'optimisation d'un critère à déterminer. Pour une expérience dans un climat donné, une série de simulations est donc réalisée, toutes ne différant que par la fraction arborée imposée.

Prescription du couvert végétal

Comme il a été dit précédemment, le couvert végétal est composé d'un mélange d'arbres et d'herbacées en C4, correspondant respectivement aux PFT 3 (forêt décidue humide tropicale) et 4 (herbacée en C4). La couverture végétale des zones semi-arides peut être assimilée à un mélange d'arbres et d'herbacées, dans des proportions variables. L'approche consiste ici à ne pas faire de postulat *a priori* sur ces proportions et à tester les mêmes combinaisons en tout point semi-aride des zones tropicales et subtropicales. L'objectif est d'identifier en chaque point la combinaison optimale. La végétation est donc prescrite de manière homogène sur l'ensemble du domaine géographique modélisé. Dix simulations parallèles indépendantes sont réalisées. Dans chacune, la composition du

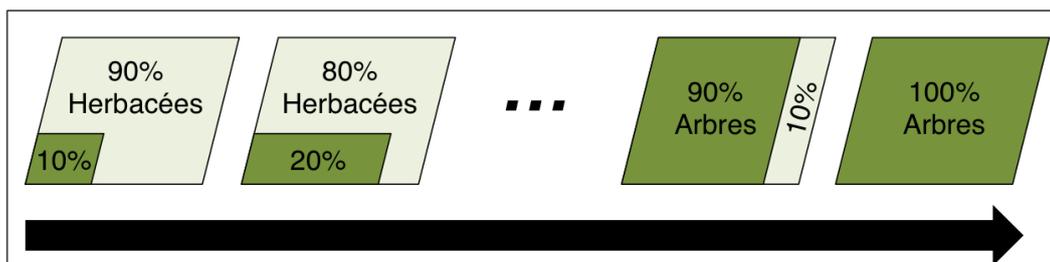


FIGURE 3.10 – *Composition du couvert végétal prescrit dans les 10 simulations constituant une expérience : Gradient de fractions arborées.*

couvert est de la forme : $x\%$ d'arbres + $(100-x)\%$ d'herbacées, x prenant toutes les valeurs de 10 à 100%, par intervalle de 10% (figure 3.10).

Dans les conditions aux limites des conditions semi-arides on attend une disparition ou à une occupation totale du PFT arboré dans les conditions respectivement très arides (par exemple dans le Sahara) et très humides (par exemple dans la forêt centrafricaine).

Données climatiques

Les données d'observation climatiques issues du CRU ont déjà été présentées au chapitre 2. Elles sont fournies au pas de temps de 3 heures (et seront interpolées à la fréquence horaire, comme indiqué sur la figure 3.9). **L'intervalle de 15 années 1991-2005 est sélectionné pour représenter la période actuelle.**

Protocole de simulation

Les simulations sont réalisées pour le globe limité aux latitudes tropicales et subtropicales.

La longueur d'intervalle temporel - 15 années - est fixée comme compromis pour inclure une variabilité interannuelle en limitant la tendance liée au réchauffement climatique. Ce choix permet de poser l'hypothèse d'un climat stabilisé.

Le modèle est d'abord forcé avec cette série climatique, répétée autant de fois que nécessaire jusqu'à atteindre l'équilibre (*spinup*), soit cinq fois ici. Une dernière simulation de 15 ans est réalisée à partir de l'équilibre atteint au terme du *spinup* : ce sont ces dernières sorties qui seront analysées.

► L'expérience est donc constituée par un jeu de dix simulations indépendantes, ne différant que par le ratio fraction arborée/fraction herbacée imposé en chaque maille. Les résultats sont obtenus pour un système mis à l'équilibre. La notion de « densité arborée » introduite dans la présentation de la méthodologie est ici interprétée comme une « fraction arborée », proportion de sol occupée par le PFT3. Les données climatiques servant à forcer le modèle sont les données du CRU sur la période 1991-2005.

→ L'expérience réalisée à partir des données issues d'observations du CRU constitue l'**expérience de référence**, dont les résultats sont discutés dans la suite. Elle permettra d'estimer la répartition géographique des régimes pour la période actuelle et d'en caractériser le potentiel.

3.3 Analyse des sorties de l'expérience de référence selon la typologie

3.3.1 Productivité de l'ensemble du domaine tropical semi-aride

En sortie de simulation avec le modèle ORCHIDEE, les valeurs annuelles des différentes variables sont calculées en moyenne sur les quinze dernières années de simulation. Elles sont utilisées pour tracer les profils de productivité en fonction de la fraction arborée.

La figure 3.11 rappelle la carte classification de Köppen pour la période 1991-2005, similaire à celle analysée dans le chapitre 2. C'est au sein du domaine tropical semi-aride, en noir sur la carte, que l'outil d'évaluation du potentiel arboré est appliqué.

Neuf régions sont délimitées pour analyser le domaine tropical semi-aride (tableau 3.3). Dans la suite, ces régions ont été nommées à partir des régions géographiques emblématiques : par exemple la région « Sahel » inclut effectivement en grande partie le Sahel, même si la région délimitée pour l'analyse s'étend au-delà du Sahel géographique.

La productivité primaire nette (*Net Primary Production*, en anglais, ou NPP) annuelle est calculée pour le PFT arboré à l'échelle individuelle et à celle du peuplement, en moyenne sur les 15 années de simulation. La NPP à l'échelle individuelle représente le niveau de développement des arbres, utilisé comme critère de définition des régimes dans la typologie. La figure 3.12 montre la dispersion des valeurs obtenues (en moyenne sur la période actuelle 1991-2005) pour l'ensemble des points de grille identifiés comme tropicaux semi-arides (en gris sur la figure).

Malgré la forte dispersion qui apparaît, particulièrement pour les fractions arborées les plus élevées, des tendances nettes sont visibles pour les points du domaine tropical semi-aride (en gris) :

- la NPP individuelle de l'arbre est inversement corrélée à la fraction arborée ;
- la NPP totale du peuplement augmente avec la fraction arborée, et montre une saturation pour les fractions arborées élevées. Cette saturation n'est pas visible, cependant, pour les valeurs extrêmes.

Ces deux premiers points confirment bien que le niveau de développement des arbres, interprété ici comme la productivité à l'échelle de l'arbre, diminue quand la fraction arborée augmente du fait de la compétition entre individus (voir section 3.1). La dispersion est plus forte pour les fractions arborées élevées, où la proportion de points pour lesquels la NPP est nulle dépasse 25%. Ceux-ci contribuent à masquer d'éventuelles tendances qui seront révélées dans la suite par l'analyse des différents profils.

Enfin le niveau de productivité global du domaine tropical semi-aride est encadré par les niveaux de productivité des classes bioclimatiques plus et moins arides (respectivement en beige et en vert sur la figure 3.12), ce qui était intuitivement attendu : la productivité des arbres est supérieure dans des conditions moins limitantes (plus humides), et inversement.

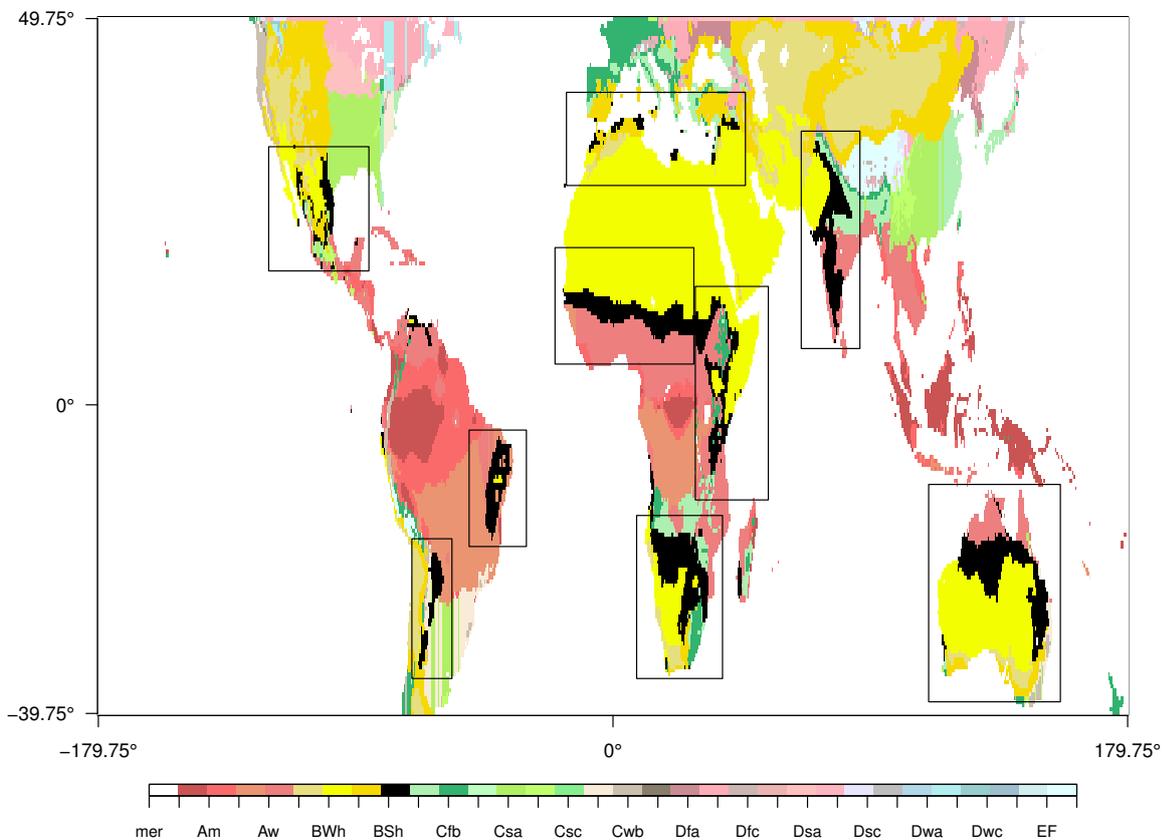


FIGURE 3.11 – *Classification de Köppen calculée à partir des données climatiques du CRU moyennées pour la période 1991-2005. Les zones tropicales semi-arides sont en noir. Les codes des classes climatiques sont donnés dans le chapitre 2. Les régions qui seront étudiées plus en détail dans la suite sont encadrées en noir.*

Nom	Longitude	Latitude	Surface TSA
NordAmérique	125.25O - 85.25O	17.25N - 49.75N	490
Sahel	20.25O - 28.75E	5.25N - 20.25N	1462
Inde	65.75E - 88.25E	5.25N - 35.25N	1244
Méditerranée	16.25O - 46.25E	28.25N - 49.75N	304
EstAfrique	28.75E - 54.25E	10.25S - N20.25	1128
Australie	110.25E - 156.25E	39.75S - 10.25S	1873
SudAfrique	8.25E - 54.25E	35.25S - 10.25S	1682
EstBrésil	56.25O - 30.25O	22.25S - 3.25S	709
EstAndes	72.25O - 56.25O	39.75S - 15.25S	394

TABLE 3.3 – *Caractérisation des régions étudiées. La surface tropicale semi-aride (TSA) est donnée en millions d'hectares.*

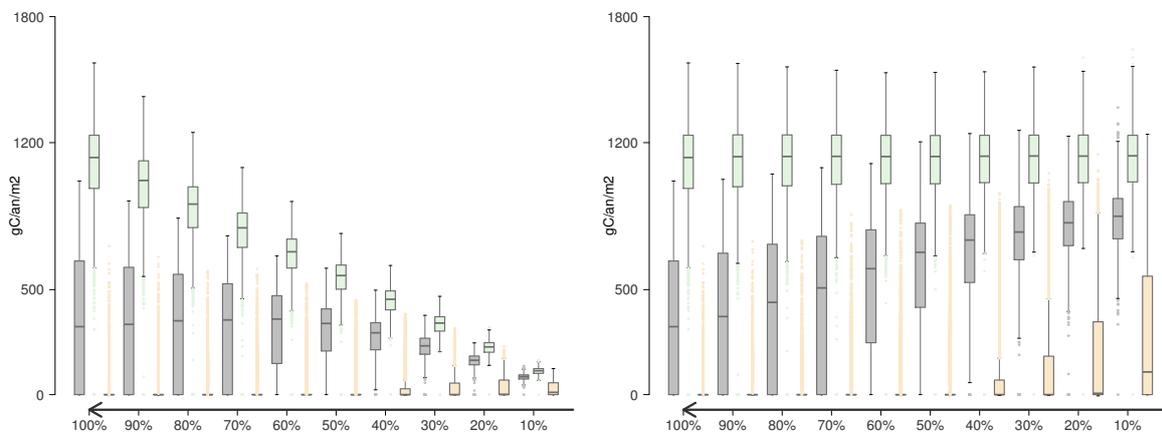


FIGURE 3.12 – *Profils de résultats de l'expérience de référence* : à gauche, productivité totale du peuplement, à droite, développement des arbres. Les axes des ordonnées représentent des productivités primaires nettes annuelles, exprimées en $gC/m^2/an$. En gris sont représentés les points du domaine tropical semi-aride. Chaque boîte montre la dispersion sur les points du domaine (quantiles 1 et 3). En vert et en beige sont représentés respectivement les points appartenant aux classes équatoriales subhumides (As et Aw dans la nomenclature de la classification de Köppen) et arides chaudes (BWh). Attention, le code couleur est différent de celui utilisé pour la représentation des cartes de Köppen.

3.3.2 Identification des régimes de productivité

A partir des sorties de l'expérience de référence, le maximum de productivité individuelle est déterminé : la productivité totale annuelle est calculée pour chaque fraction arborée, puis le maximum sur l'ensemble des fractions arborées est identifié pour chaque point de grille. A partir de ces valeurs, la valeur maximale sur l'ensemble des points du domaine tropical semi-aride est identifiée pour calculer ensuite les seuils de la typologie. De manière à écarter les valeurs extrêmes, le « maximum » retenu est la valeur telle que 95% de la distribution des maxima par site lui sont inférieurs (figure 3.13). Comme expliqué dans la section 3.1, ce maximum correspond, toutes fractions arborées confondues, au développement le plus important pouvant être atteint ; il sert de référence pour le calcul des seuils utilisés dans la typologie. La valeur du maximum est ainsi de 1083 gC/m²/an pour la productivité de l'arbre pris individuellement.

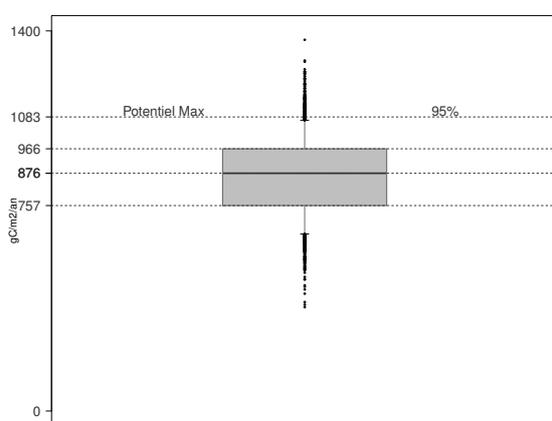


FIGURE 3.13 – *Dispersion des maxima de NPP individuelle de l'arbre sur l'ensemble du domaine tropical semi-aride pour l'expérience de référence. La boîte centrale représente les pourcentiles 25 et 75%, la valeur centrale représente le pourcentile 50%. Le potentiel est identifié comme la valeur du pourcentile 95%.*

Les valeurs des seuils sont ensuite déterminées comme expliqué dans la méthodologie, et données dans le tableau 3.4.

Seuil0	Seuil1	Seuil2	Seuil3
0,1 gC/m ² /an	325 gC/m ² /an	542 gC/m ² /an	866 gC/m ² /an

TABLE 3.4 – *Valeurs des seuils utilisés pour délimiter les régimes de productivité dans l'expérience de référence*

→ A partir des seuils de productivité ainsi déterminés la typologie est appliquée et le domaine tropical semi-aride global est partitionné entre les 5 régimes de productivité. Les résultats en sont présentés et discutés ci-après.

Répartition globale des régimes

La majeure partie (75%) du domaine tropical semi-aride est partagé entre deux régimes (figure 3.14) :

- Le régime 1 occupe près de la moitié (47%) du domaine global classé tropical semi-aride. Il est constitué de zones où la productivité d'un couvert arboré n'est rendue possible que par une occupation limitée du sol par ce couvert ;

- le régime 4 occupe 28% du domaine. Il est composé de zones où le maintien d'un couvert arboré est possible quelle que soit sa fraction d'occupation du sol, mais où la productivité des arbres, quoique toujours non négligeable (supérieure au Seuil 1), est fortement influencée par cette fraction.

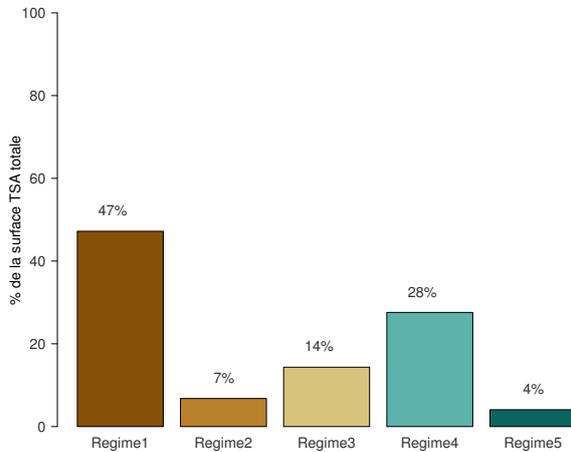


FIGURE 3.14 – *Proportion de surface occupée par chaque régime relativement à la surface tropicale semi-aride (TSA) globale pour l'expérience de référence.*

La carte (figure 3.15) montre que les régimes sont inégalement répartis entre les régions tropicales semi-arides. Les points assignés au régime 1 apparaissent majoritairement dans les régions brésilienne, sud-africaine et australienne, tandis que ceux du régime 4 sont identifiés principalement dans les régions sahélienne et indienne.

En utilisant le découpage régional illustré sur la figure 3.11, les proportions relatives des 5 régimes sont indiquées pour 9 régions tropicales semi-arides dans la figure 3.16.

→ Les caractéristiques des différents régimes calculées à partir des résultats de l'expérience de référence sont rassemblées en cinq fiches de synthèse en annexe. La surface occupée par chaque régime dans chaque région et les moyennes climatiques y sont renseignées, ainsi que les valeurs de productivité annuelle et de biomasse ligneuse à l'hectare pour les fractions arborées extrêmes (10 et 100%) et intermédiaire (50%). On y trouve en outre le tracé des cycles de croissance superposés aux cycles saisonniers de précipitations, et celui du cycle de température.

Niveau de productivité au sein de chaque régime

Une fois tous les points du domaine tropical semi-aride répartis entre les cinq régimes, les profils de résultats sont tracés pour ces régimes (figure 3.17). Ces profils sont ceux à partir desquels les courbes moyennes de la figure 3.3 avaient été calculés et présentés en début de chapitre pour introduire la définition des régimes. Ici, la dispersion des valeurs obtenues sur l'ensemble des points assignés à chaque régime est représentée par les boîtes (quantiles 1 et 3).

Les régimes extrêmes sont clairement identifiés :

- le régime 1 isole les points pour lesquels la productivité de l'arbre et du peuplement deviennent nulles pour les fractions arborées élevées (sur la figure, les valeurs extrêmes non nulles pour les fractions 90 et 100% représentent moins de 25% de ce régime) ;

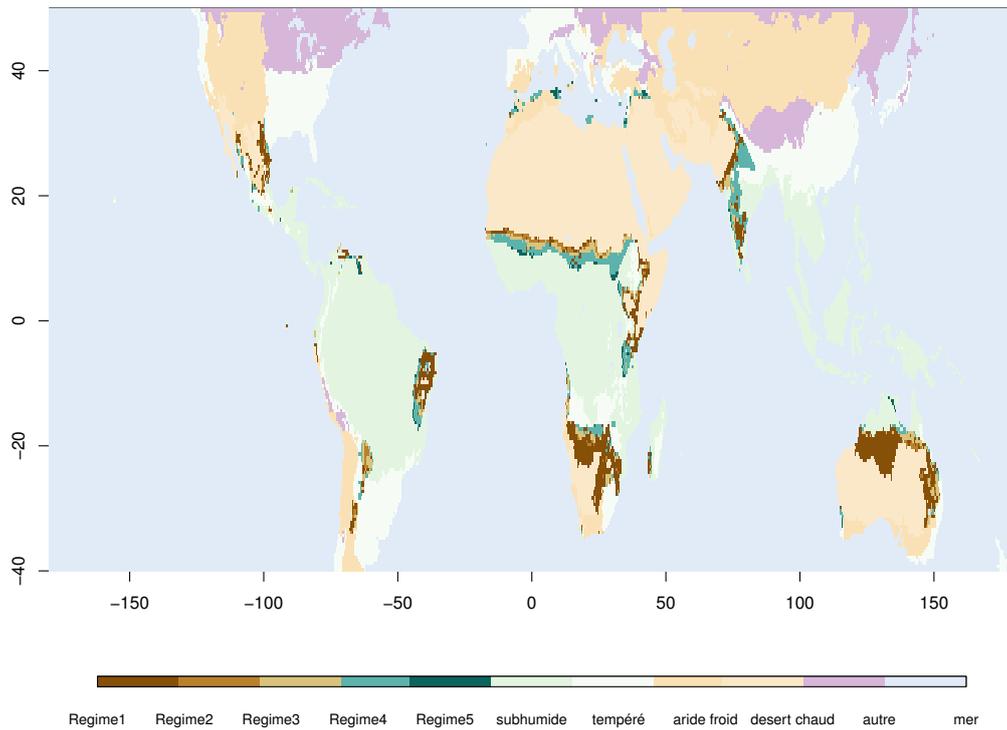


FIGURE 3.15 – Carte de répartition des régimes pour l'expérience de référence

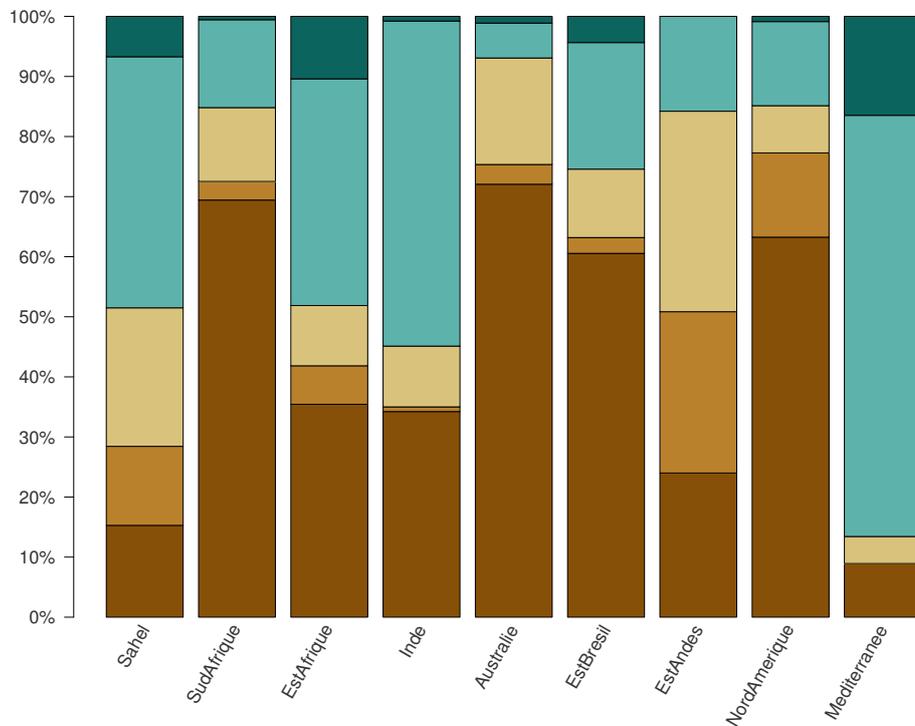


FIGURE 3.16 – Proportion de surface occupée par chaque régime relativement à la surface tropicale semi-aride régionale, pour l'expérience de référence.

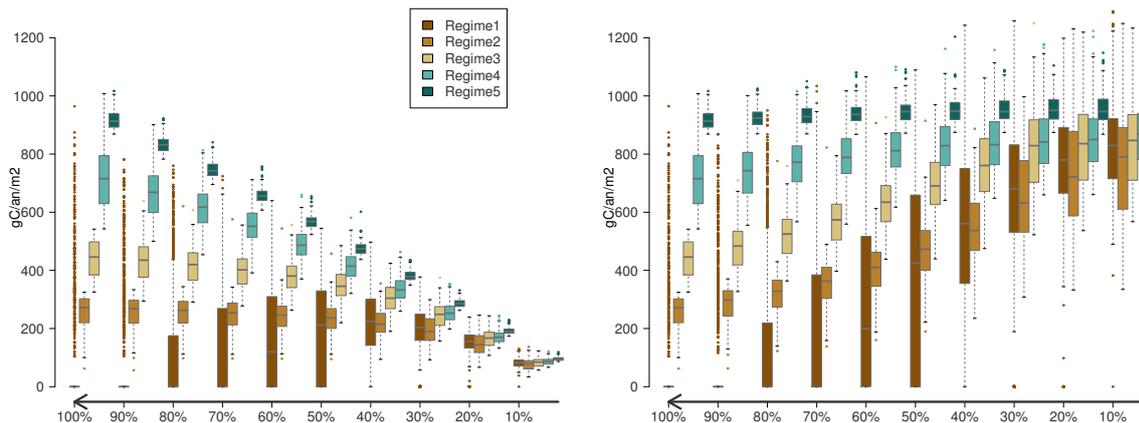


FIGURE 3.17 – *Profils de résultats de l'expérience de référence, selon les régimes : à gauche, productivité totale du peuplement, à droite, développement des arbres. Les axes des ordonnées représentent des productivités primaires nettes annuelles, exprimées en $gC/m^2/an$. Chaque boîte montre la dispersion sur les points du domaine (quantiles 1 et 3).*

- pour le régime 5, les points pour lesquels la productivité de l'arbre n'est pas, ou très peu, affectée par la fraction arborée. Ces derniers sont les points pour lesquels cette productivité atteint les maxima de l'ensemble de la zone tropicale semi-aride ;
- le régime 2 est clairement discriminé également, par des valeurs de NPP totale du peuplement faibles, peu dispersées, et quasiment indépendantes de la fraction arborée pour les fractions supérieures à 20%. Les valeurs de NPP des arbres sont, par construction, basses pour les fractions arborées élevées, et proches de celles des autres régimes pour les petites fractions arborées ;
- enfin, les régimes 3 et 4, intermédiaires, sont situés entre les régimes 2 et 5, tant pour la productivité des arbres que pour celle totale du peuplement.

3.3.3 Spécificités climatiques et phénologiques de chaque régime

Discrimination de critères climatiques

Les sommes de précipitations annuelles sont bien discriminées par les régimes (tableau 3.5). Les sommes de précipitations annuelles sont en moyenne plus élevées pour les régimes plus favorables, excepté pour le régime 1 dont la moyenne est supérieure à celle du régime 2. Le régime 1 montre néanmoins une dispersion spatiale plus importante que le régime 2. La figure 3.18a (gauche) montre que les distributions de valeur de précipitations annuelles entre les régimes se chevauchent largement, tout en montrant des pics et des formes nettement différenciés.

Si les cycles saisonniers de précipitations varient en niveau de somme de pluies entre les régimes de productivité, leur durée est cependant peu différente. Ainsi, la figure 3.18b montre que les cycles de précipitations en moyenne sur les surfaces assignées à chaque régime sont presque superposés dans le temps. Cette homogénéité moyenne masque cependant une forte dispersion spatiale des cycles de précipitations en particulier dans le régime 5 (figure A18).

	quantile 1	moyenne	quantile 3
régime 1	423 mm/an	522 mm/an	605 mm/an
régime 2	452 mm/an	490 mm/an	529 mm/an
régime 3	560 mm/an	616 mm/an	665 mm/an
régime 4	650 mm/an	711 mm/an	797 mm/an
régime 5	656 mm/an	791 mm/an	893 mm/an

TABLE 3.5 – *Somme de précipitations annuelles par régime : moyenne, premier et troisième quantiles de la distribution des points assignés à chaque régime, pour l'expérience de référence.*

	quantile 1	moyenne	quantile 3
régime 1	21.91 ° C	23.93 ° C	26.18 ° C
régime 2	22.71 ° C	25.12 ° C	28.59 ° C
régime 3	22.91 ° C	24.83 ° C	27.53 ° C
régime 4	23.15 ° C	25.26 ° C	28.05 ° C
régime 5	20.04 ° C	24.22 ° C	27.89 ° C

TABLE 3.6 – *Moyenne annuelle de température de l'air par régime : moyenne, premier et troisième quantiles de la distribution des points assignés à chaque régime, pour l'expérience de référence.*

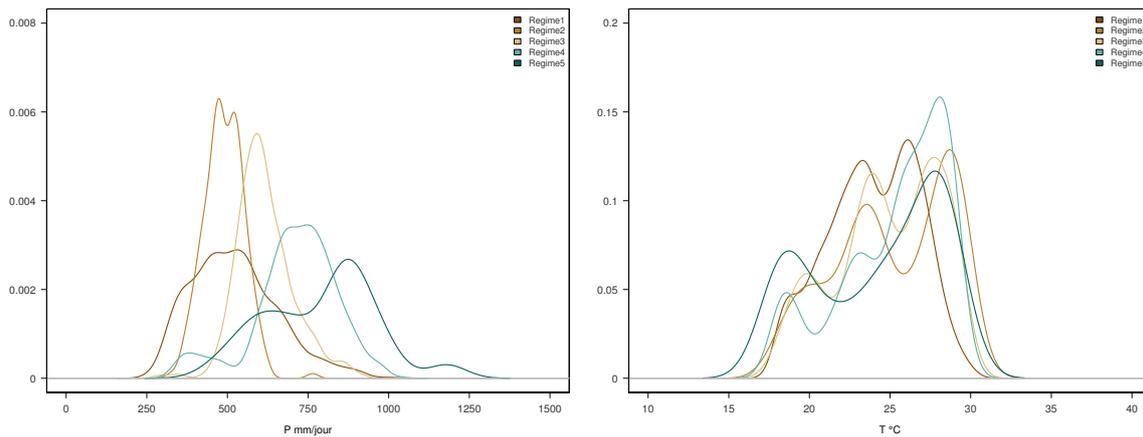
Les moyennes de températures annuelles (tableau 3.6) sont relativement identiques entre les régimes (figure 3.18a (droite)); l'écart entre les moyennes est donc peu significatif. Elles sont plus élevées au cours de la saison humide (figure 3.18b et c) pour les deux hémisphères. Les températures moyennes annuelles et l'allure des cycles saisonniers sont équivalents pour les régimes 1 à 4. Le régime 5 se distingue par une variabilité saisonnière de la température moins importante que pour les autres régimes. Cependant, la dispersion spatiale pour ce régime est très forte en-dehors de la saison des pluies dans l'hémisphère Nord (figure A18 en annexe).

Enfin, les régimes sont clairement discriminés par le **critère P/EP** - moyenne annuelle du rapport des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle (figure 3.19). Ce critère étant communément utilisé comme indice d'aridité (voir chapitres 1 et 2), cette discrimination indique que les régimes 1 à 5 sont de moins en moins arides (sauf pour les régimes 1 et 2, dont les pics sont presque confondus, même si de largeur différente).

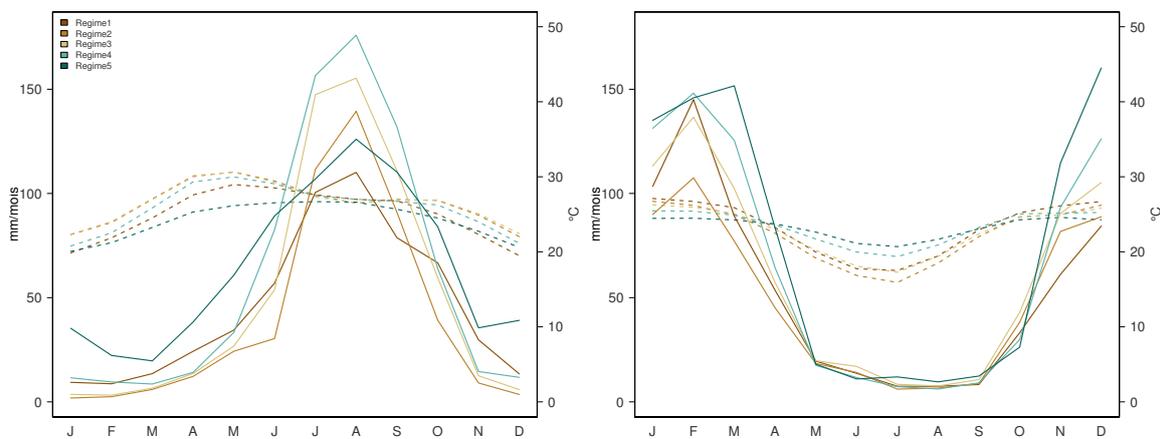
Discrimination du nombre de jours de croissance

En annexe sont résumées les conditions climatologiques moyennes rencontrées pour les régimes 1 à 5 en résultat d'expérience de référence, ainsi que les cycles saisonniers moyens de productivité primaire nette obtenus pour les différentes fractions arborées.

Pour les régimes les plus favorables (4 et 5), les cycles de croissance moyens obtenus pour les différentes fractions arborées sont superposés (figures A16 et A18 en annexe). Pour les régimes moins favorables (figures A10, A12 et A14 en annexe), en revanche, ces



(a) Densité de répartition des précipitations (gauche) et de la température de l'air (droite) annuelles, en moyenne sur 15 ans.



(b) Cycles de précipitations (trait plein) et de température (trait pointillé) de l'air moyens pour les hémisphères nord (gauche) et sud (droite).

FIGURE 3.18 – **Variabilité spatiale et saisonnière des précipitations et de la température selon les régimes**, pour l'expérience de référence. En haut : densité de répartition des valeurs annuelles sur l'ensemble des points assignés à chaque régime, pour les précipitations (à gauche) et pour les température (à droite). En bas : cycles saisonniers par régime, en moyennes mensuelles sur 15 ans. Celles-ci sont préférées aux données journalières pour faciliter la comparaison des différents régimes; les cycles saisonnier en valeurs journalières sont représentés dans les figures en annexe (fiches signalétiques des régimes). L'hémisphère Nord est représenté à gauche, l'hémisphère Sud à droite.

cycles varient d'une part en amplitude de valeur de productivité - des valeurs plus élevées étant atteintes pour les fractions arborées inférieures - et en durée de cycle de croissance, plus longs pour les plus petites fractions arborées. La figure 3.20 montre cette divergence des durées de cycles de croissance entre les fractions arborées pour les régimes moins favorables. En moyenne sur l'ensemble des points assignés aux régimes 4 et 5, le nombre de jours de croissance est compris entre 150 et 200 pour toutes les fractions arborées, même si, pour le régime 4, une proportion significative de la surface (plus de 25%) voit cette durée devenir inférieure à 150 jours, correspondant à la baisse de productivité totale annuelle pour les plus hautes fractions arborées. Pour les régimes 1 à 3, le nombre de jours de croissance se situe dans le même intervalle pour les plus petites fractions arborées,

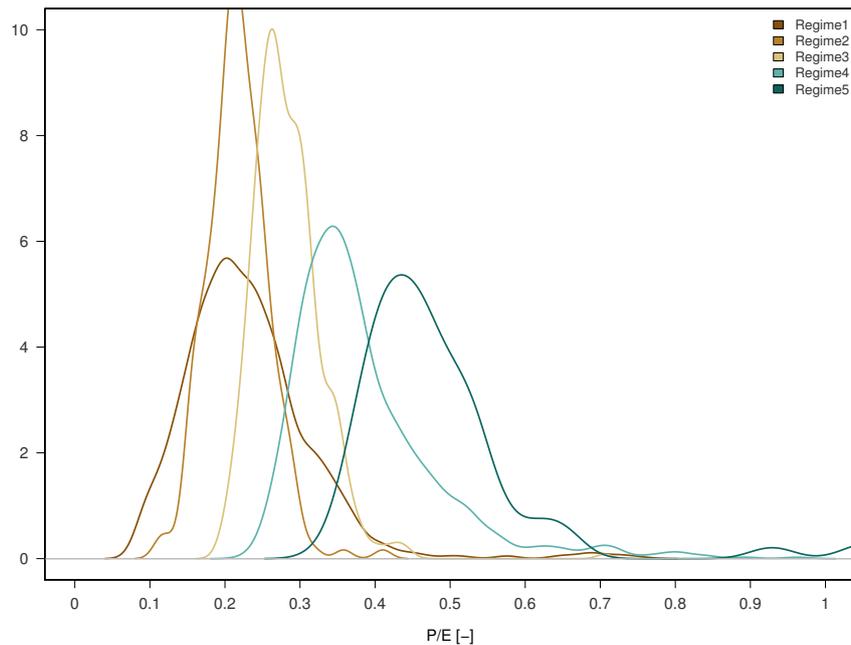


FIGURE 3.19 – *Densité de répartition du rapport P/EP par régime de productivité : moyenne sur la distribution des points assignés à chaque régime pour l'expérience de référence.*

jusqu'à 30%. Plus de 25% des surfaces des régimes 1 et 2, puis 3, voient leur nombre de jours de croissance devenir inférieur à 150 à partir des fractions 40 et 60%, respectivement.

► Les régimes sont bien discriminés par l'indice d'aridité, qui couvre tout l'intervalle des seuils arides (0.05, selon la définition de l'UNCCD) à subhumide (0.65) ; les régimes 1 et 5 étant respectivement le plus aride et le moins aride. Les sommes de pluies annuelles suivent l'ordre des régimes (le régime 1 reçoit le moins de pluies), et les cycles saisonniers de précipitations et de température sont coordonnés entre les différents régimes. Le régime 5, cependant, a une saison humide plus longue en moyenne que pour les autres régimes. Le nombre de jours de croissance est équivalent dans tous les régimes pour les petites fractions arborées, entre 150 et 200 jours, et diminue avec les fractions arborées croissantes pour les régimes 1 à 4, jusqu'à quitter cet intervalle autour des fractions 40 à 60% pour les régimes 1 à 3.

Effet de la limitation en eau sur les différences de niveaux de productivité et sur l'influence de la fraction arborée

La phénologie du PFT3 choisi pour représenter les arbres des régions tropicales semi-arides dans le modèle est déterminée par la disponibilité en eau dans le sol. Dans les régimes moins favorables (régimes 1 à 3), la productivité par arbre est de plus en plus limitée lorsque la fraction arborée augmente, de sorte que le niveau de productivité du peuplement dépend des ressources climatiques. A l'échelle du domaine tropical semi-aride, les régimes de productivité associés à un niveau d'aridité inférieur (régimes 4 et 5) avoisinent les régions plus humides, et inversement. Cette disposition est visible sur la figure 3.15.

Au sein des surfaces assignées à chaque régime de productivité, la durée du cycle de croissance est d'autant plus influencée par la fraction arborée que le régime de productivité est défavorable (figure 3.20). Dans cette section, l'analyse à plus haute résolution de

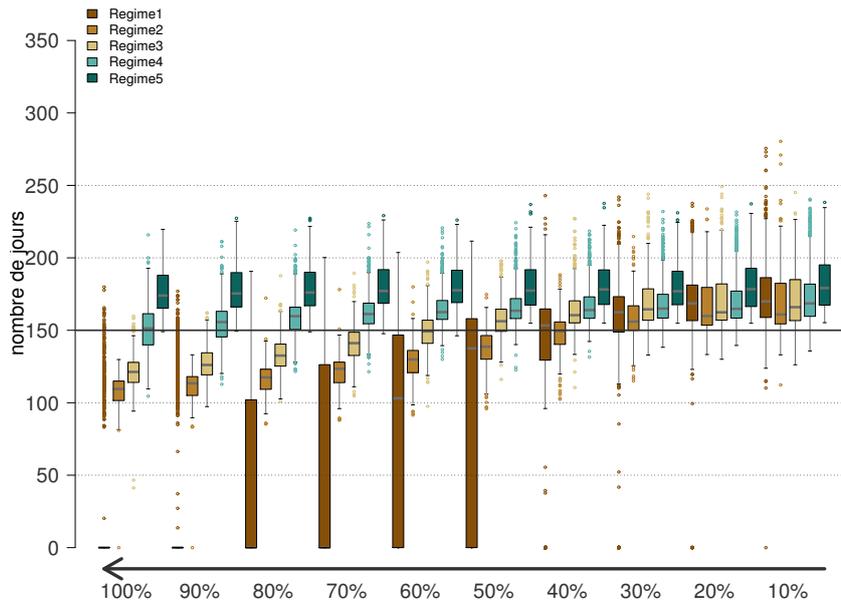


FIGURE 3.20 – *Durée des cycles de croissance par régime, pour l'expérience de référence : moyenne sur 15 ans, sur la distribution des points assignés à chaque régime, du nombre de jours de l'année où la productivité primaire nette des arbres est supérieure à zéro.*

l'évolution des variables climatiques (forçage du modèle) et des variables de sortie de simulation pour la végétation et l'eau du sol permet d'étudier le lien entre le niveau d'eau disponible dans le sol et la croissance des arbres. Les figures 3.21a et b représentent la succession de cinq cycles saisonniers successifs pour deux points de grille sélectionnés sur un gradient latitudinal traversant la région Sahel. Ils servent de support à une analyse qualitative des mécanismes en jeu. La fraction arborée est égale à 100% de manière à ne prendre en compte que de la phénologie des arbres (la comparaison avec une fraction arborée plus faible est réalisée dans la suite).

Sur le premier site (figure 3.21a), assigné au régime 2, la survenue d'une année plus sèche (année 2, précipitations en bleu) induit une diminution de la productivité (NPP en noir) et un raccourcissement du cycle de croissance par rapport à l'année précédente. Cette baisse de productivité est suffisante pour limiter la reconstitution de la réserve de carbohydrates de la plante (en orangé). Au cours de la succession de quelques années peu pluvieuses, la productivité de l'arbre demeure faible et la réserve de carbohydrates, mobilisée en chaque début de cycle, continue à s'amenuiser. Ce mécanisme est poursuivi jusqu'à l'occurrence d'une saison plus humide (année 4) qui a pour effet de prolonger le cycle de croissance, ce qui favorise enfin la reconstitution de la réserve de carbohydrates. Les niveaux de productivité maximale sont voisins sur les deux sites. Sur celui assigné au régime 5 (figure 3.21b), les années moins humides sont moins sèches que pour le pixel assigné au régime 2. Sur ce site, la réserve de carbohydrates est pleinement reconstituée chaque année et la productivité atteint le même niveau chaque année. La durée moyenne du cycle de croissance sur les deux pixels analysés est de 4.9 mois pour le pixel assigné au régime 2 (calculé approximativement à partir des données en moyennes mensuelles), et de 6.6 mois pour le pixel assigné au régime 5, soit respectivement 147 et 198 jours, ce qui se situe dans partie haute de l'intervalle de valeurs calculé sur l'ensemble du domaine

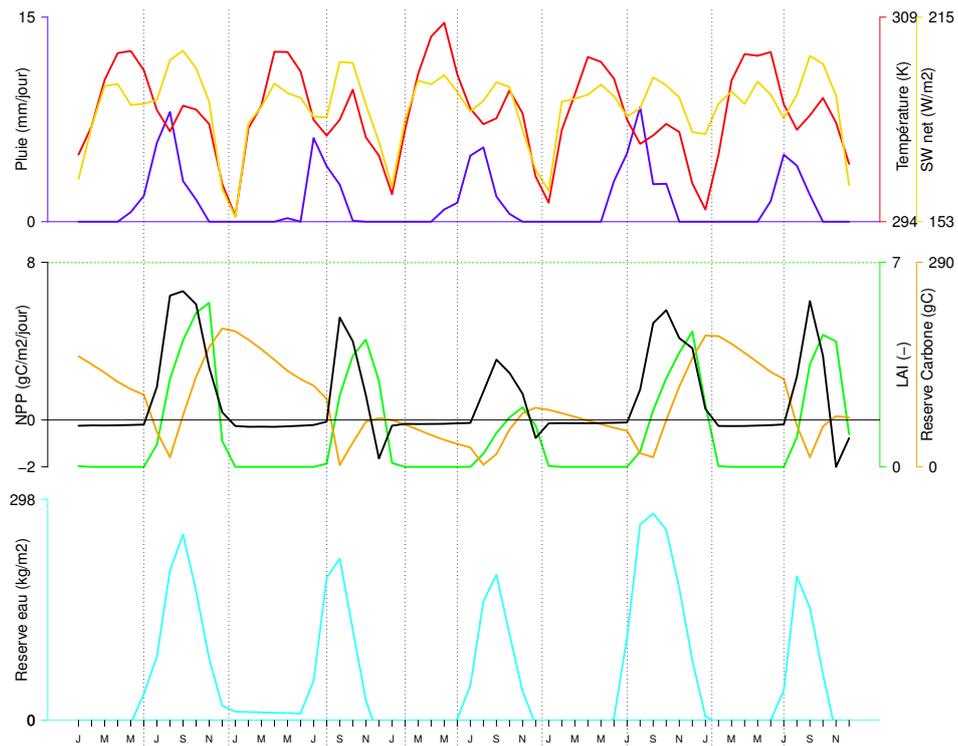
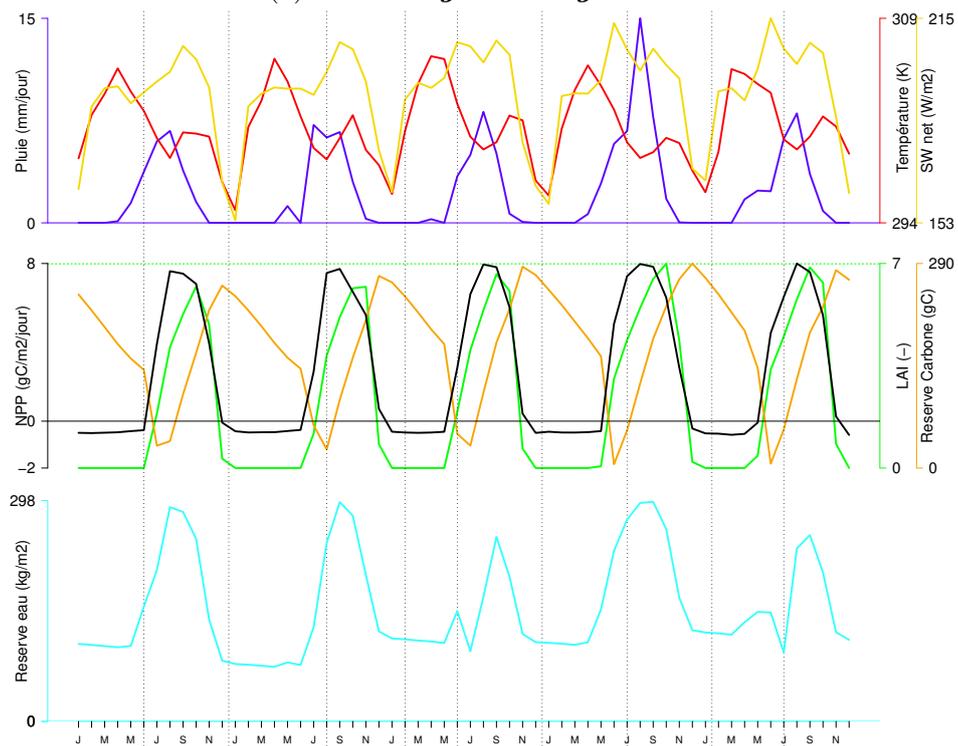
(a) *Site assigné au régime 2*(b) *Site assigné au régime 5*

FIGURE 3.21 – *Cycles saisonniers pour deux sites de la région Sahel, de même longitude. La fraction arborée est égale à 100%. Les traits verticaux noirs, en pointillés, marquent le début et la fin de chaque cycle de croissance. Bleu foncé : pluie. Rouge : température. Jaune : rayonnement net. Noir : NPP. Vert : LAI. Orangé : réserve de carbohydrates. Turquoise : quantité d'eau dans le sol.*

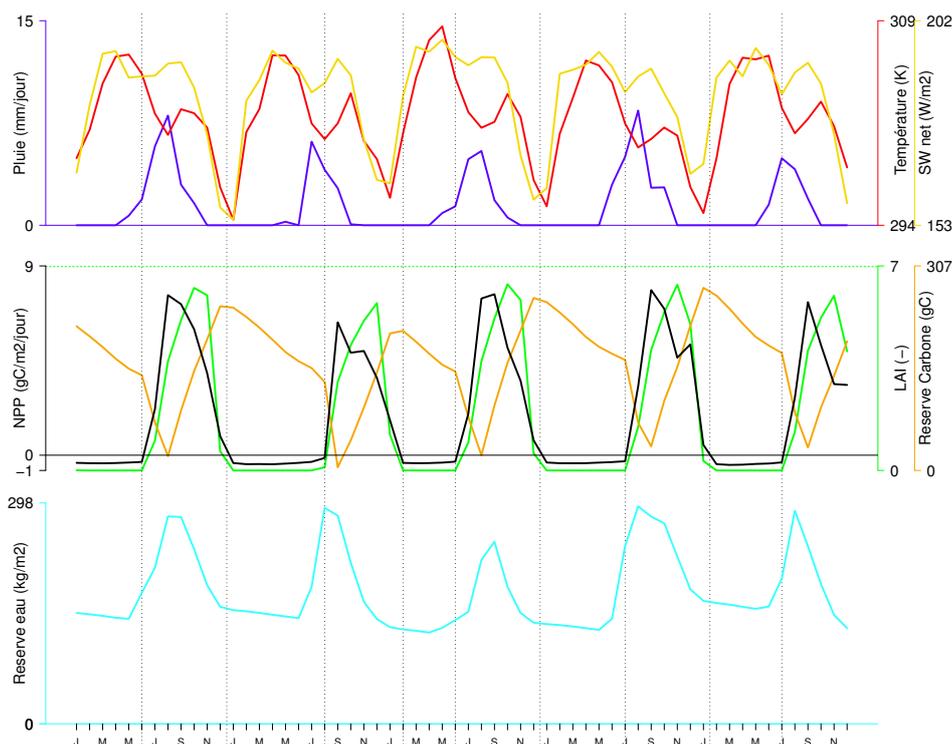


FIGURE 3.22 – *Cycles saisonniers pour un site de la région Sahel, assigné au régime 2. Il s'agit du même site que dans la figure 3.21a. La fraction arborée diffère, égale ici à 10%. Les couleurs sont attribuées comme pour la figure 3.21*

(figure 3.20). La variabilité est supérieure pour le point assigné au régime 2 (entre 3.5 et 7 mois) par rapport à celui assigné au régime 5 (entre 6 et 7 mois).

➔ La saison de croissance plus longue est associée à des niveaux supérieurs de productivité moyenne.

L'effet de la fraction arborée est étudié pour le site assigné au régime 2. Les cycles de végétation et d'eau dans le sol sont comparés pour les fractions arborées 100% (figure 3.21a) et 10% (figure 3.22). La différence de cycle de croissance entre les deux fractions arborées est faible sur la première année, assez humide. Le contenu en eau du sol, cependant, est largement supérieur pour 10% d'arbres. Au cours de la seconde année, plus sèche, la productivité primaire est réduite dans le cas de la fraction 100% par rapport à 10%, à la fois en durée et en amplitude maximale. La prolongation du cycle de croissance dans le cas de la fraction 10% permet une reconstitution plus importante de la réserve de carbohydrates. L'année suivante, celle-ci est utilisée pour amorcer un cycle de croissance plus vigoureux qu'avec la fraction 100%, malgré des conditions tout aussi peu humides. Sur l'ensemble de la série temporelle la productivité de l'arbre subit ainsi moins de diminutions induites par des conditions annuelles plus sèches, ce qui maintient un niveau de productivité moyen supérieur et réduit le risque d'épuiser la réserve et d'interrompre ainsi définitivement la croissance.

Cet effet de la fraction arborée est analogue à l'effet de compétition entre plantes dans la réalité. Dans le cas de cette modélisation les deux types de plantes interagissent peu, en l'absence de rétroaction avec l'atmosphère. Par conséquent, la compétition observée est intra-PFT, c'est-à-dire entre les arbres.

► Les différences de niveaux de productivité entre des points assignés à différents régimes peuvent être expliquées par la combinaison de la variabilité interannuelle des précipitations et par la fraction arborée : la succession d'années plus sèches combinée à une fraction arborée élevée exerce une forte pression sur la ressource en eau, limite la durée du cycle de croissance et compromet le renouvellement de la réserve de biomasse de la plante, laquelle permet le débourrement en début de saison. Le résultat en est un niveau de productivité limité et le risque de voir cesser définitivement la reprise de croissance. Dans le même contexte climatique, une fraction arborée plus petite allège la pression sur la ressource en eau du sol : celle-ci ne s'épuise pas, ce qui permet le maintien d'un cycle suffisamment long pour assurer le renouvellement de la réserve de carbohydrates.

3.3.4 Confrontation des résultats à des valeurs de productivité et de biomasse de référence

Pour valider les ordres de grandeur des résultats des simulations réalisées, deux types de données sont utilisées ici : des données issues d'observations de productivité primaire brute (*Gross Primary Production* en anglais, ou GPP) et des moyennes de productivité par type de végétation à l'échelle globale. Dans les deux cas, la comparaison avec les sorties des simulations sont limitées et ne peuvent avoir qu'une valeur indicative.

Les données de distributions globales de GPP reconstruites à partir d'observations sont constituées de sommes de GPP sur l'ensemble de la végétation réellement présente au sol. La comparaison avec les résultats de l'expérience ne peut donc être faite que sur les sommes de productivité des arbres et des herbacées sans connaître la répartition entre chaque type de végétation dans les observations. Qui plus est, ces régions incluent une proportion de sol nu qui n'a pas été prise en compte dans cette expérience, focalisée sur les arbres.

Quant aux valeurs de référence moyennes pour des types de formation végétale issues des inventaires forestiers nationaux, elles permettent seulement de situer les résultats par rapport à un ordre de grandeur.

Les deux comparaisons sont réalisées successivement ci-dessous.

Valeurs de référence issues des inventaires forestiers nationaux

Le document du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, publié en 2006 (GIEC, 2006) donne des valeurs de référence globales de productivité des différents types de végétation. Nous les utilisons ici comme ordres de grandeur pour contrôler la vraisemblance des résultats obtenus.

Le tableau 3.7 reproduit les valeurs de référence données dans le document du GIEC. Ces valeurs de biomasse peuvent être converties en masse de carbone en utilisant le facteur de conversion moyen universel : 0.47 tonnes de carbone par tonne de matière sèche (m.s.). Les valeurs résultant de la conversion sont indiquées entre parenthèses dans le tableau.

La zone écologique correspondant au domaine tropical semi-aride étudié est constituée, dans la nomenclature du document du GIEC, des « terres arbustives tropicales ».

Domaine climatique	Zone écologique	Biomasse aérienne des forêts naturelles (tonnes m.s./ha)	Biomasse aérienne des plantations de forêts (tonnes m.s./ha)	Croissance nette de la biomasse aérienne des forêts naturelles (tonnes m.s./ha/an)	Croissance nette de la biomasse aérienne des plantations de forêts (tonnes m.s./ha/an)
Tropical	Forêt dense tropicale	300 (141)	150 (70.5)	7.0 (3.29)	15.0 (7.05)
	Forêt décidue humide tropicale	180 (84.6)	120 (56.4)	5.0 (2.35)	10.0 (4.7)
	Forêt sèche tropicale	130 (61.1)	60 (28.2)	2.4 (1.128)	8.0 (3.76)
	Terres arbustives tropicales	70 (32.9)	30 (14.1)	1.0 (0.47)	5.0 (2.35)

TABLE 3.7 – *Extrait des lignes directrices de 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre : valeur de référence de biomasse et de croissance.* La zone écologique correspondant au domaine tropical semi-aride est celle des « terres arbustives tropicales », plutôt pour les forêts plantées. Les autres valeurs sont données à titre de comparaison, comme celles des valeurs-limites aux frontières de cette zone écologique. Les unités sont données en tonnes de matière sèche (m.s.) par hectare : en valeur totale sur un peuplement (biomasse) ou en moyenne annuelle (croissance). Les valeurs entre parenthèses sont le résultat de la conversion en tonnes de carbone par hectare (tC/ha) ou par hectare et par an (tC/ha/an).

Le document donne plusieurs types de valeurs de référence, que nous utilisons ici comme ordre de grandeur pour valider la crédibilité des résultats de l'expérience :

- croissance nette de la biomasse aérienne ;
- biomasse aérienne ;
- coefficient de conversion de la masse de matière sèche en masse de carbone ;
- rapport de la masse racinaire à la masse aérienne.

La croissance nette de la biomasse aérienne est comparée ici à la productivité primaire nette utilisée pour analyser les résultats de simulation. Comme cette dernière, la NPP, inclut toute la biomasse de la plante, aérienne et racinaire, la valeur de croissance nette de la biomasse aérienne est d'abord convertie en croissance nette de la biomasse *totale* en utilisant le rapport moyen de la masse racinaire à la masse aérienne : il est de 0.4 pour les « terres arbustives tropicales », et varie entre 0.28 et 0.56 pour les « forêts sèches tropicales » (selon si la biomasse aérienne ou souterraine est supérieure ou inférieure à 20 t/ha). Pour calculer un ordre de grandeur de référence, la valeur 0.4 est utilisée ici pour ces deux zones écologiques. Pour les « forêts décidues humides tropicales », elle est de 0.2 environ. Les valeurs de croissance nette de biomasse aérienne et souterraine ainsi calculées à partir de ces coefficients et du tableau 3.7 sont, pour les zones écologiques « forêts décidues humides tropicales », « forêts sèches tropicales » et « terres arbustives tropicales », respectivement 564, 526 et 329 gC/m²/an. Ces valeurs sont reportées sur le graphique de NPP totale du peuplement en fonction des fractions arborées et selon les cinq régimes (figure 3.17), sous forme de lignes horizontales gris foncé, bleue (trait plein) et bleue (trait pointillé) (figure 3.23).

Les approximations consenties pour cette comparaison sont considérables et ne peuvent donner que des indications de vraisemblance et des pistes d'interprétation pour les résultats de l'expérience. Les valeurs obtenues pour les régimes 1 et 2 sont ainsi positionnées en majeure partie (plus de 75% des points) en-dessous de la valeur de référence. Les points en sont les plus proches pour les fractions arborées les plus élevées, dans le cas du régime 2, et pour la fraction arborée 40% pour le régime 1. La productivité totale du peuplement se situe, pour le régime 3, au niveau de la valeur de référence pour les fractions arborées 40 et 50%. Au delà, elle est comprise entre cette valeur de référence et celle calculée pour les « forêts sèches tropicales ». Les régimes 4 et 5, enfin, atteignent la première valeur de référence pour la fraction arborée 40% et dépassent celles des forêts sèches et humides au niveau des fractions 60 et 70%.

Les trois régimes les plus arides (figure 3.19), qui occupent ensemble 68% du domaine tropical semi-aride, atteignent donc des valeurs de productivité totale qui se répartissent, à leur maximum, autour de la valeur de référence pour la zone écologique correspondante. En outre, si l'on suppose que dans ces milieux, la fraction arborée au sol est basse, inférieure à 50%, les valeurs correspondantes de productivité totale sont proches de la valeur de référence pour tous les régimes. Ces résultats semblent donc vraisemblables.

Les régimes 4 et 5, plus à droite du spectre d'aridité (figure 3.19), montrent des niveaux supérieurs de productivité, au point d'atteindre, pour le régime 5, le double de la valeur de référence des forêts humides décidues pour la plus haute fraction arborée. Ce résultat est plus difficile à expliquer, même en tenant compte de la dispersion des résultats et de l'inconnue portant sur celle de la valeur de référence. Les points du régime 5 sont peu nombreux, puisqu'ils ne représentent que 4% du domaine, répartis entre les différentes

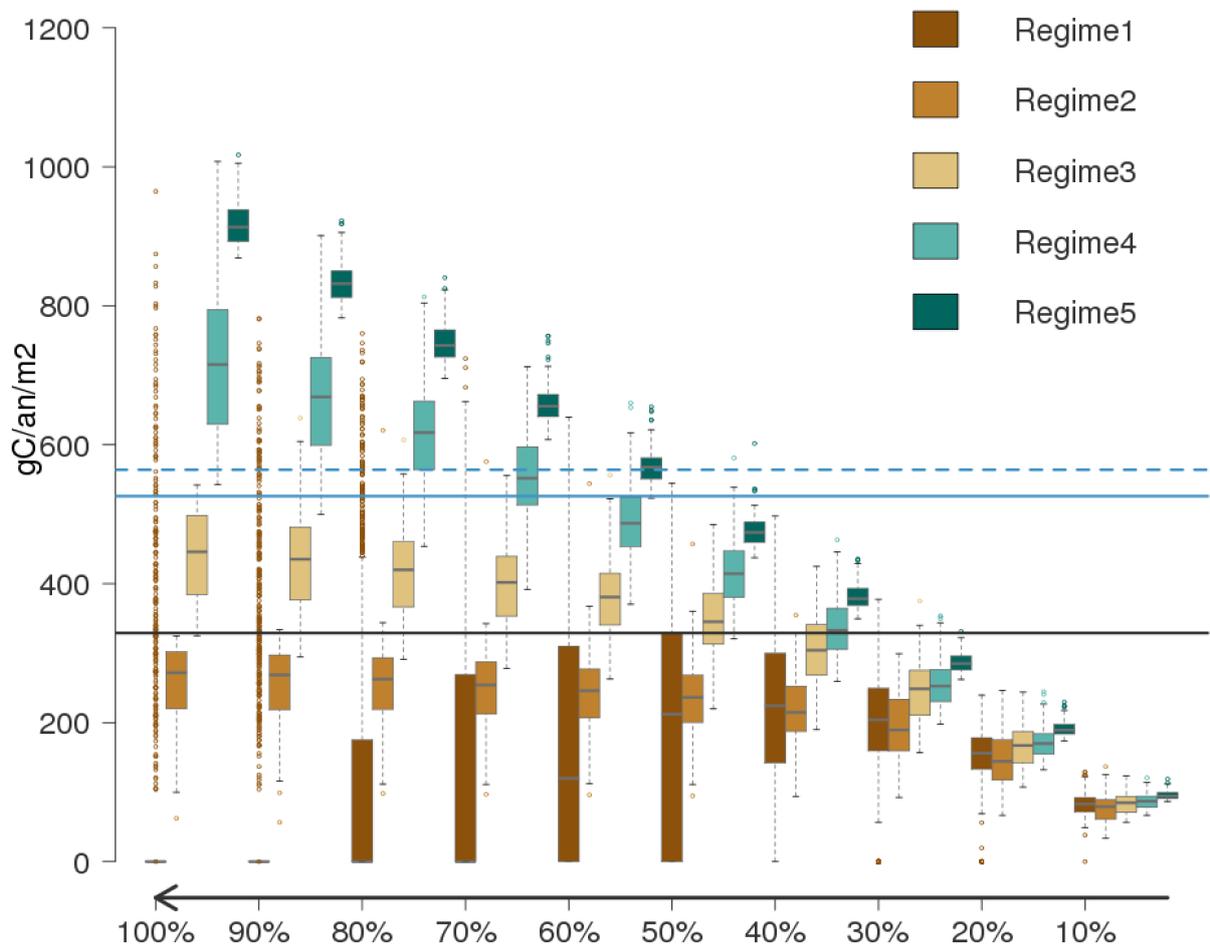


FIGURE 3.23 – *Positionnement des résultats par rapport à des valeurs de référence de croissance annuelle.* Le graphique représente les distributions de productivité primaire nette du peuplement arboré selon la fraction arborée imposée (abscisses) et le régime (couleurs). Il est identique à celui de la figure 3.17. Les lignes horizontales représentent les valeurs de référence de croissance nette de la biomasse, en gC/m²/an, pour les forêts plantées, telles qu'indiquées dans le tableau 3.7. Elles correspondent respectivement aux « terres arbustives tropicales » (gris foncé), « forêts sèches tropicales » (bleu, trait plein) et « forêts décidues humides tropicales » (bleu, tirets).

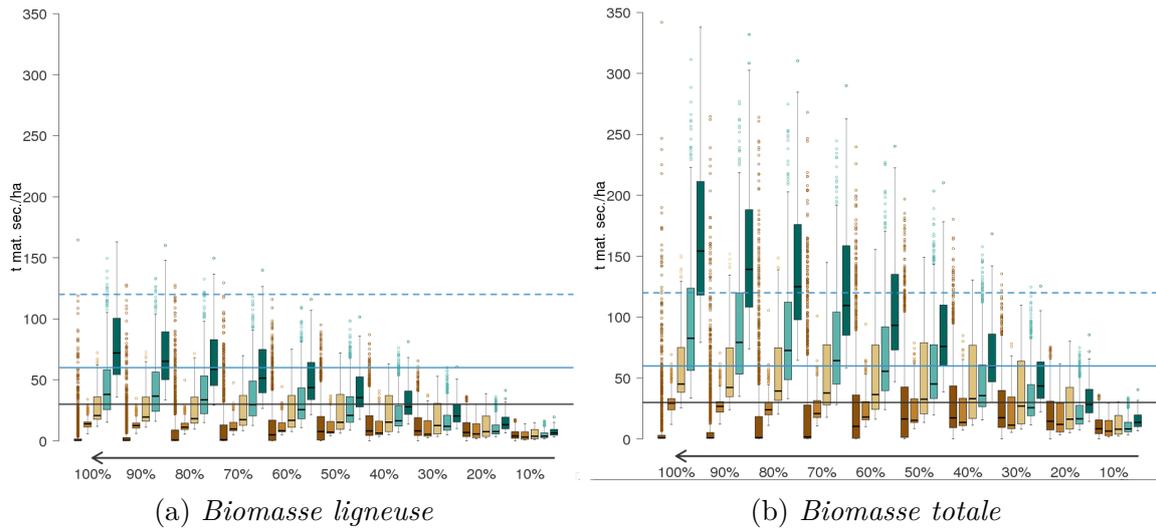


FIGURE 3.24 – *Comparaison de la biomasse aérienne obtenue avec les valeurs de référence.* Le graphique représente les distributions de la moyenne annuelle de la biomasse aérienne (ligneuse seulement, ou additionnée de la masse de sève, feuilles et fruits) du peuplement arboré selon la fraction arborée imposée (abscisses) et le régime (couleurs). Les lignes horizontales représentent les valeurs de référence de biomasse aérienne, en t mat.sec./ha, pour les forêts plantées, telles qu'indiquées dans le tableau 3.7. Elles correspondent respectivement aux « terres arbustives tropicales » (gris foncé), « forêts sèches tropicales » (bleu, trait plein) et « forêts décidues humides tropicales » (bleu, tirets).

régions, et ils sont très proches de la limite humide du domaine. Ceci justifie un écart à la valeur de référence, mais laisse planer l'incertitude sur la vraisemblance des extrêmes atteints pour les plus hautes fractions arborées.

Les valeurs de biomasse calculées peuvent être comparées de la même façon aux valeurs de référence de biomasse aérienne. On somme pour cela les moyennes annuelles de bois dur et tendre, de sève, de feuilles et de fruits, exprimées en masse de carbone par mètre carré en sortie d'expérience et converties en tonne de matière sèche par hectare comme précédemment. Les valeurs de biomasse aérienne ainsi obtenues montrent une dispersion importante au sein des régimes (figure 3.24). En moyenne, elles se situent à proximité de la valeur de référence des terres arbustives tropicales (30 t m.s./ha) pour les régimes 1 et 2, si l'on considère la biomasse aérienne totale (figure 3.24b), entre les valeurs de référence des terres arbustives tropicales et de forêts sèches (60 t m.s./ha) pour le régime 3, et dépassent cette dernière valeur pour les plus hautes fractions arborées pour le régime 4. Les valeurs obtenues pour le régime 5 sont très élevées dans les hautes fractions arborées (au-delà de 200 t m.s./h) et dépassent la valeur de référence des forêts décidues humides. Une grande partie de cette dispersion est induite par la masse non ligneuse, comme le montre la comparaison des figures 3.24a et b.

► Ces comparaisons suggèrent donc que les résultats obtenus en sortie de simulations sont cohérents avec les valeurs de référence de croissance annuelle et de biomasse aérienne des terres arbustives tropicales pour les trois régimes représentant plus des deux-tiers du domaine tropical semi-aride. Les régimes 4 et 5, qui représentent les régions les moins arides de ce domaine, ont des résultats de croissance annuelle plus proches de ceux des forêts sèches, pour les fractions arborées moyennes, et atteignent des valeurs très élevées, peu réalistes, pour les grandes fractions arborées. Cette sur-estimation est en partie attribuée à la biomasse non ligneuse.

Produit GPP issu d'observations

Le produit de GPP de Jung *et al.* (2011) a été dérivé à partir de l'interpolation des observations issues du réseau mondial FLUXNET (Jung *et al.*, 2009; Lasslop *et al.*, 2010).

L'estimation de GPP de la surface continentale n'inclut pas la composition de la végétation pour chaque point de grille. La comparaison des résultats de l'expérience à ces estimations doit donc porter sur la GPP totale (PFT3+PFT11) en sortie d'expérience, et n'a encore qu'une valeur indicative. La figure 3.25 montre les profils de GPP totale pour chaque régime en sortie d'expérience (à gauche) en regard des valeurs calculées à partir des données de Jung et al. 2011 (à droite) et classées selon les régimes obtenus en sortie d'expérience. La dispersion représentée est donc la dispersion spatiale des points dans chaque régime.

Les différences de GPP totale par régime obtenues avec l'expérience de référence sont retrouvées avec les estimations à partir d'observations. **Les valeurs médianes des observations se trouvent dans l'intervalle des quantiles 1 et 3 des résultats de l'expérience pour les régimes 1 à 3. Les estimations médianes pour les régimes 4 et 5 sont inférieures aux résultats de l'expérience, mais sont néanmoins incluses dans l'intervalle de variation.**

► Cette comparaison permet de vérifier que les ordres de grandeur obtenus en sortie de simulation sont réalistes. Les valeurs obtenues en sortie de l'expérience de référence se situent dans l'intervalle des quantiles 1 et 3 (donc proches de la valeur médiane) du produit d'observation pour les régimes 1 à 3, les plus arides, tandis qu'elles se situent dans la queue de distribution (au-delà du quantile 3) pour les régimes 4 et 5. Cette disposition va dans le sens de la simulation du potentiel de maintien d'une formation végétale différentes des terres arbustives observées dans ces régions pour les zones classées comme régime 4 ou 5.

→ La confrontation des résultats de l'expérience à des données est difficile à la fois du fait du manque de données de référence sur la productivité des arbres dans les régions tropicales semi-arides, et parce que le protocole expérimental simule ici le potentiel climatique de maintien d'un couvert total du sol (sans sol nu), qui ne correspond pas exactement aux couverts réels. A partir de valeurs de référence approximatives, à l'échelle globale, les résultats semblent néanmoins cohérents avec les valeurs de la zone écologique correspondante, au moins pour les deux-tiers les plus arides du domaine étudié. Cette comparaison montre aussi que les fractions arborées les plus réalistes par rapport à ces références se situent autour de 40-50% d'arbres. Au-delà de ces fractions, cependant, la productivité continue d'augmenter. Le même constat est fait en utilisant un produit de GPP issu d'observations spatialisées. Le potentiel climatique de productivité arborée se

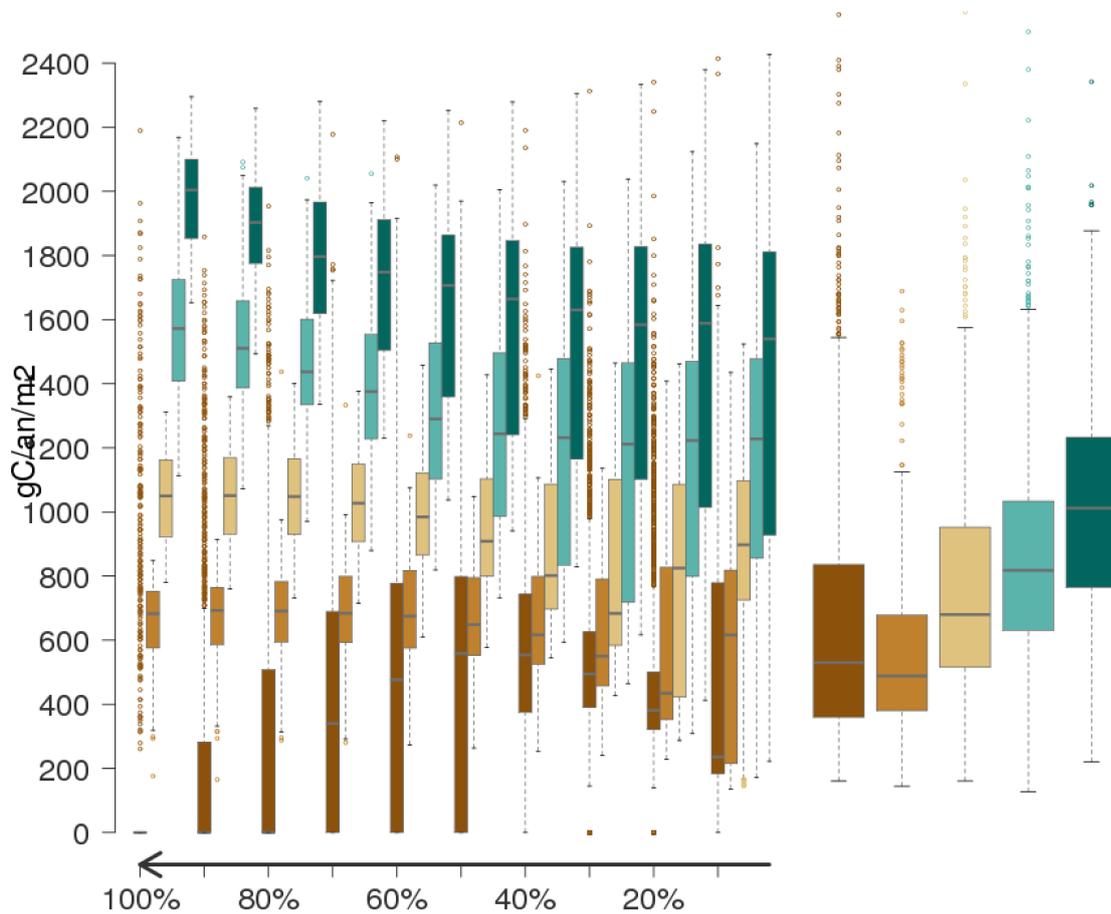


FIGURE 3.25 – *Comparaison de la GPP simulée au produit issu d'observations, par régime de productivité arborée. A gauche de la figure sont tracés les profils de GPP totale du couvert végétal en sortie de l'expérience de référence, soit la somme de la GPP des PFT3 et 11, pondérées par leurs taux d'occupation respectifs. A droite sont représentées les valeurs observées sur les points de grille correspondant aux régimes identifiés dans l'expérience de référence (les mêmes, donc, que dans le graphique de gauche). La composition végétale n'est pas connue et varie au sein de chaque régime.*

situerait-il à des valeurs supérieures à celles atteintes dans l'état actuel de l'occupation des sols ? Dans la suite, la notion de « potentiel arboré » est introduite, comme tentative de réaliser le compromis entre productivité totale du peuplement et niveau de développement de l'arbre.

3.4 Proposition d'interprétation des résultats en termes de « potentiel » et d'« optimum » arboré au sein de chaque régime

Les notions de « potentiel » et d'« optimum », dans le cadre de cette approche, ont été définies en début de chapitre (section 3.1). Le « potentiel » désigne donc ici la gamme de valeurs de fraction arborée pour lesquelles le niveau de développement des arbres est jugé acceptable. Le caractère acceptable ou non du développement des arbres est subjectif et dépend de chaque problématique de plantation et de gestion de couvert arboré. Pour fixer les idées, dans les parties suivantes des choix arbitraires sont opérés de manière à tester la capacité de cette approche à caractériser un *potentiel climatique de fonctionnement arboré* et sa sensibilité à des changements de fraction arborée.

3.4.1 Caractérisation du « potentiel arboré »

Par définition, ce potentiel est défini comme l'intervalle des fractions arborées pour lesquelles le niveau de développement des arbres est supérieur à un seuil. Le seuil 3 (voir section 3.1), qui représente un niveau de productivité intermédiaire, est arbitrairement choisi ici comme seuil d'acceptabilité. Ce seuil est dépassé dans tous les régimes pour au moins les plus basses fractions arborées.

La règle permettant de délimiter ce potentiel est donc : *le potentiel d'un régime donné est égal à l'intervalle de fractions arborées telles que, pour plus de 75% des points assignés à ce régime, le développement des arbres est supérieur au seuil d'acceptabilité (Seuil3) ; à ces fractions arborées est associée la gamme de valeurs de productivité totale du peuplement correspondante.*

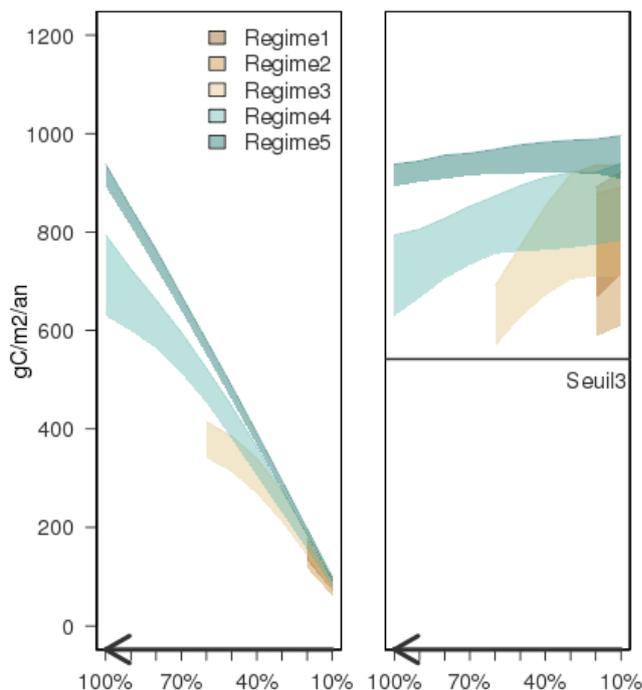


FIGURE 3.26 – *Potentiel arboré des différents régimes pour l'expérience de référence.* La graduation de l'axe des ordonnées, en $gC/m^2/an$ est identique pour les deux graphiques : celui de gauche représente la productivité totale du peuplement, celui de droite la productivité individuelle (développement) des arbres. Sur ce dernier, la ligne horizontale repère le seuil d'acceptabilité : seules les valeurs de développement supérieures à ce seuil pour la majorité (75%) de la distribution sont retenues. La dispersion (entre les quantiles 1 et 3) sur l'ensemble des points associés à chaque régime est figurée par les aplats de couleur.

La figure 3.26 permet de visualiser les potentiels ainsi déterminés. Ils se présentent

comme des enveloppes de valeurs de productivité dont la dimension verticale représente la dispersion spatiale des valeurs, et la dimension horizontale l'intervalle de fractions arborées sélectionnées. Il s'agit d'une représentation lissée de la figure 3.17. Comme l'analyse des régimes le démontrait déjà, le niveau de développement des arbres est plus important pour les petites fractions arborées et décroît de manière continue quand la fraction arborée augmente, tandis que la productivité totale est inversement corrélée au développement des arbres (excepté pour le régime 1). Pour les régimes 1 à 3 la productivité devient inférieure au seuil d'acceptabilité pour les grandes fractions arborées, ce qui se traduit par des intervalles de potentiel restreints sur la figure 3.26.

Selon cette définition, à l'échelle globale, le potentiel est ainsi limité aux fractions arborées 10 et 20% pour les régimes 1 et 2, et à des valeurs de productivité totale du peuplement respectivement de 133 à 178, et de 117 à 175 gC/m²/an (quantiles 1 et 3). Pour le régime 3, en revanche, le potentiel atteint ainsi 341 à 415 gC/m²/an pour la fraction 60%, proche de la valeur de référence (326 gC/m²/an) pour les terres arbustives tropicales (voir section précédente). Les régimes 4 et 5, enfin, conservent un niveau de développement supérieur à ce seuil pour toutes les fractions arborées, et atteignent des niveaux les plus élevés pour la fraction 100% : 630 à 794 et 893 à 938 gC/m²/an, respectivement. Cependant, ces valeurs semblent peu réalistes au regard des valeurs de référence dont nous disposons, ainsi qu'il a déjà été signalé. Nous verrons toutefois que des variations, parfois importantes, apparaissent au niveau régional.

→ La définition de ce potentiel présente l'intérêt de réduire à un le nombre de seuils arbitraires fixés, et de présenter une enveloppe au sein de laquelle des critères complémentaires peuvent être appliqués, comme ce serait le cas dans l'élaboration de stratégies de reforestation. C'est cette notion qui sera utilisée au chapitre 4 pour étudier l'évolution future du potentiel arboré. Cependant, cette notion de potentiel est difficile à manipuler lorsque que des dimensions supplémentaires (comme la variabilité inter-régionale) sont ajoutées à l'analyse, c'est pourquoi la notion d'optimum, plus restrictive, lui sera préférée dans la fin de ce chapitre. La comparaison avec les valeurs de référence (section 3.3) suggère que le potentiel arboré est sous-estimé pour le régime 1 : l'intervalle de NPP est plus proche de la référence pour la fraction arborée 40% que pour celles de 10 et 20% identifiées ici. Cette comparaison n'est cependant pas assez robuste pour invalider la définition des régimes ou pour en ajuster les seuils, et l'écart constaté ne remet pas en cause la méthodologie proposée.

3.4.2 Caractérisation de l'optimum de fonctionnement : le « potentiel arboré optimal »

La notion d'« optimum » désigne ici la fraction arborée permettant de réaliser le meilleur compromis entre les critères de développement des arbres et de productivité totale du peuplement.

La règle d'évaluation est : *maximiser la productivité arborée tout en maintenant un niveau de développement des arbres acceptable*. Les deux conditions à remplir sont indiquées ci-après. Elles permettent d'identifier la fraction arborée « optimale » au sein d'un régime donné.

Condition sur le développement des arbres

Cette condition est identique à celle d'identification du potentiel : fractions arborées telles que, pour plus de 75% des points assignés à ce régime, le développement des arbres est supérieur au seuil d'acceptabilité (Seuil3).

Dans le cas où aucune fraction arborée ne vérifie cette condition, l'optimum est fixé à la fraction qui maximise néanmoins ce niveau de développement. Comme l'ont démontré les résultats de l'expérience de référence, il s'agit toujours de la fraction 10%.

Condition sur la productivité totale du peuplement

Dans le cas où la condition portant sur la productivité de l'arbre est vérifiée, un intervalle de fractions arborées est sélectionnée : le « potentiel » évoqué précédemment. Parmi celles-ci, la fraction arborée optimale est celle qui maximise la productivité totale du peuplement, soit : *la fraction arborée telle que la moyenne de productivité totale du peuplement est maximale.*

La figure 3.27 montre le positionnement de ces optima sur les profils de chaque régime, tels que nous les avons déjà présentés dans la première partie de ce chapitre (figure 3.3).

D'autres critères d'évaluation seraient bien sûr envisageables : maximiser le développement de l'arbre, par exemple, ou bien limiter la fraction arborée dans un contexte agroforestier. De tels critères dépendraient néanmoins entièrement de problématiques spécifiques.

→ La notion d'optimum permet de caractériser le potentiel arboré de chaque régime par une valeur de fraction arborée unique, celle conduisant à la productivité maximale en préservant le niveau de développement individuel des arbres. Ce critère peut être utilisé pour comparer les potentiels selon différentes dimensions, comme dans le temps (futur versus présent, par exemple), ou dans l'espace : la variabilité inter-régionale va ainsi être évaluée dans la section suivante.

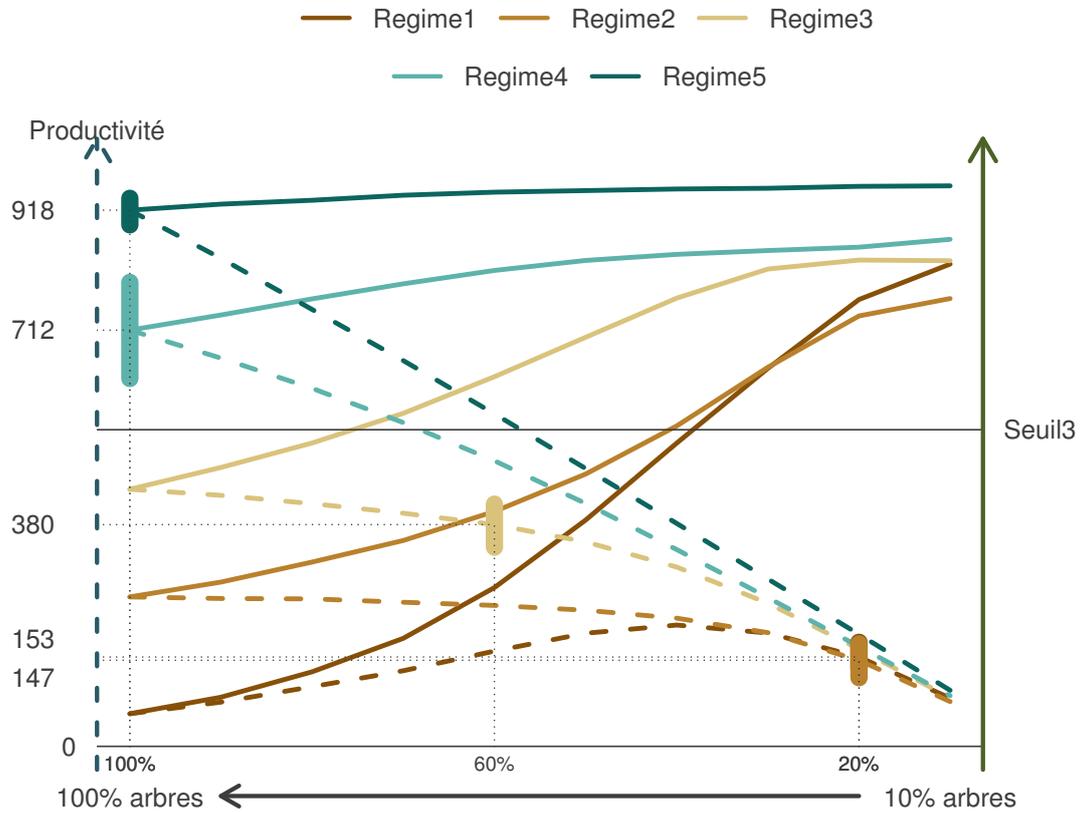


FIGURE 3.27 – *Positionnement des optima de potentiel arborée par rapport aux profils de productivité pour chaque régime, dans l'expérience de référence. Cette figure est identique à la figure 3.3 pour les courbes de productivité totale du peuplement moyenne (pointillés) et de productivité individuelle des arbres. Les ordonnées sont graduées en $gC/m^2/an$. Les segments verticaux (trait gras) représentent la dispersion (quantiles 1 et 3) des valeurs de productivité totale du peuplement obtenue pour la fraction arborée optimale calculée pour chaque régime. Les valeurs correspondant à la moyenne de productivité totale pour chaque optimum est indiquée à gauche. Les segments des régimes 1 et 2 sont superposés pour la fraction arborée 20%, et les valeurs moyennes correspondantes de productivité totale sont écrites à gauche : respectivement 153 et 147 $gC/m^2/an$ pour les régimes 1 et 2.*

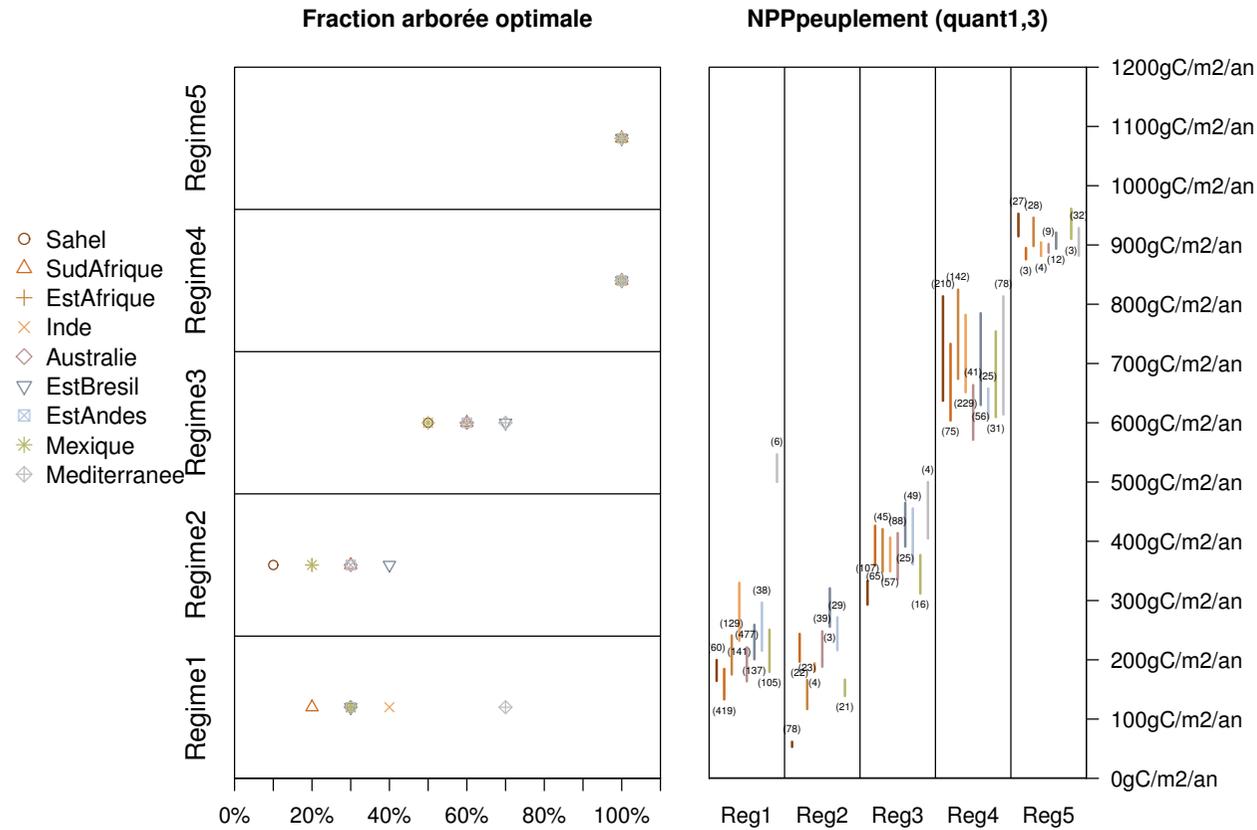


FIGURE 3.28 – *Potentiel arboré optimal dans chaque région, et pour chaque régime, pour l'expérience de référence.* A gauche, les fractions arborées sont représentées sur l'axe horizontal et les régimes sont superposés verticalement. Pour chaque régime, les fractions arborées optimales de chaque région sont positionnées sur une même ligne horizontale, de la plus petite (à gauche) à la plus grande. A droite, la productivité totale du peuplement est représentée selon l'axe vertical, et les régimes se succèdent horizontalement. Dans la zone assignée à chaque régime, les intervalles de dispersion (quantiles 1 et 3) sont tracés pour chaque région. Les chiffres entre parenthèses sur le graphique de droite indiquent le nombre de points de grille pris en compte pour chaque région et pour chaque régime.

3.4.3 Variabilité inter- et intra-régionale des potentiels arborés optimaux

Les potentiels arborés optimaux sont calculés séparément dans les neuf régions étudiées (figure 3.11), pour chaque régime. La figure 3.28 synthétise les résultats obtenus : les fractions optimales identifiées pour chaque régime (partie gauche), au sein de chaque région, et l'intervalle de valeurs de productivité totale du peuplement (NPP, partie droite) correspondantes (50% des points compris entre les quantiles 1 et 3). En complément, la figure 3.29 représente la dispersion des valeurs de productivité individuelle des arbres (développement) obtenues pour les fractions arborées optimales de chaque régime pour chaque région. Chaque région montre une dispersion spécifique au sein de chaque régime, de sorte que les couverts optimaux (selon la définition pour cette expérience) ne sont pas identiques d'une région à l'autre pour un régime donné.

De manière générale, l'ordre des régimes identifié à l'échelle globale est retrouvé à celle des régions : la fraction arborée et le niveau de productivité du peuplement tendent à augmenter avec les régimes pour l'ensemble des régions.

Pour les régimes 4 et 5, la fraction arborée optimale est de 100% pour toutes les régions. Les valeurs correspondantes de productivité totale du peuplement sont supérieures à celles des autres régimes, pour toutes les régions également. Cependant, la dispersion intra-régionale de ces valeurs est bien supérieure pour le régime 4, dans toutes les régions. L'homogénéité observée dans le régime 5 s'explique en partie par la définition de ce régime : la productivité des arbres est comprise dans un intervalle restreint de valeurs, proches du maximum, et la productivité totale est directement proportionnelle à la fraction arborée (100%), de sorte que la productivité totale maximale est globalement peu dispersée.

Contrairement aux régimes 4 et 5, la dispersion inter-régionale de productivité observée **pour les régimes 1 à 3** est induite en partie par les différences de fraction arborée optimale. En termes de productivité individuelle des arbres (figure 3.29), la dispersion inter-régionale est moins prononcée, ce qui s'explique par la condition de sélection qui restreint l'intervalle de variation de ce critère. La variabilité inter-régionale, d'autre part, explique que cette condition ne soit pas remplie pour la même fraction arborée dans toutes les régions. Pour le régime 3, cette fraction arborée optimale est répartie entre 50 et 70% pour les différentes régions, autour de la valeur globale (60%). Les régions présentant la plus faible fraction arborée optimale pour ce régime, les régions Sahel et NordAmérique, obtiennent également les plus faibles valeurs de productivité totale. Inversement, les régions Méditerranée et EstBresil, qui présentent la fraction arborée la plus élevée pour ce régime, obtiennent les valeurs de productivité totale les plus fortes. Cette observation est toutefois à nuancer par la très faible représentation de la région Méditerranée pour ce régime (4 points de grille seulement).

Les fractions arborées optimales sont globalement inférieures pour les régimes 1 et 2, par rapport à celles des autres régimes. Des valeurs isolées, 70% pour le régime 1 dans la région Méditerranée, et 10% pour le régime 2 dans la région Sahel, semblent se distinguer. Cependant, la région Méditerranée est encore une fois très peu représentée par ces régimes (6 points pour le régime 1, et aucun pour le régime 2). Quant à la région Sahel, elle présente une fraction arborée optimale de 30% pour le régime 1,

et de 10% seulement pour le régime 2, ce qui traduit un niveau de développement des arbres globalement inférieur pour le régime 2. Ces deux régions mises à part, les valeurs de fraction arborée optimale s'échelonnent entre 20 et 40% pour ces deux régimes, ce qui est supérieur à la fraction optimale de 20% identifiée à l'échelle globale. Le poids exercé par la région SudAfrique (407 points), qui présente la plus petite fraction arborée optimale, peut contribuer à expliquer cette distorsion à l'échelle globale, mais en partie seulement. Pour le régime 2, la région Sahel est la plus représentée (78 points, pour un régime globalement peu étendu), et contribue à déplacer la distribution de valeurs de développement de l'arbre vers le bas à l'échelle globale.

→ La variabilité inter-régionale des régimes 4 et 5 reste comprise dans des valeurs hautes et la fraction arborée optimale est identique pour toutes les régions, égale à 100%. La dispersion inter-régionale du « potentiel arboré optimal » est plus importante dans les régimes 1 à 3 du fait du plus bas niveau de développement des arbres, et les valeurs de productivité des arbres franchissent le seuil d'acceptabilité. La variabilité inter-régionale pour ces trois régimes conduit à des différences de fraction arborée optimale. La variabilité inter-régionale est donc plus fortement exprimée au niveau de la productivité totale du peuplement. Pour l'application en termes de projets de reforestation, les spécificités régionales sont donc importantes.

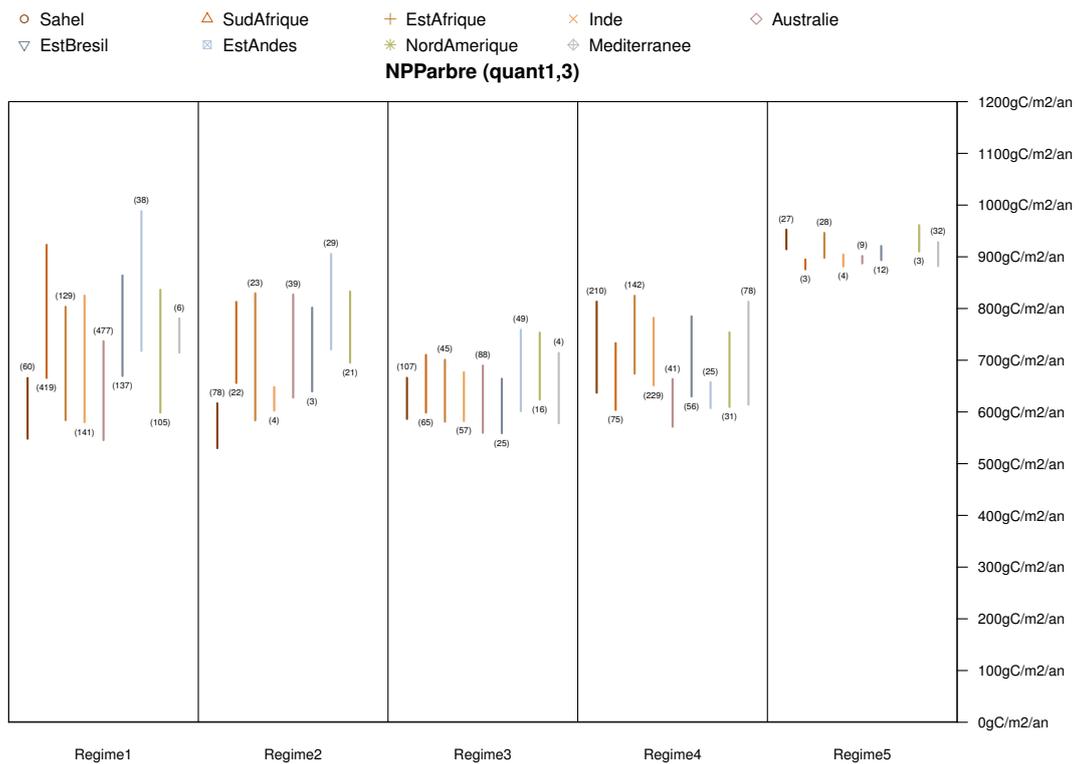


FIGURE 3.29 – Niveaux de développement des arbres correspondant à la fraction arborée optimale dans chaque région, et pour chaque régime, pour l'expérience de référence. La productivité individuelle des arbres est représentée selon l'axe vertical, et les régimes se succèdent horizontalement. Dans la zone assignée à chaque régime, les intervalles de dispersion (quantiles 1 et 3) sont tracés pour chaque région. Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre de points de grille pris en compte pour chaque région et pour chaque régime.

3.5 Introduire des critères alternatifs d'évaluation de la performance du couvert arboré

La méthodologie suivie jusqu'à présent permet d'évaluer le potentiel d'un couvert arboré au sens de la maximisation de la productivité. Cependant, les objectifs d'actions de reforestation dépassent souvent ce seul critère : ils incluent d'autres services écosystémiques et sont soumis à des contraintes locales distinctes de la productivité arborée (voir chapitre 1). Deux questions sont posées dans cette section :

- celle de la convergence ou de la divergence des optima de fraction arborée favorisant différents critères ;
- celle de l'évaluation du coût des compromis favorisant plusieurs critères à la fois.

Par « coûts » sont entendues les variations subies par un critère lorsqu'un autre est favorisé à son détriment. Il ne s'agit pas encore d'un coût économique. Cette remarque vaut également pour les notions de « gain » et de « perte » utilisées dans la suite.

Evaluation de l'optimum de performance pour différents critères. Les critères d'évaluation sont choisis en fonction de leur accessibilité en sortie d'expérience de simulation et de leur pertinence au regard des enjeux de reforestation. Pour ce travail, *la surface ombragée sous couvert arboré* (son maximum au cours de la saison de croissance) et *l'extrême de chaleur journalier au niveau du sol* (le maximum sur la période étudiée) ont été retenus. Pour chaque critère, la dispersion des valeurs obtenues est analysée en fonction des fractions arborées, de manière à identifier celle favorisant ce critère. Les analyses sont réalisées séparément au sein de chaque régime.

« Sensibilité » multi-critère autour de l'optimum arboré. Le coût de s'écarter de la fraction arborée définie comme optimale du point de vue de la productivité est évalué comme le gain ou la perte réalisé entre la valeur obtenue pour la fraction optimale et celle obtenue pour la fraction juste inférieure ou juste supérieure. Ces coûts sont calculés pour l'ensemble des critères : productivité des arbres, productivité totale du peuplement, maximum d'ombrage et extrême de chaleur. L'approche revient à regarder la dérivée de la relation entre chaque critère et la fraction arborée, autour de l'optimum de productivité. Il ne s'agit pas d'une analyse de sensibilité à proprement parler.

3.5.1 Comportement des critères alternatifs en relation avec la fraction arborée

La médiane de l'extrême de chaleur varie au maximum de 1.36 °C entre les fractions arborées 10 et 100%, en moyenne sur le domaine tropical semi-aride. Cette variation est très faible au regard de la dispersion spatiale de cet extrême de chaleur sur le domaine, supérieure à 15 °C pour toutes les fractions arborées. L'effet de la fraction arborée est un peu plus marqué sur les petites fractions (figure 3.30).

La relation entre le maximum de surface ombragée et la fraction arborée est en revanche quasiment linéaire, en moyenne. Cependant, la dispersion spatiale de la surface ombragée est très forte pour les fractions arborées les plus élevées. Cette variabilité au sein du domaine tropical semi-aride reproduit celle observée pour la productivité des arbres : les

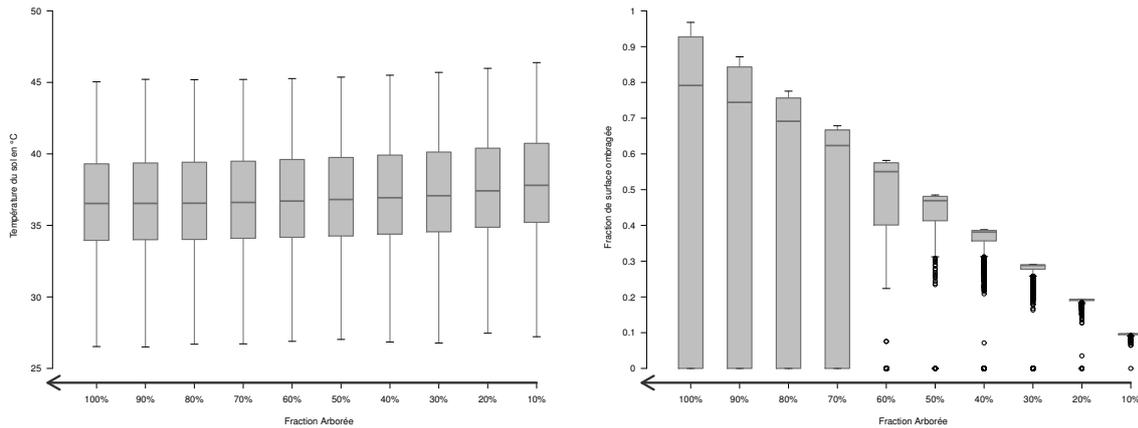


FIGURE 3.30 – *Dispersion des résultats obtenus pour deux critères sur l'ensemble du domaine tropical semi-aride, pour l'expérience de référence. A gauche, l'extrême de chaleur est calculé comme le maximum de température journalière atteint à la surface du sol sur l'ensemble de la période de 15 ans, tous régimes confondus. A droite, le maximum d'ombrage est calculé comme la moyenne sur 15 ans du maximum annuel de surface de sol à l'ombre du couvert arboré, tous régimes confondus également.*

points du régime 1 inclus dans le domaine n'ont aucune croissance arborée pour les hautes fractions, et l'absence de croissance est logiquement traduite par une absence d'ombrage.

En dépit de la faible amplitude de l'un et de la dispersion extrême de l'autre, ces deux critères montrent cependant une convergence de comportement : ils varient dans le sens d'une optimisation (extrême de chaleur minimal et ombrage maximal) vers les plus fortes fractions arborées. Néanmoins, c'est pour les plus faibles fractions arborées que l'effet est plus fort sur le critère de température, et que le risque de perte totale d'ombrage est le plus faible. L'analyse qui suit précise ces résultats au sein de chaque régime de productivité.

Température de surface

La figure 3.31 montre que l'extrême de chaleur rencontré est maximal lorsque le couvert est composé de 10% d'arbres et de 90% d'herbacées. La tendance à la diminution de cet extrême de chaleur suivant le gradient de fraction arborée dans le couvert apparaît clairement sur le graphique, pour l'ensemble des régimes de productivité. Le tracé des profils moyens permet de mieux distinguer les différentes tendances (figure 3.32a). Les courbes moyennes sont similaires pour les régimes 2 à 5. Celle du régime 1 se distingue par un effet de saturation plus marqué dans les hautes fractions arborées que pour les autres régimes.

Le tracé de la moyenne des valeurs centrées-réduites (figure 3.32b) des extrêmes de chaleur montre en outre que les profils de variation sur le gradient de fraction arborée sont presque superposés pour les régimes 2 à 5 : la variabilité liée à la fraction arborée est donc identique pour ces régimes.

L'absence d'effet du régime sur la relation entre extrême de chaleur et fraction arborée indique que les différents modes et niveaux de productivité arborée n'ont pas d'effet sur cette variable. C'est donc un autre élément de la composition et du fonctionnement du couvert végétal qui est déterminant ici.

Sans prendre en compte le niveau de productivité des arbres, le régime 1 se distingue

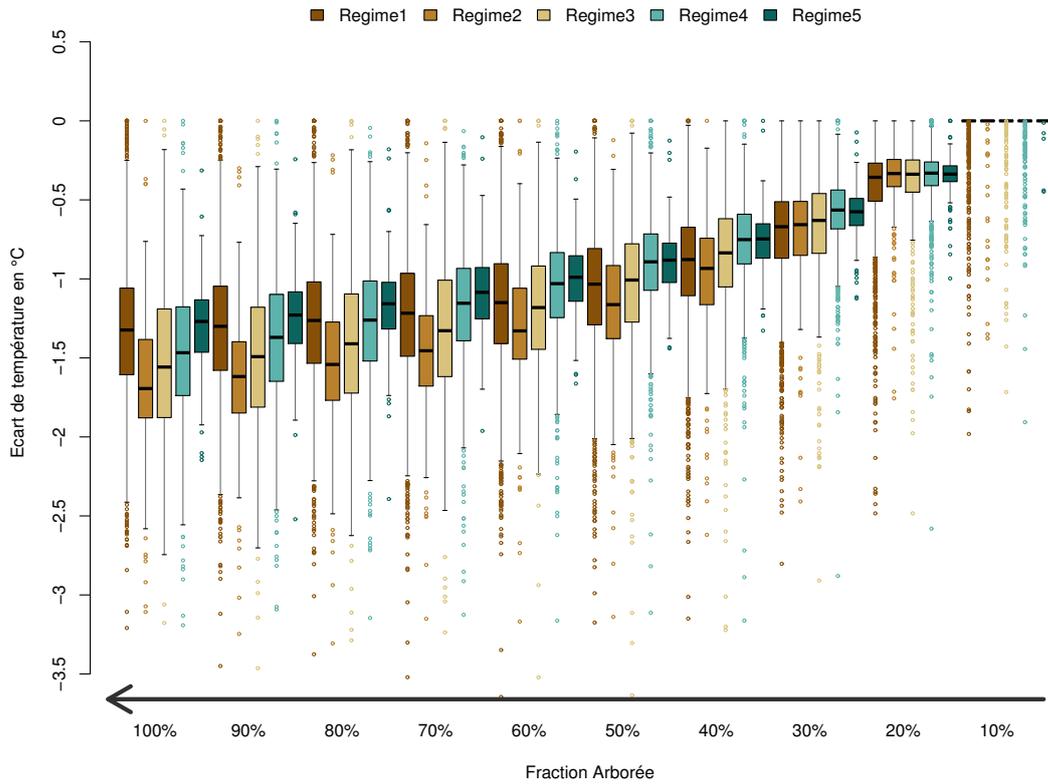
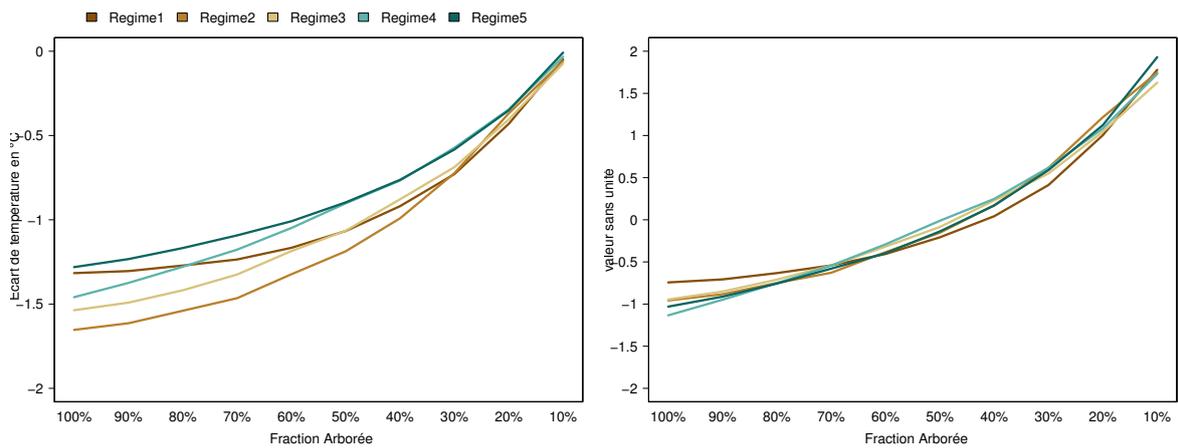


FIGURE 3.31 – *Dispersion de l'écart entre l'extrême de chaleur rencontré sur la période de 15 ans et le maximum de cet extrême, en chaque point de grille, sur le gradient de fraction arborée, pour l'expérience de référence. L'extrême de chaleur atteint son maximum pour la fraction arborée 10% (écart égal à zéro pour plus de 75% des points).*



(a) Moyenne par régime de l'extrême de chaleur (b) Moyenne par régime de la valeur centrée réduite de l'extrême de chaleur

FIGURE 3.32 – *Dispersion de l'écart entre l'extrême de chaleur rencontré sur la période de 15 ans et le maximum de cet extrême, en chaque point de grille, sur le gradient de fraction arborée, pour l'expérience de référence.*

des quatre autres en ce que, pour les hautes fractions arborées, aucun arbre n'est présent. La présence ou l'absence des arbres, quel que soit leur niveau de productivité, pourrait donc jouer un rôle. Cependant, si la relation jouait dans le sens d'une augmentation de l'extrême de chaleur en réponse à la diminution de la fraction arborée, comme le suggère le graphique, alors l'extrême de chaleur rencontré pour les plus hautes fractions arborées dans le cas du régime 1 devrait être supérieur à celui rencontré pour 10% d'arbres - puisque les arbres ne sont pas maintenus dans ce cas. Or ce n'est pas ce qui est obtenu.

La différence vient en fait de la couverture végétale totale du sol, incluant les herbacées. Une augmentation de la température liée à l'augmentation du couvert herbacé peut s'expliquer par un effet dominant de l'albedo dans des conditions arides. En l'absence d'arbres, pour un couvert composé uniquement d'herbacées, l'albedo de ces dernières est plus faible que celui du sol nu. Pour un sol clair (l'albedo variant selon le type du sol et son état de saturation en eau), cette différence est encore plus marquée. Or l'effet d'une diminution de l'albedo est une augmentation de l'absorption du rayonnement incident, donc de la chaleur absorbée, et enfin de la température de surface. Ce raisonnement est cohérent avec les résultats observés ici. Il ignore, cependant, l'effet des flux turbulents à la surface qui induisent, au contraire, son refroidissement.

L'utilisation *offline* du modèle de surface ne permet pas de simuler la rétroaction du fonctionnement du couvert végétal sur les flux turbulents. Il faudrait pour cela réaliser les expériences avec le modèle couplé surface-atmosphère.

→ L'utilisation indépendante du modèle de surface ne permet pas de pronostiquer l'effet du couvert arboré sur la température de surface. Néanmoins, la composition du couvert du sol démontre un effet allant dans le sens d'une diminution de la température du sol pour les plus hautes fractions arborées (en fait les plus basses fractions herbacées).

Ombrage sous couvert arboré

L'ombrage (la fraction de sol ombragée par le couvert arboré) augmente continuellement avec la fraction arborée, pour tous les régimes sauf le régime 1 (figure 3.33). La relation est quasi linéaire pour les régimes 2 à 5, mais montre une inflexion vers les hautes fractions arborées, de plus en plus prononcée pour les régimes de moins en moins favorables. Pour le régime 1, la surface ombragée augmente de façon homogène avec la fraction arborée jusqu'à 50% d'arbres : au-delà de cette fraction arborée, le risque que la surface ombragée devienne nulle est supérieur à 25%.

→ La fraction ombragée est logiquement corrélée à la productivité totale du peuplement : plus le couvert est développé, plus la fraction ombragée est importante. Par conséquent, ces deux critères varient conjointement.

3.5.2 Coût des variations de fraction arborée sur la performance des différents critères

La figure 3.34 montre, pour les quatre critères étudiés (productivité des arbres et du peuplement, ombrage, extrême de chaleur), le coût (la différence) pour chaque fraction arborée de *ne pas passer à la fraction juste supérieure*. Dans la perspective de limiter la mobilisation de ressources (agro-écologiques, humaines) de replantation, on cherche à répondre à la question de l'intérêt d'investir dans la mise en place d'un couvert arboré plus important. En effet, les contraintes des actions de reforestation, sont directement

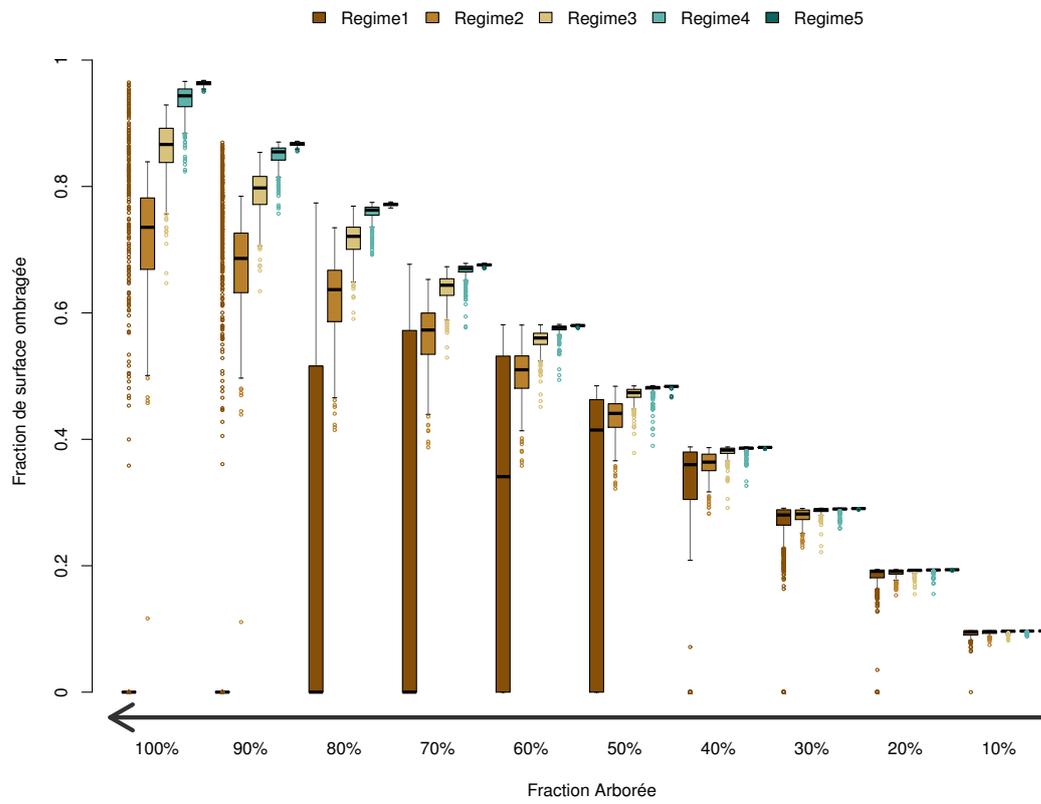


FIGURE 3.33 – *Dispersion du maximum d'ombrage annuel sur le domaine tropical semi-aride, et selon les 5 régimes de productivité, pour l'expérience de référence.*

liées à la valeur de la fraction arborée à replanter : l'effort de replantation, ainsi que la nécessité de laisser de la place disponible pour les cultures et le passage des troupeaux, par exemple, vont dans le sens d'une limitation de la fraction arborée optimale. Ainsi, en cas de relative stabilité de la performance d'un couvert autour de l'optimum déterminé, une fraction inférieure pourrait être privilégiée.

L'analyse des résultats obtenus pour ces quatre critères a déjà montré qu'ils connaissent une évolution continue avec la fraction arborée. Par conséquent, le coût de ne pas passer à la fraction supérieure est du même signe pour toutes les fractions arborées pour un critère donné. Les critères de productivité du peuplement, de surface ombragée et d'extrême de chaleur varient dans le même sens, tel que la valeur optimale est obtenue avec la fraction arborée la plus élevée. Quelle que soit la fraction arborée considérée, passer à la fraction arborée juste supérieure constitue donc toujours un gain par rapport à ces critères. Pour le critère de développement des arbres, en revanche, l'évolution se fait dans le sens opposé.

Ainsi la figure 3.34 montre le coût, pour chaque fraction arborée, de ne pas passer à la fraction arborée supérieure. Un coût est négatif lorsque renoncer à passer à la fraction arborée supérieure induit une perte de valeur (de service) pour le critère considéré. Ce coût est calculé comme la différence entre la valeur obtenue à la fraction $n+1$ et celle obtenue à la fraction n . Dans le cas de l'extrême de chaleur, la différence est favorable si elle est de signe négatif (diminution de l'extrême de chaleur). Pour faciliter la lecture conjointe des graphiques proposés pour les quatre critères, c'est l'opposé de cette différence qui est représenté : un coût de signe négatif sur le graphique de la figure 3.34 correspond à une diminution de l'extrême de température en passant à la fraction arborée supérieure.

Productivité du peuplement. Comme la productivité du peuplement augmente linéairement avec la fraction arborée pour le régime 5, l'écart d'une fraction à l'autre est constant : le coût de ne pas passer à la fraction supérieure est identique pour les petites et pour les hautes fractions arborées. Pour les autres régimes, en revanche, le coût est maximum pour les petites fractions arborées et diminue pour celles plus élevées, du fait de la saturation du potentiel de productivité totale. Cet effet de saturation est d'autant plus important que le régime est défavorable, et induit finalement un coût nul pour les régimes 1 et 2 dans les hautes fractions arborées, quand la productivité est constante : soit nulle (régime 1), soit négligeable (régime 2).

Ombrage. Ce coût est constant pour le régime 5, car l'augmentation de la fraction ombragée est proportionnelle à celle de la fraction arborée. En revanche, du fait de la saturation de l'augmentation de la fraction ombragée pour les hautes fractions arborées, pour le régime 2 en particulier, le coût de ne pas passer à la fraction arborée supérieure est maximal pour les petites fractions arborées et diminue pour les plus élevées.

Extrême de chaleur. Pour tous les régimes, le coût de ne pas passer à la fraction supérieure diminue avec celle-ci. La valeur de ce coût, comprise entre 0 et 0.5°C est néanmoins très faible.

Productivité individuelle des arbres. Les coûts associés à ce critère sont de signe opposé à celui des autres critères. Pour les régimes 4 et 5, le coût de ne pas passer à la

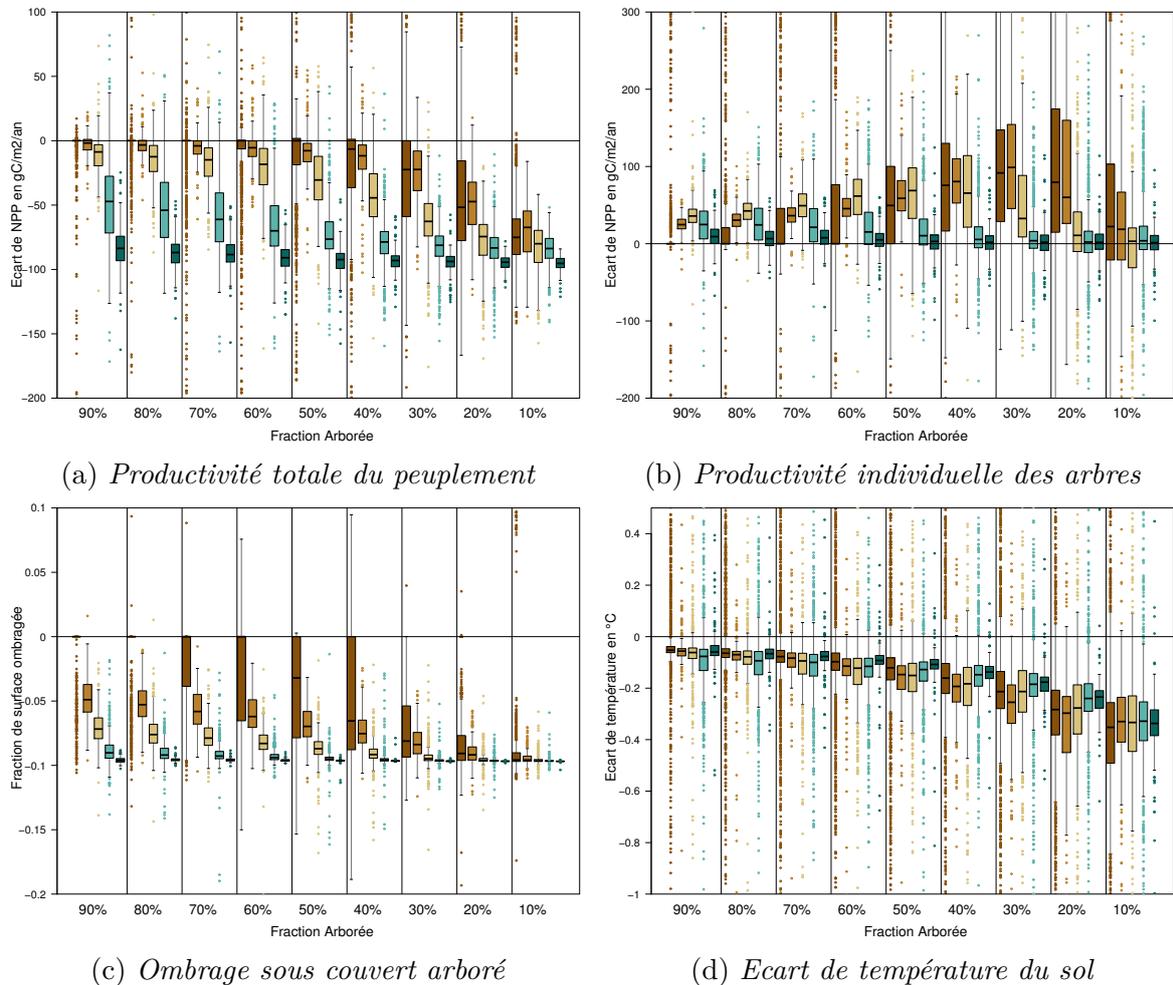


FIGURE 3.34 – *Coût (ou manque à gagner) à ne pas passer à la fraction arborée juste supérieure, pour 4 critères, pour l'expérience de référence. L'écart de température du sol est calculé point par point par rapport à la température maximale sur chaque point. Sur tous les graphiques, les valeurs négatives représentent la perte encourue en renonçant à passer à la fraction supérieure. Les abscisses sont graduées de 10 à 90% puisque la fraction maximale (100%) n'est pas concernée par ce coût.*

fraction supérieure est quasi-constant : proche de zéro, ou même nul. Ceci traduit l'absence d'influence de la fraction arborée sur le développement des arbres. Par ailleurs, la forme de la relation entre le coût et la fraction arborée est convexe pour les régimes 1 à 3 : le coût est faible pour les petites et pour les hautes fractions arborées, et maximal pour les fractions intermédiaires. Ceci traduit l'allure sigmoïde de la relation entre la productivité de l'arbre et la fraction arborée (figure 3.14) : la productivité demeure faible pour les fractions élevées, et sature à son maximum pour celles les plus basses. Cependant, le pic de coût moyen apparaît dès les fractions 20-30% pour les régimes 1 et 2.

Ainsi, pour les petites fractions arborées, le coût de ne pas passer à la fraction supérieure est maximal pour les critères liés au peuplement - productivité, ombrage et extrême de chaleur - pour tous les régimes. Ce coût est en revanche proche de zéro pour le critère de productivité de l'arbre, pour la fraction 10% : **quel que soit le régime, il est donc de toute façon intéressant de passer au moins à la fraction arborée 20%**. Lorsque la fraction arborée augmente, l'écart de coût se creuse entre les différents régimes pour les critères de productivité du peuplement et d'ombrage : le coût devient plus faible pour les régimes moins favorables. **Pour les régimes 4 et 5, les plus favorables, il demeure intéressant de toujours rechercher la fraction arborée supérieure**, avec un gain (coût négatif) constant pour la productivité du peuplement et l'ombrage, et un coût presque nul pour la productivité de l'arbre, tandis que l'effet est bénéfique, quoique très limité, pour l'extrême de chaleur. **Pour les régimes de productivité intermédiaires, 2 et 3, le coût de ne pas passer à la fraction juste supérieure reste relativement élevé pour les fractions intermédiaires 20 à 50%** pour la productivité du peuplement et pour l'ombrage, puis diminue fortement, surtout pour le premier critère, vers les hautes fractions arborées. Vers ces fractions intermédiaires, il est cependant plus coûteux de passer à la fraction supérieure en termes de productivité de l'arbre : c'est dans ce cas (fractions intermédiaires pour les régimes intermédiaires) que l'arbitrage entre les différents critères sera sensible. Enfin **pour le régime 1, rechercher les fractions arborées les plus élevées n'est pas à recommander**, de par le fort risque de dépérissement total des arbres.

→ Ces analyses rejoignent les critères de définition des potentiels de productivité sur le domaine tropical semi-aride global :

- pour les régimes les plus favorables (4 et 5), la fraction arborée est maximisée, sans effet néfaste notable sur les différents critères ;
- pour les régimes moins favorables (1 à 3), les fractions intermédiaires l'intérêt d'augmenter la fraction arborée pour les critères liés au peuplement doivent être équilibrés avec le coût associé en termes de productivité de l'arbre.

3.5.3 Quels sont les bénéfices et les coûts du choix du potentiel arboré optimal ?

L'analyse qui suit a pour objectif de quantifier les coûts du compromis réalisé par le potentiel arboré diagnostiqué précédemment pour les quatre critères : quel serait le coût de passer à la fraction juste supérieure, ou juste inférieure, à celle du potentiel arboré ?

Dans l'idée d'intégrer les différents critères pour évaluer le potentiel arboré dans chaque régime, la figure 3.35 synthétise l'évaluation de la performance du couvert sélectionné selon

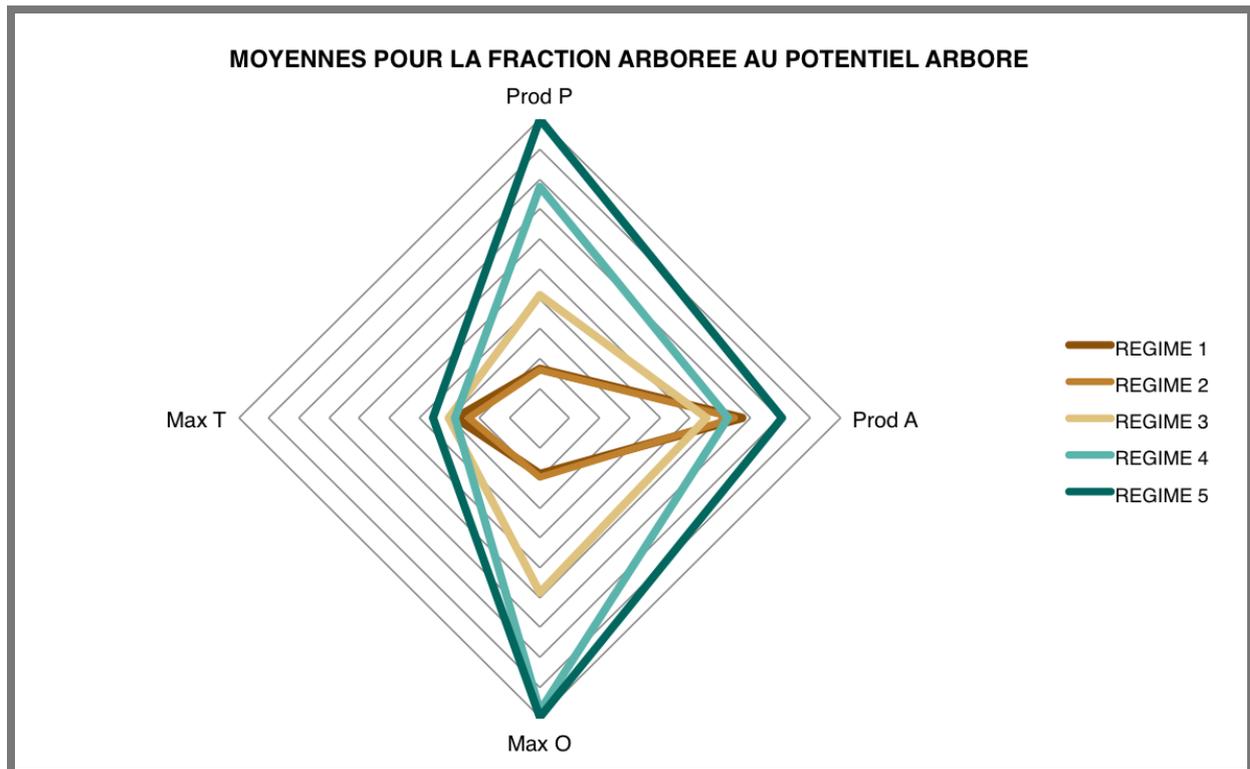


FIGURE 3.35 – *Profil des valeurs obtenues pour 4 critères, en moyenne sur la surface concernée pour chaque régime, pour l'expérience de référence. Les valeurs sont celles obtenues pour la fraction arborée identifiée comme optimale à partir des productivité de l'arbre et du peuplement. Chaque axe est gradué entre les valeurs minimale (2e percentile) et maximale (98e percentile) obtenues sur l'ensemble du domaine tropical semi-aride, toutes fractions arborées confondues. Axe « Prod P », Productivité du peuplement, en $gC/m^2/an$, minimum 0, maximum 918; axe « Prod A », Productivité de l'arbre, en $gC/m^2/an$, minimum 0, maximum 1138; axe « Max O », Ombrage maximal, sans unité, minimum 0, maximum 0.96; axe « Max T », Extrême de température journalière, en $^{\circ}C$, minimum 29, maximum 46 (cet axe est gradué en sens inverse, de manière à ce que les valeurs plus favorables soient situées vers l'extérieur du radar, pour les 4 critères). Un intervalle de graduation représente donc, respectivement, $91.8gC/m^2/an$, $113.8gC/m^2/an$, 0.096 (sans unité) et $2.5^{\circ}C$*

les différents critères. Plusieurs simplifications sont nécessaires :

- les valeurs sont représentées en moyenne par régime, c'est-à-dire sans représenter la dispersion spatiale des valeurs ;
- elles sont normalisées de manière à pouvoir utiliser une même échelle de représentation pour tous les critères.

La figure présentée ici a donc une vocation d'illustration et de support de discussion.

Sensibilité des différents critères à une variation autour de la fraction arborée du potentiel de productivité

L'optimum de chaque critère est calculé séparément comme le maximum des valeurs prises par le critère (le minimum pour le critère d'extrême de température). Dans le tableau 3.8, sont rassemblées les estimations des coûts associés au choix de chaque potentiel

arboré pour les critères étudiés ici, régime par régime. Le potentiel arboré est en effet déterminé en fonction d'un compromis entre deux critères : la productivité individuelle de l'arbre et celle du peuplement total. Aucun des quatre critères n'est donc optimisé individuellement et chaque critère subit un « coût » par rapport à son propre optimum. Ces coûts sont calculés et rassemblés dans le tableau 3.8 :

- le coût de ne pas passer à la fraction supérieure (*Coût sup* dans le tableau) ;
- le coût de ne pas passer à la fraction inférieure (*Coût inf*) ;
- le coût de ne pas rechercher le maximum du critère considéré - par exemple ne pas maximiser la productivité totale pour préserver le niveau de développement (*Coût opt*) ;
- enfin, la performance réalisée pour le critère est évaluée comme le gain réalisé en choisissant la fraction du potentiel arboré optimal par rapport au minimum obtenu sur l'ensemble des fractions arborées (*Gain max*).

Ces deux dernières grandeurs ont pour fonction de mettre en perspective les coûts calculés par rapport à la variabilité totale pour chaque critère.

		régime 1	régime 2	régime 3	régime 4	régime 5
NPP peuplement (gC/m ² /an)	Gain max	152.97	70.83	296.52	625.7	821.84
	Coût opt	-138.13	-117.85	-64.19	-1.63	0
	Coût sup	41.12	47.31	19.43	-	-
	Coût inf	-70.42	-70.7	-29.58	-47.95	-82.48
NPP arbre (gC/m ² /an)	Gain max	764.87	481.21	192.97	8.64	12.54
	Coût opt	-84.95	-54.57	-233.6	-179.62	-68.06
	Coût sup	-117.87	-87.88	-62.64	-	-
	Coût inf	60.63	29.8	67.38	25.9	10.34
Max Extreme Chaleur (° C)	Gain max	0.18	0.09	0.46	0.84	0.87
	Coût opt	-0.33	-0.53	-0.30	0	0
	Coût sup	0.07	0.09	0.08	-	-
	Coût inf	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.1
Max Ombrage (-)	Gain max	1.13	1.35	0.5	0.06	0.03
	Coût opt	-0.43	-0.37	-1.19	-1.46	-1.28
	Coût sup	-0.03	-0.35	-0.14	-	-
	Coût inf	0.38	0.31	0.12	0.008	0.05

TABLE 3.8 – *Analyse de sensibilité des différents critères à de petites variations de la fraction arborée optimale, pour l'expérience de référence. Gain max = Gain réalisé en choisissant la fraction du potentiel arboré optimal par rapport au minimum obtenu sur l'ensemble des fractions arborées. Coût opt = Coût à ne pas rechercher le maximum du critère considéré (attention, pour la température : on cherche à minimiser le critère). Coût sup = Coûts à ne pas passer à la fraction arborée juste supérieure (+10%) à celle du potentiel arboré. Coût inf = Coûts à ne pas passer à la fraction arborée juste inférieure (-10%) à celle du potentiel arboré. Une valeur négative représente une perte. Une valeur positive représente le gain réalisé. Dans le cas de l'extrême de chaleur, un coût positif indique un renforcement de cet extrême, de sorte que c'est la minimisation de cette valeur de coût qui indique une amélioration. Les calculs ont été réalisés point par point, puis moyennés sur l'ensemble de la surface concernée par chaque régime.*

Pour faciliter la lecture de ces résultats, la figure A19 (en annexe) permet de visualiser les coûts *absolus* correspondant au passage à la fraction juste supérieure (coût +10%), ou juste inférieure (coût -10%), à celle du potentiel arboré de chaque régime, en moyenne sur le domaine tropical semi-aride. La figure 3.36, dans ce chapitre, propose une représentation des coûts *relatifs*.

Sensibilité relative autour de la fraction arborée

La variabilité autour de l'optimum de potentiel arboré est plus importante lorsqu'elle est exprimée relativement au potentiel de performance de chaque critère, plutôt qu'en valeur absolue. La figure 3.36 montre ainsi les ordres de grandeur de ces coûts d'opportunité relatifs, régime par régime.

Ces figures de synthèse permettent de retrouver les conclusions de la section précédente.

Pour les régimes les plus favorables (4 et 5) : passer à la fraction inférieure induit une perte de l'ordre de 5 à 10% du potentiel local pour les critères d'ombrage et de productivité du peuplement, sans gain notable sur les autres critères.

Pour le régime 3, passer à la fraction juste supérieure induit un gain pour les critères de peuplement (productivité et ombrage) et une perte pour la productivité de l'arbre, inversement à un passage à la fraction juste inférieure. Qui plus est, les coûts et les gains sont du même ordre de grandeur (environ 5%). **Pour les régimes 3 à 5, le potentiel arboré semble donc bien choisi, au regard de ces critères. Néanmoins, la sensibilité est faible à des petites variations autour de ce potentiel, autorisant un ajustement aux fractions juste inférieures ou supérieures.**

Pour le régime 1, passer à la fraction supérieure induit un gain de l'ordre de 10% du maximum local sur les critères d'ombrage et de productivité du peuplement, mais une perte supérieure, de l'ordre de 15% du maximum local, sur la productivité de l'arbre. Passer à la fraction juste inférieure, en revanche, induit un gain moyen de l'ordre de 10% du maximum local sur la productivité de l'arbre, mais une perte relative supérieure à 25% du maximum local sur les critères d'ombrage et de productivité du peuplement.

Le régime 2 montre des effets d'amplitude similaire à celle du régime 1. En termes de productivité, la diminution de la fraction arborée serait donc plutôt à déconseiller, tandis que son augmentation serait à arbitrer en fonction d'autres critères, en particulier pour le régime 2, compte-tenu de l'amplitude non négligeable de l'effet sur la productivité du peuplement (25%).

L'arbitrage est donc moins évident pour les régimes 1 et 2, et il dépend des enjeux spécifiques des problématiques traitées.

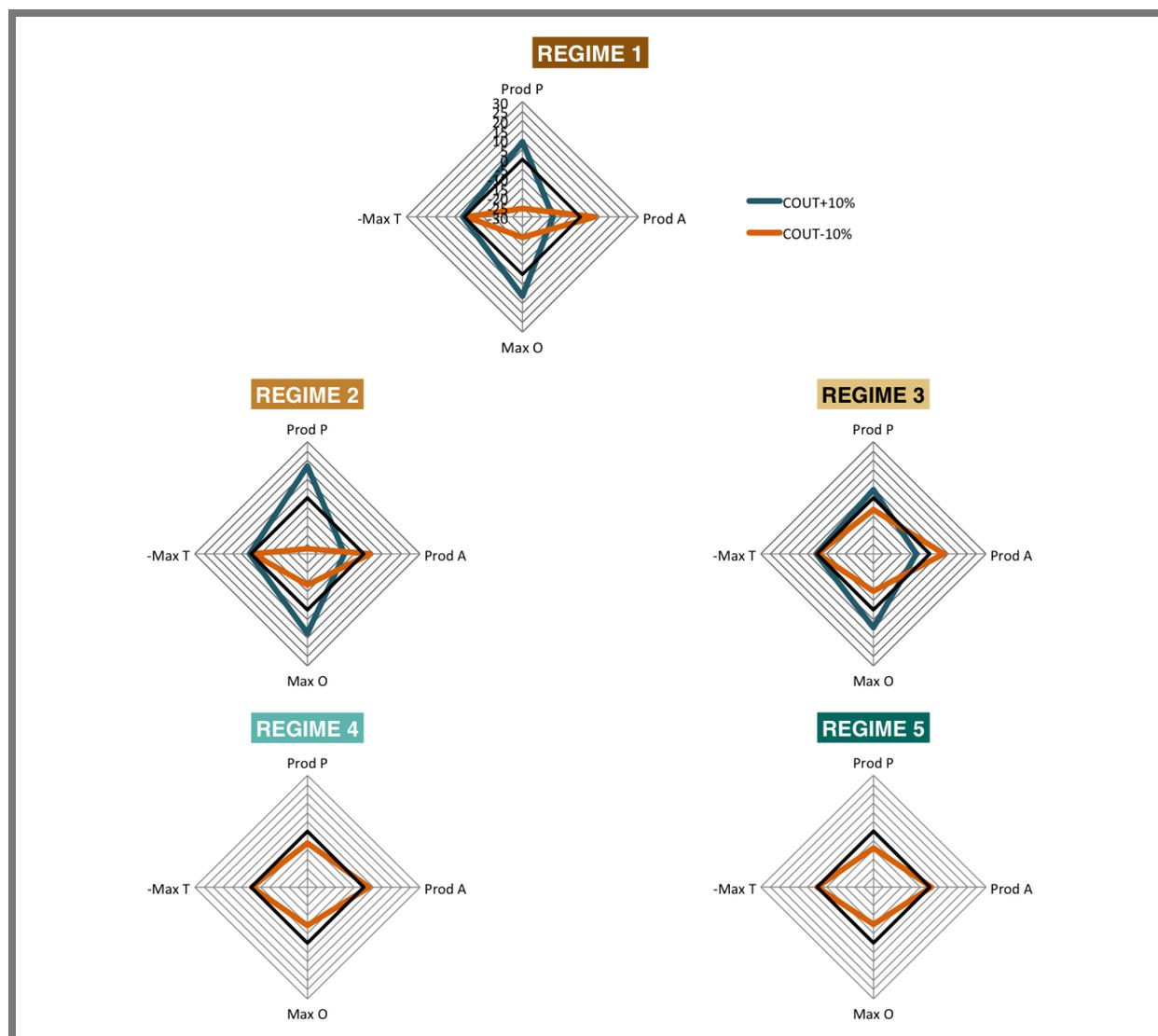


FIGURE 3.36 – *Pour chaque régime, coût de passer de la fraction arborée optimale à la fraction arborée juste supérieure (en bleu) et juste inférieure (en orangé), pour l'expérience de référence. Ces coûts sont exprimés en pourcentage du maximum du critère concerné atteint sur l'ensemble des fractions arborées. Les calculs de coût sont effectués sur chaque point de grille, puis moyennés à l'échelle de la surface assignée à chaque régime. Les coûts sont donc relatifs au potentiel de chaque point de grille. La valeur 0 est représentée en noir. Un coût négatif (vers l'intérieur du graphique) représente une perte : la valeur obtenue pour le critère considéré diminue. Le critère d'extrême de chaleur constitue une exception : un coût positif correspond à une diminution de l'extrême de chaleur.*

3.6 Discussion

Ce travail de thèse s'inscrit dans la perspective de formuler des recommandations dans l'élaboration de stratégies de reforestation dans les régions tropicales semi-arides ; ce chapitre s'inscrit plus largement dans la perspective d'une analyse dans le contexte du changement climatique. Pour concilier ces deux enjeux, la méthodologie proposée ici recourt à l'utilisation d'un modèle de surface directement utilisable avec des données climatiques issues de projections pour le futur (dans la perspective d'études complémentaires, comme nous le verrons dans le chapitre suivant), tout en orientant le cadre d'analyse des résultats dans le sens d'une interprétation en termes de potentiel pour la reforestation. Les options de modélisation retenues sont délibérément simplifiées, de manière à encadrer les réponses qu'il est possible d'apporter dans le cadre d'un tel protocole. Ce choix a pour motif de permettre ensuite d'orienter l'élaboration de futurs protocoles expérimentaux à partir d'une première expérience relativement générique. Ainsi, le choix du type fonctionnel de végétation est unique, approprié pour la problématique : un arbre adapté à la croissance en climat chaud et comportant une saison sèche.

Identifier la distribution géographique des régimes de productivité Les régimes de productivité ont d'abord été construits sur une base logique de raisonnement, distinguant les régions dans lesquelles un arbitrage doit être réalisé entre productivité des arbres et du peuplement, celles dans lesquelles une reforestation trop dense ferait courir le risque d'un échec total, et celles où au contraire la productivité n'est pas limitée. L'application de ce protocole d'expérience et de cet outil d'analyse aux données d'observations issues du CRU révèle que ces régimes de productivité sont identifiables sur le domaine tropical semi-aride. Plusieurs régimes de productivité coexistent dans toutes les régions étudiées. Certaines régions - Australie, SudAfrique et NordAmérique - sont majoritairement occupées par le régime 1 (le plus défavorable), tandis que la région Inde l'est par le régime 4 (favorable). Dans d'autres régions, plusieurs régimes se succèdent selon un gradient du régime le moins favorable (régime 1) au plus favorable (régime 5) : ce motif est particulièrement visible dans la région Sahel, et perceptible également dans les régions EstBresil, SudAfrique et Inde. Dans les autres régions, ce motif est également identifiable, même s'il revêt moins évidemment la forme d'un gradient, et peut être résumé à la juxtaposition de deux régimes. Dans presque tous les cas, le positionnement relatif des différents régimes de productivité est corrélé à la nature de la classe climatique des surfaces adjacentes au domaine semi-aride : dans la région Sahel, les régimes 1 et 2, au nord, sont ainsi adjacents à la surface classée très aride, tandis que les régimes 4 et 5, au sud, avoisinent la classe subhumide ; le régime 3 occupe une position intermédiaire. Ce cas d'école est retrouvé dans les autres régions, où les régimes moins favorables sont positionnés près des surfaces classées très arides, tandis que les plus favorables avoisinent les classes moins arides. Les surfaces semi-arides à proximité des côtes sont assignées aux régimes 1 (Inde (ouest), EstBresil, NordAmérique) et 4 (Inde (est)).

Prise en compte de la variabilité interannuelle L'analyse d'une réponse-type de la productivité à la fraction arborée est fondée sur l'observation d'une dispersion spatiale de ces réponses. Cette dispersion a été analysée pour le critère de productivité moyenne, sur un intervalle de 15 ans. On considère donc que la productivité suit une distribution non aléatoire (paramétrée) dans le temps, pour chaque fraction arborée. Cette hypothèse

est légitimée en raisonnant en climat stabilisé, ni chaotique, ni soumis à une tendance évolutive. La moyenne de cette distribution temporelle est un des paramètres permettant de la caractériser. Dans une certaine mesure, ainsi qu'il a été illustré à l'aide de la figure 3.21, la variabilité interannuelle est indirectement prise en compte dans la caractérisation des régimes. Cependant, l'occurrence d'événements extrêmes peut avoir un fort impact, ponctuel, mal reflété par la moyenne interannuelle.

Le risque est donc de ne pas discriminer des productivités moyennes de même niveau correspondant à des productivités constantes chaque année, ou variant fortement d'une année à l'autre. Or un tel effet n'est pas négligeable dans le contexte de régions soumises à des événements climatiques décennaux comme ENSO. Au Pérou, par exemple, les événements la Niña induisent des pics de productivité avec une fréquence de l'ordre de 7 ans, qui s'inscrit dans l'intervalle de 15 ans sur lequel sont calculées les moyennes dans ce protocole. Sur la carte des résultats (figure 3.15), cette région est assignée au régime 1. Cette assignation s'inscrit logiquement dans la définition et la caractérisation de ce régime : de forts niveaux de productivité peuvent être, pour les fractions arborées peu élevées, analogues à ceux atteints pour les régimes plus favorables, alors que le risque est fort d'annuler la productivité pour les hautes fractions arborées. Or en effet, une forte productivité certaines années ne permet pas pour autant de maintenir des peuplements denses le reste du temps. Néanmoins, l'omission de la variabilité interannuelle est vraisemblablement une explication de la forte dispersion interne de ce régime 1. Par ailleurs, l'approche est également limitée dans les cas où les répétitions (les surfaces concernées) sont peu nombreuses. Ceci implique que la caractérisation des propriétés des régimes concernés est moins robuste lorsqu'ils sont moins représentés ; c'est un risque accepté ici, dans l'idée que l'ensemble des régimes occupent une place logique dans la compréhension des contraintes et des enjeux de la reforestation.

→ Une suite naturelle de ce protocole expérimental est la projection dans les conditions climatiques futures voir le futur : c'est l'objet du chapitre suivant.

3.6.1 Résumé du chapitre 3

La typologie de régimes de productivité et le protocole expérimental associé ont été proposés pour étudier le potentiel arboré climatique au sein du domaine tropical semi-aride dans des conditions climatiques stabilisées. Les seuils fixés pour la première application de cette méthodologie pourront être adaptés à l'avenir en fonction de connaissances ou d'enjeux particuliers.

Les cinq régimes constituant la typologie sont définis selon le profil de réponse de la végétation à l'imposition d'un gradient de densités arborées. Ils sont construits de manière à fournir un support d'interprétation en termes de *potentiel* climatique de maintien de couverts arborés. De manière générale, lorsque la densité arborée augmente, le développement individuel des arbres diminue du fait de la compétition intra-spécifique. Cette diminution peut être compensée à l'échelle du peuplement par la multiplication des individus. Les cinq régimes ainsi construits s'échelonnent du moins (régime 1) au plus favorable (régime 5) en termes de potentiel climatique.

Les résultats de l'expérience réalisée à partir d'observations climatiques ont montré que le domaine tropical semi-aride actuel est en majeure partie (75%) réparti entre les régimes 1 et 4, l'un défavorable et l'autre peu limitant pour la production arborée.

Près de la moitié (47%) du domaine est assigné au régime 1, le plus défavorable dans la typologie : pour ce régime, les fractions arborées élevées ne peuvent pas être maintenues. Selon les définitions proposées, ce régime est donc caractérisé par un potentiel arboré limité aux plus petites fractions arborées. La productivité totale associée est la plus basse (avec celle du régime 2, peu représenté). La comparaison aux valeurs de référence montre que les valeurs obtenues sont réalistes. Elle suggère cependant une certaine sous-estimation du potentiel arboré simulé ici par rapport à celui rencontré en réalité. Pour atteindre les niveaux de productivité totale de référence, la fraction arborée devrait être supérieure à celle identifiée comme optimale selon ce protocole, ce qui impliquerait d'abaisser le seuil d'acceptabilité de développement des arbres : cette opération est tout à fait possible, si elle est jugée pertinente. Le coût de changer de fraction arborée est plus important pour ce régime que pour ceux plus favorables, en termes de productivité des arbres (individuelle et totale). Le régime 1 est présent dans toutes les régions tropicales semi-arides. Il est majoritaire en SudAfrique, Australie, EstBrésil et NordAmérique.

Le régime 4, second par ordre d'occupation spatiale, couvre 28% du domaine. Son potentiel arboré est élevé et admet toutes les fractions arborées. La sensibilité du niveau de développement des arbres est réduite, ce qui laisse une flexibilité importante pour la prise en compte d'autres critères dans les stratégies de reforestation. La surestimation par rapport aux valeurs de référence peut être interprétée de deux façons : le modèle surestime la performance du PFT3 dans des conditions peu arides et/ou les mécanismes non climatiques de régulation de l'écosystème empêchent la réalisation du potentiel climatique. Ce régime est présent dans toutes les régions tropicales semi-arides. Il est majoritaire dans les régions Méditerranée, Sahel et Inde.

Les cinq régimes sont bien discriminés par l'indice d'aridité. Le régime 1 est plus aride, tandis que le régime 4 se rapproche des conditions non arides.

Simuler l'évolution future du « potentiel arboré » dans les régions tropicales semi-arides

La caractérisation des régimes de productivité du domaine tropical semi-aride pour la période actuelle permet de formuler des premières recommandations pour la reforestation. Cependant, comme nous l'avons vu au chapitre 2, ce domaine est appelé à s'étendre dans le futur, pour empiéter sur les régions subtropicales. Comment, dans ce contexte, les différents régimes de productivité évolueront-ils dans le futur, et quelles implications peut-on en dégager pour adapter les stratégies de reforestation ?

4.1 Mise en oeuvre de la méthodologie d'analyse des potentiels arborés dans une démarche multi-modèle

L'hypothèse traitée dans le chapitre 3 était que la classe bioclimatique relativement homogène d'un point de vue climatique pouvait néanmoins être encore partitionnée en différentes classes, en différents niveaux de potentiels d'entretien d'un couvert végétal. Pour évaluer une telle répartition de potentiels, cette méthodologie d'expérimentation numérique a été développée, assortie d'une typologie pouvant être finalement interprétée en potentiel arboré (climatique). Les niveaux de productivité maximale dépendant des conditions climatiques, on s'attend à ce que leur distribution varie peu d'une expérience à l'autre, puisqu'elles sont conduites au sein de la même enveloppe climatique.

4.1.1 Présentation des expériences réalisées

Dans cette partie, la méthodologie suivie reprend et combine celles des chapitres 2 et 3 : comme au chapitre 3, les régimes de productivité sont identifiés et caractérisés pour l'ensemble du domaine tropical semi-aride, pour une fenêtre de temps de 15 années. Le modèle ORCHIDEE est forcé cette fois-ci avec des sorties de modèles climatiques, comme au chapitre 2, de manière à produire des résultats tenant compte de l'incertitude liée aux modèles. Deux jeux d'expériences sont réalisés : le premier pour le début du 21^e siècle,

désigné dans la suite comme la *période historique* et la fin du 21^e siècle, la *période future*. Cette dernière correspond au scénario RCP 8.5.

Données climatiques Les données climatiques utilisées pour les expériences de ce chapitre sont issues de simulations permettant de projeter l'étude dans les conditions futures, à la fin du 21^e siècle. Nous recourrons ici aux sorties de modèles corrigées de leurs biais selon la méthode exposée dans Hempel *et al.* (2013), dans le cadre du projet ISI-MIP. Pour des raisons logistiques (disponibilité de l'ensemble des variables nécessaires pour forcer le modèle de végétation, au moment de l'expérience), ces projections sont donc différentes de celles utilisées au chapitre 2, qui étaient non corrigées. Les implications de ce choix seront discutées par la suite. La correction de biais consiste à rapprocher les sorties du modèle des observations sur les simulations historiques, et à appliquer cette même correction pour les applications futures, en considérant qu'elle ne dépend que du modèle et reste donc constante quelles que soient les conditions simulées. L'utilisation de sorties corrigées permet ainsi de s'affranchir des erreurs systématiques diagnostiquées pour chaque modèle par la comparaison des simulations historiques avec les observations.

Protocole d'expérience Les régimes de productivité sont déterminés de la même manière pour les périodes historique et future, suivant le protocole établi au chapitre 3. La période historique est constituée des années 1991 à 2005, celle future des années 2085 à 2099. La concentration du CO₂ atmosphérique est maintenue constante sur les 15 années de chaque période, fixée à sa valeur médiane sur la série temporelle, soit 365 pmm et 863 ppm respectivement pour les deux périodes. Une expérience complémentaire, présentée en fin de chapitre, est réalisée pour un seul forçage (sorties du modèle de climat de l'IPSL) sans actualisation de la valeur du CO₂ atmosphérique, qui est laissée à celle de la période historique. Elle a pour objectif de déterminer la part de l'augmentation du CO₂ dans les changements de productivité simulés.

Résumé des expériences réalisées Les expériences sont présentées dans le tableau 4.1.

NB : la période appelée « historique » (ou *hist*) dans ce chapitre correspond à la période « actuelle » traitée dans les autres chapitres. Cette différence ne revêt aucune signification particulière et est simplement apparue au cours de ce travail de trois années. Le qualificatif « historique » ne doit pas être lu comme une référence à la période pré-industrielle, non considérée ici.

Forçages climatiques	Période Actuelle 1991-2005	Période future RCP8.5 2085-2099	
		CO2 futur RCP8.5	CO2 actuel
CRU-NCEP	Expé CRU		
IPSL-CM5A-LR	Expé IPSL Hist	Expé IPSL Fut CO2	Expé IPSL Fut noCO2
GFDL-ESM2M	Expé GFDL Hist	Expé GFDL Fut CO2	
MIROC-ESM-CHEM	Expé MIROC Hist	Expé MIROC Fut CO2	
NorESM1-M	Expé NorESM1 Hist	Expé NorESM1 Fut CO2	

TABLE 4.1 – *Résumé des expériences réalisées, et noms raccourcis pour désigner les différentes expériences dans la suite. Chaque expérience est constituée de 10 simulations, sur le gradient de composition du couvert végétal, ainsi qu'expliqué dans le chapitre 3.*

4.1.2 Répartition des régimes de productivité pour la période historique et comparaison avec l'expérience de référence

4.1.2.1 Comparaison de la surface du domaine tropical semi-aride obtenue à partir des modèles et des observations

La comparaison du positionnement du domaine tropical semi-aride obtenu à partir d'observations et à partir d'un ensemble de modèle a déjà été réalisée au chapitre 2. Cependant, comme les sorties de modèles utilisées diffèrent entre les deux chapitres (voir section précédente), les résultats obtenus ici ne sont pas exactement identiques à ceux du chapitre 2. En outre, le découpage régional introduit au chapitre 3, focalisé sur les principales régions tropicales semi-arides, n'est pas le même qu'au chapitre 2. Pour ces raisons, la répartition et la quantification du domaine tropical semi-aride selon les modèles sont donc rapidement présentées ici.

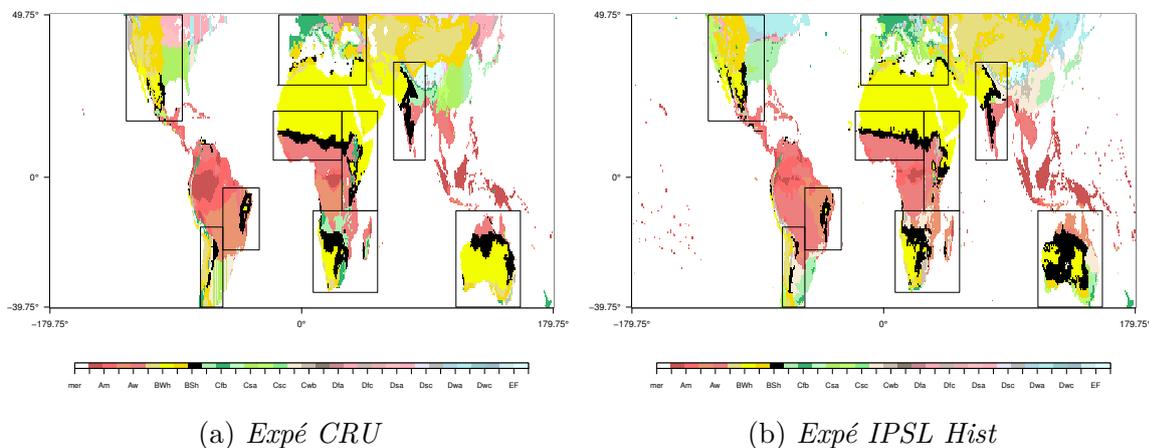


FIGURE 4.1 – *Répartition des classes climatiques selon la classification de Köppen pour la période historique, pour l'expérience de référence et pour l'exemple d'une expérience à partir d'un modèle.*

Le positionnement géographique du domaine tropical semi-aride, identifié en application la classification de Köppen, est globalement conforme, dans les résultats obtenus à partir des sorties de modèles, à celui caractérisé à partir des données d'observation du CRU (figure 4.1 et figure A20 en annexe). Si les grandes régions semi-arides chaudes occupent bien des positions analogues entre les cartes établies pour les différents jeux de données, la surface totale assignée à cette classe est très variable dans certaines régions. C'est le cas particulièrement en Australie. La figure 4.2 permet en outre de quantifier ces différences de surface semi-aride chaude régionale pour les différents jeux de données. C'est pour l'Australie que les différences observées sont les plus importantes : les données issues de sorties de modèles surestiment largement la surface tropicale semi-aride par rapport aux résultats obtenus avec les données du CRU, la substituant à la classe très aride. Une forte disparité entre les résultats est également observée pour la région EstBresil, trois des jeux de données conduisant à une forte sous-estimation de la surface semi-aride chaude en comparaison des données issues du CRU, la classant tropicale subhumide.

► **Les régions tropicales semi-arides sont bien identifiées par tous les modèles (déjà montré au chapitre 2), et les surfaces occupées sont du même ordre**

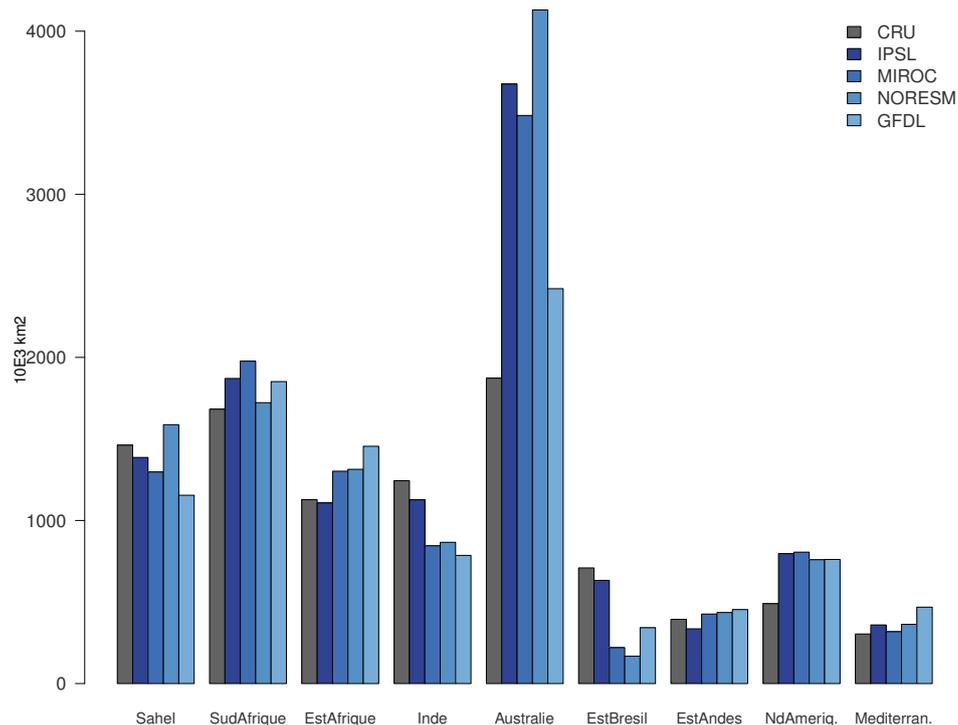


FIGURE 4.2 – *Surface régionale classée tropicale semi-aride. Valeur en milliers de km^2 obtenue pour les conditions climatiques issues des observations du CRU (en gris foncé) et pour les sorties de modèles (en nuances de bleu), pour la période historique.*

de grandeur. Deux régions font particulièrement exception : Australie et Est-Bresil, dont la surface tropicale semi-aride est respectivement sur-estimée et sous-estimée par 4 et 3 modèles.

4.1.2.2 Application de la typologie des régimes de productivité

Comparaison à l'échelle du domaine tropical semi-aride En sortie des simulations avec le modèle ORCHIDEE, les valeurs de productivité individuelle de l'arbre sont utilisées pour cartographier et caractériser les régimes de productivité dans chaque expérience. Les distributions des valeurs maximales de NPP individuelle de l'arbre sont similaires entre les résultats de l'ensemble des expériences historiques (figure 4.3).

Les seuils de définition des régimes sont calculés pour chaque modèle (tableau 4.2) comme expliqué au chapitre 3, et chaque point du domaine tropical semi-aride est assigné à un régime. Les valeurs du maximum productivité individuelle de l'arbre obtenue en sortie de simulation, et par conséquent des seuils associés, sont proches entre les modèles (tableau 4.2).

Les profils de distribution des valeurs de productivité totale du peuplement et de productivité individuelle des arbres, en fonction de la fraction arborée, sont analogues à ceux obtenus avec l'expérience de référence (figure 4.5 et figure A25 et A26 en annexe, graphiques de gauche ; à rapprocher de la figure 3.17 au chapitre 3).

Si la concordance entre les modèles est bonne, les valeurs de NPP (le maximum obtenu sur l'ensemble des fractions arborées testée de la somme annuelle de NPP) et des seuils associés sont dans l'ensemble inférieures à celles obtenues à partir des observations

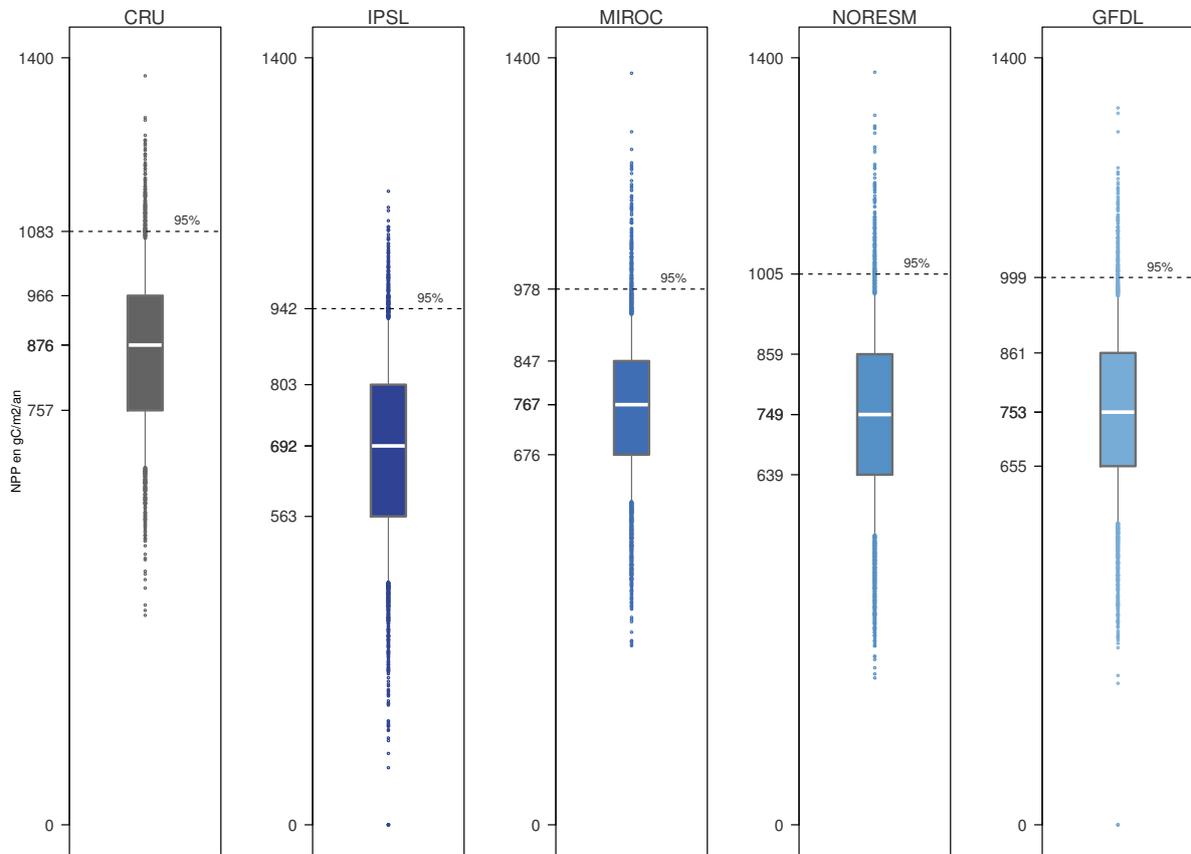


FIGURE 4.3 – *Distribution des valeurs de NPP individuelle maximale sur l'ensemble du domaine tropical semi-aride pour la période historique, pour les conditions climatiques issues des observations du CRU (en gris foncé) et pour les sorties de modèles. Valeurs en $gC/m^2/an$. En chaque point du domaine, la productivité moyenne annuelle est calculée pour le PFT arboré, sur l'ensemble des dix fractions arborées testées. Ce sont les maxima de ces valeurs obtenus point par point qui sont représentés.*

Expe	CRU	IPSL	MIROC	GFDL	NORES
Max NPP	1083 $gC/m^2.s$	942 $gC/m^2.s$	978 $gC/m^2.s$	999 $gC/m^2.s$	1005 $gC/m^2.s$
Seuil 1	325 $gC/m^2.s$	283 $gC/m^2.s$	293 $gC/m^2.s$	300 $gC/m^2.s$	302 $gC/m^2.s$
Seuil 2	542 $gC/m^2.s$	471 $gC/m^2.s$	489 $gC/m^2.s$	500 $gC/m^2.s$	503 $gC/m^2.s$
Seuil 3	866 $gC/m^2.s$	754 $gC/m^2.s$	782 $gC/m^2.s$	799 $gC/m^2.s$	804 $gC/m^2.s$

TABLE 4.2 – *Seuils de définition des régimes obtenus pour les expériences réalisées à partir des données issues d'observations du CRU, d'une part, et des sorties de modèles, d'autre part, pour la période historique.*

(figure 4.3 et tableau 4.2). Cette sous-estimation de la productivité des arbres trouve une piste d'explication dans le niveau globalement inférieur des précipitations (somme annuelle) dans les sorties de modèles, en comparaison des observations (figure 4.4).

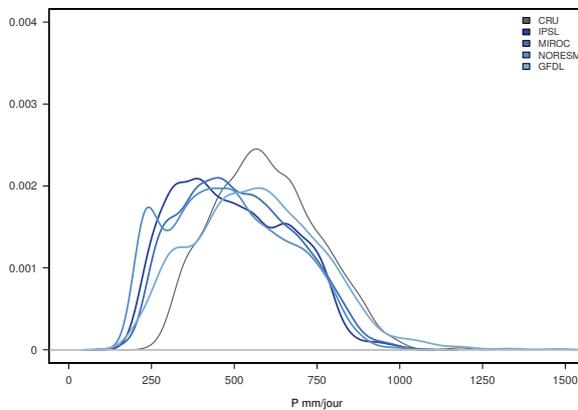


FIGURE 4.4 – *Distribution des valeurs de précipitations annuelles sur l'ensemble du domaine tropical semi-aride pour la période historique, pour les conditions climatiques issues des observations du CRU (en gris foncé) et pour les sorties de modèles. Valeurs en mm/an.*

► En termes de niveau maximal (sur l'ensemble des fractions arborées) de productivité annuelle des arbres, les modèles montrent un bon accord entre eux, et des valeurs proches de celles de l'expérience de référence. La sous-estimation par rapport à cette référence est rapprochée de la sous-estimation globale, au sein du domaine tropical semi-aride, des sommes de précipitations annuelles par les modèles.

L'ordre des régimes en termes de proportion de surface occupée est le même pour tous les modèles et pour l'expérience de référence (figure 4.7) : le régime 1 est le plus représenté, suivi par le régime 4, puis par les régimes 3, 2 et 5. Un modèle (GFDL) fait exception en inversant l'ordre des régimes 2 et 5, mais les surfaces en jeu sont suffisamment faibles pour ne pas considérer cet écart comme significatif. Malgré cet accord de répartition globale, des différences apparaissent entre les expériences. Le tableau 4.8 quantifie les écarts entre les expériences à partir de modèles et l'expérience de référence, pour chaque régime. L'écart absolu le plus important, 2762 milliers de km², avec l'expérience de référence est celui de la surface assignée au régime 1 avec Expé IPSL Hist. D'autre part, c'est pour le régime 2 que les écarts relatifs les plus importants sont observés : +206% et +169% par rapport à l'expérience de référence pour les expériences MIROC et NORESM Hist. La surface de référence étant faible, cela explique un effet amplificateur sur l'écart relatif, cependant, l'écart absolu figure également parmi les plus élevés observés : 1323 et 1082 milliers de km².

► A l'échelle du domaine tropical semi-aride, l'ordre d'importance des régimes est identique pour toutes les expériences : régimes 1, 4, 3, 2 et 5 par ordre de surface relative décroissante. Les différences les plus fortes qui apparaissent néanmoins se manifestent pour le régime 1 (écart absolu le plus élevé constaté entre l'expérience IPSL Hist et l'expérience de référence) et le régime 2 (écarts relatifs les plus importants pour les expériences MIROC Hist et NORESM Hist).

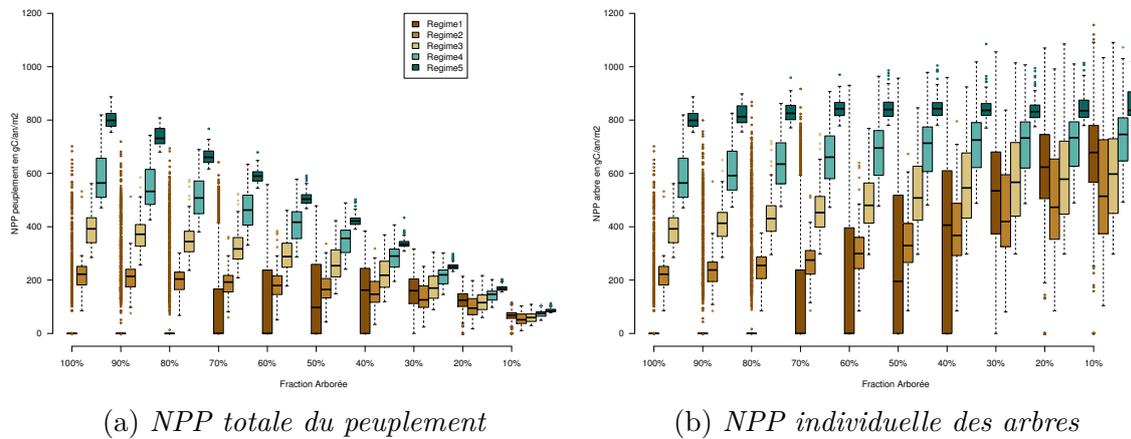


FIGURE 4.5 – Valeurs de productivité primaire nette (*NPP*) totale du peuplement pour l'expérience *IPSL Hist*. Les valeurs de *NPP* sont données en moyenne sur la période de 15 ans, en $\text{gC}/\text{m}^2/\text{an}$. Figure à rapprocher de la figure 3.17 au chapitre 3.

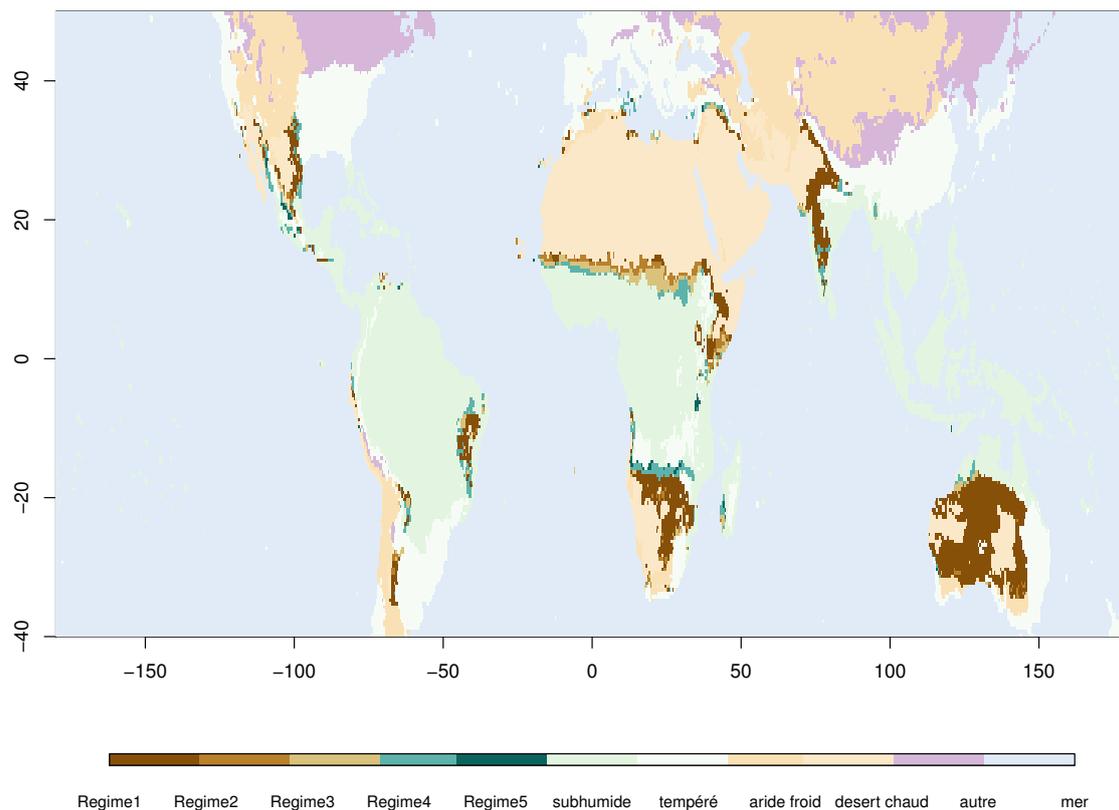


FIGURE 4.6 – Répartition des régimes de productivité - Expé *IPSL Hist*. Figure à rapprocher de la figure 3.15 au chapitre 3.

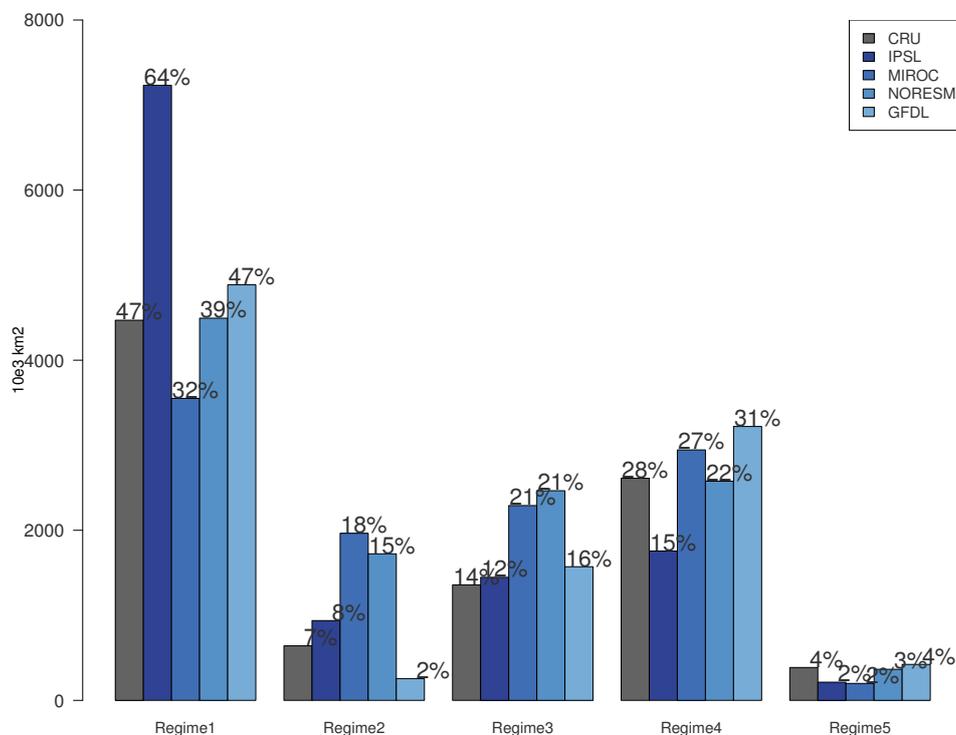


FIGURE 4.7 – *Surface globale assignée à chaque régime de productivité pour la période historique.* Valeur en milliers de km² obtenue pour les conditions climatiques issues des observations du CRU (en gris foncé) et pour les sorties de modèles (en nuances de bleu). Au-dessus de chaque barre est indiquée la proportion de surface que représente le régime par rapport à la surface totale du domaine tropical semi-aride, pour le modèle considéré.

	Regime1	Regime2	Regime3	Regime4	Regime5
IPSL	2762 (162%)	296 (146%)	89 (107%)	-855 (67%)	-173 (55%)
MIROC	-919 (79%)	1323 (306%)	933 (169%)	333 (113%)	-187 (52%)
NORES	24 (101%)	1082 (269%)	1107 (181%)	-35 (99%)	-21 (94%)
GFDL	416 (109%)	-385 (40%)	213 (116%)	609 (123%)	36 (109%)

FIGURE 4.8 – *Ecart de surface obtenue pour chaque expérience avec celle obtenue pour l'expérience de référence, pour la période historique.* Les différences de surfaces sont exprimées en milliers de km². Le rapport de la valeur obtenue avec celle de l'expérience de référence est exprimée en % de cette dernière, entre parenthèses. Par exemple : la surface assignée au régime 1 avec le modèle IPSL est supérieure de 62% à celle de l'expérience de référence.

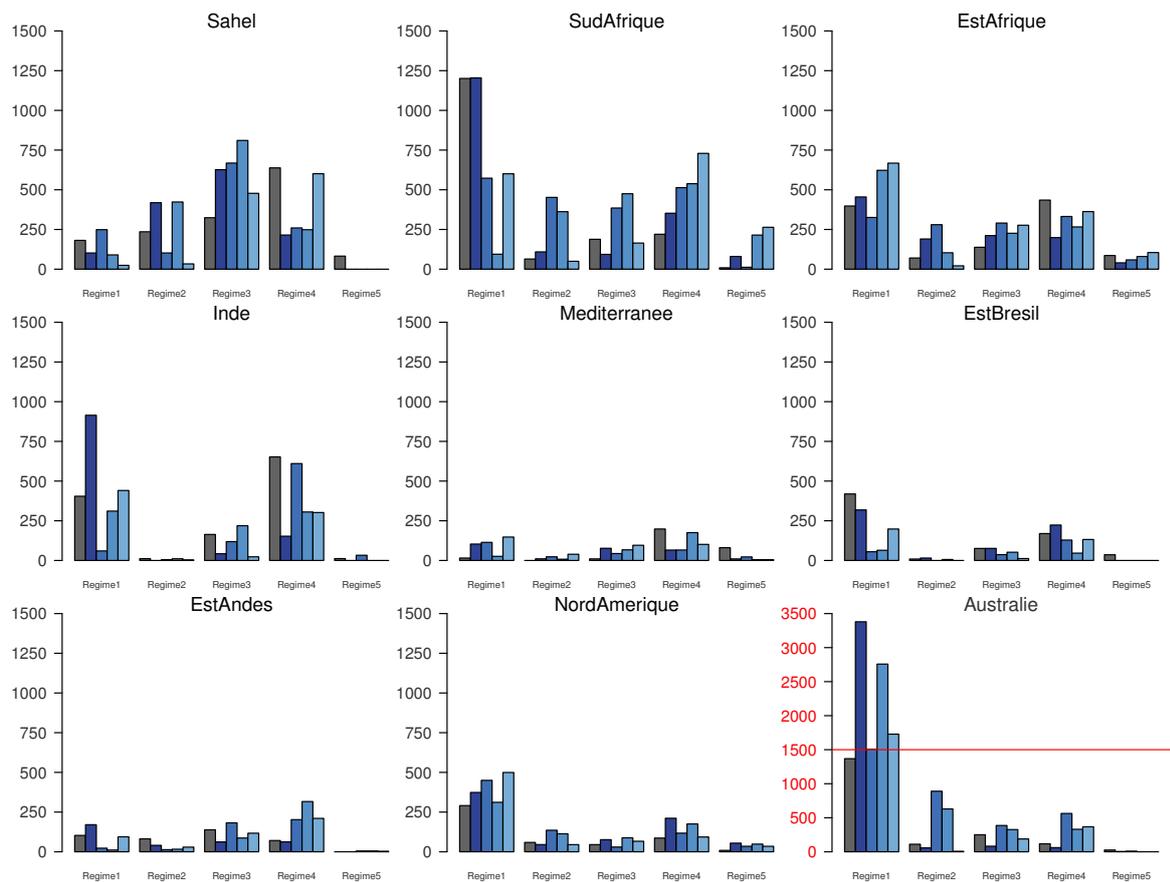


FIGURE 4.9 – *Surface régionale assignée à chaque régime de productivité pour la période historique.* Valeur en milliers de km^2 obtenue pour les conditions climatiques issues des observations du CRU (en gris foncé) et pour les sorties de modèles (en nuances de bleu), pour la période historique. L'axe des ordonnées du graphique en bas à droite, pour la région Australie, est différent des autres, en raison de la disproportion des valeurs considérées ; la ligne horizontale rouge marque la limite des ordonnées utilisées pour les autres graphiques.

Comparaison à l'échelle régionale Les expériences s'accordent généralement sur la répartition des régimes à l'échelle de chaque région (figure 4.9) :

- le régime 1 est majoritairement rencontré dans la région Australie pour l'ensemble des modèles ;
- la surface des autres régions, hors SudAfrique, est répartie entre les différents régimes sans que l'un domine nettement les autres.

Le cas de désaccord le plus frappant entre les expériences à partir des modèles et des observations est celui de la surface assignée au régime 1 pour la région SudAfrique : elle est sous-estimée par tous les modèles sauf un (IPSL) par rapport à l'expérience de référence, tandis que la surface assignée aux autres régimes est sur-estimée.

Les différences à l'échelle régionale éclaircissent celles relevées à l'échelle du domaine global.

La forte sur-estimation de la surface assignée au régime 1 dans l'expérience IPSL Hist par rapport à l'expérience de référence s'explique par la sur-estimation de ce régime dans la région Australie. Celle-ci est également obtenue avec les expériences NORESM Hist et GFDL Hist, mais la sous-estimation de ce régime dans la région SudAfrique opère une compensation qui masque ces disparités dans l'estimation globale de ce régime. Dans le cas de l'Australie, cette sur-estimation correspond à la sur-estimation globale de la surface tropicale semi-aride (figure 4.2). Dans le cas de la région SudAfrique, en revanche, à la sous-estimation de la surface assignée au régime 1 pour trois modèles correspond une sur-estimation des autres régimes : le domaine tropical semi-aride est bien identifié (figure 4.2), mais la répartition entre régimes est différente de l'expérience de référence (figure 4.9).

Par ailleurs, l'écart relatif à l'échelle globale par rapport à la surface de référence était le plus important pour le régime 2 avec les expériences MIROC Hist et NORESM Hist (tableau 4.8). La sur-estimation de cette surface pour ces deux modèles est constatée dans les régions SudAfrique, EstAfrique, Australie et, plus faiblement, NordAmérique.

Ces variations à l'échelle régionale signalent des différences de délimitation du domaine tropical semi-aride, dont il était déjà question au chapitre 2. Pour les expériences du chapitre 4, ce cas apparaît particulièrement pour la surestimation du régime 1 dans les régions Australie, NordAmérique et EstAfrique (figure 4.9), en bordure de régions très arides dans l'expérience de référence (comparaison des figure 4.6 et A22, en annexe, et de la carte obtenue pour l'expérience de référence au chapitre 3, figure 3.15). Inversement, la sous-estimation de ce régime dans la région EstBresil par les expériences MIROC et GFDL est induite par l'exclusion de surfaces tropicales semi-arides selon l'expérience de référence, classées tropicales subhumides dans ces expériences. Dans la région SudAfrique, les deux types d'échange sont représentés : avec la classe plus aride au sud-ouest, avec les classes plus humides au nord. Dans les autres régions sont aussi observées de telles différences de délimitation du domaine tropical semi-aride, mais de manière visuellement moins caractéristique.

► **Les variations à l'échelle régionale expliquent certaines différences constatées à l'échelle globale, mais elles se compensent dans d'autres cas, de sorte que l'accord entre les modèles à l'échelle globale ne permet pas de conclure à un accord à l'échelle régionale.**

4.1.2.3 Comparaison des caractéristiques climatiques

Les liens entre les régimes de productivité et les caractéristiques climatiques, analysés ici seulement en termes de rapport P/EP , sont proches entre les modèles. Comme avec l'expérience de référence, les cinq régimes montrent des pics différenciés et ordonnés des valeurs les plus arides pour le régime 1 vers les plus humides pour le régime 5 (figure 4.10 et figure A24 en annexe, où les expériences à partir de modèles sont représentées en trait plein).

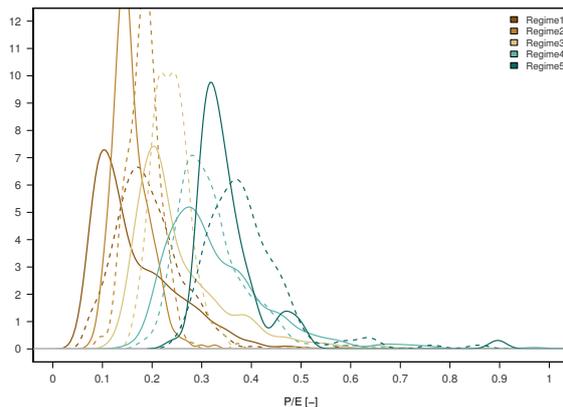


FIGURE 4.10 – *Distribution des valeurs de P/EP selon les régimes, pour l'expérience de référence (trait pointillé) et l'expérience IPSL Hist (trait plein), pour la période historique.*

Un décalage avec l'expérience de référence (en trait pointillé sur la figure) apparaît néanmoins dans les résultats de trois modèles (IPSL, MIROC et NORESM). Ce décalage est manifeste pour les régimes 1 à 3, moindre pour les régimes 4 et 5. Ces résultats sont cohérents avec l'observation faite plus haut, à propos de la distribution des précipitations annuelles des sorties de modèles, globalement moins élevées que dans les observations (figure 4.4).

Le modèle GFDL fait exception et montre des distributions de précipitations et de rapport P/EP plus proches de celles de l'expérience de référence. Un élément d'explication en est la plus faible surface assignée au régime 1 dans les régions Australie et SudAfrique pour ce modèle (figure 4.9), où une grande partie des zones classées très arides selon ce modèle appartiennent au régime 1 du domaine tropical semi-aride dans les résultats des autres modèles (figure A22) : cela suggère que ces régions sont à la limite aride du domaine, et donc influencent la distribution de l'indice d'aridité dans les modèles incluant ces surfaces.

► La répartition des régimes de productivité obtenue pour le début du 21^e siècle à partir des sorties de modèles est équivalente à celle de l'expérience de référence : le régime 1, le plus défavorable, est largement prépondérant, tandis que le régime 5 est minoritaire. Parmi les régimes intermédiaires, le régime 4, assez favorable, est le plus représenté. Ce bon accord à l'échelle globale masque cependant des disparités régionales. Une explication en est la différence dans la délimitation du domaine tropical semi-aride, dans toutes les régions, mais principalement pour Australie et EstBresil. Enfin, dans trois expériences sur quatre, les régimes 1 à 3 exhibent des conditions plus arides (rapport P/EP) que dans l'expérience de référence.

➔ La comparaison des expériences réalisées avec différents jeux de données climatiques issues de modèles et d'observations, tout en validant la relative homogénéité des

distributions des niveaux de productivité de chaque régime, manifeste des variations dans la répartition des régimes au sein du domaine tropical semi-aride. Celles-ci traduisent les différences entre les données climatiques utilisées. Dans la suite, les expériences analogues pour la période future vont être analysées en termes de caractérisation du futur domaine tropical semi-aride, en tenant compte de cette variabilité inter-modèle, puis en termes d'évolution du potentiel arboré calculée pour chaque modèle.

4.2 Redistribution des régimes de productivité dans le domaine tropical semi-aride à la fin du 21^e siècle

4.2.1 Evolution globale des régimes dans le domaine tropical semi-aride

Vers un domaine tropical semi-aride élargi

Les résultats du chapitre 2 indiquaient que le domaine tropical semi-aride était appelé à s'élargir dans le futur, particulièrement en-dehors de la ceinture tropicale, selon les trois scénarios climatiques étudiés. Les sorties de modèles corrigées utilisées ici pour un scénario (RCP 8.5) sont en accord avec ces résultats. En moyenne, l'augmentation de surface de ce domaine est de 2552 milliers de km², comprise entre 7 et 43% pour les quatre expériences (figure 4.11), ce qui se situe dans la gamme de valeurs donnée au chapitre 2 (2417 à 3307 milliers de km²).

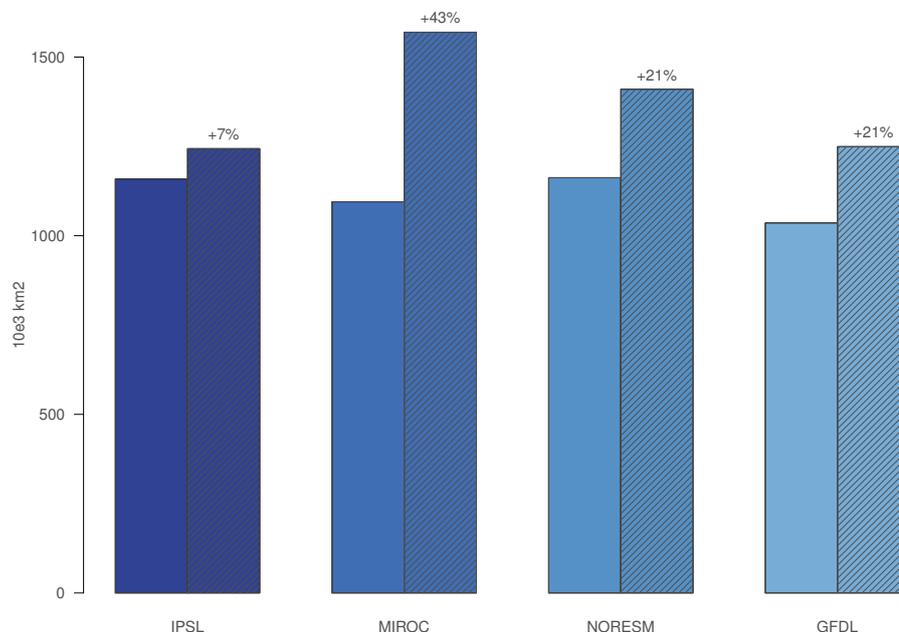


FIGURE 4.11 – *Evolution de la surface totale tropicale semi-aride entre les périodes historique et future. Valeur en milliers de km² obtenue pour les conditions climatiques issues des sorties de modèles, pour les périodes historique et future, selon le RCP 8.5. La valeur de l'augmentation relative de surface est indiquée pour chaque modèle, en %.*

Vers une redistribution des régimes de productivité

L'application de la typologie aux résultats des expériences montre que les traits caractéristiques de la répartition des régimes dans la période historique ne sont pas transposés dans la période future. En effet, le régime 1, prépondérant dans la période historique (45% du domaine en moyenne), ne représente plus que 25%, en moyenne sur les expériences,

de la surface totale du domaine (figure 4.12). Cette diminution n'est pas que relative, puisque la surface absolue assignée à ce régime diminue également de 1613 milliers km² en moyenne de la période historique à la période future (tableau 4.4).

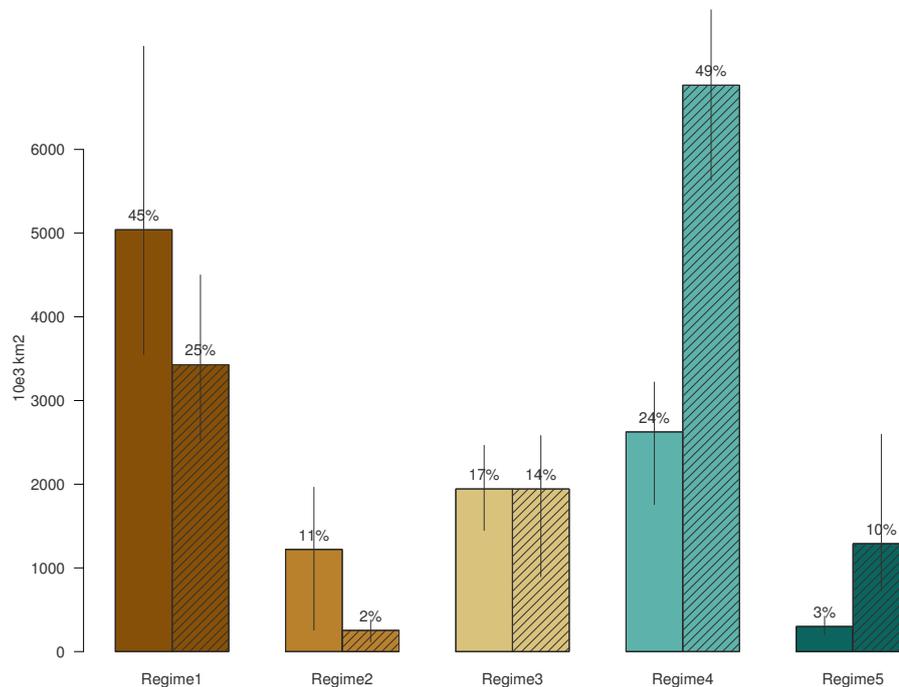


FIGURE 4.12 – *Surface assignée à chaque régime de productivité.* Valeur en milliers de km² en moyenne pour les sorties de modèles pour les périodes historique (plein) et future (hachuré). Les étiquettes indiquent la surface en % de la surface du domaine TSA total. Les segments verticaux représentent la dispersion entre les modèles (minimum et maximum).

	IPSL	MIROC	NORESM	GFDL
Regime1	3911	2793	4500	2508
Regime2	233	378	287	117
Regime3	1940	2358	2581	894
Regime4	5627	9076	5988	6379
Regime5	727	1091	745	2596

TABLE 4.3 – *Surface totale assignée à chaque régime de productivité pour la période future, en milliers de km².*

Au contraire, le régime 4 connaît une forte augmentation de surface, et devient prépondérant, représentant en moyenne 49% du domaine tropical semi-aride. Il occupe en moyenne 6768 milliers de km² dans le futur, soit 4143 milliers de km² de plus qu'à la période historique en moyenne. Les régimes 2 et 5 voient leurs surfaces absolue et relative diminuer et augmenter respectivement, de manière considérable pour certains modèles. Toutes les expériences convergent sur le sens des changements subis par tous les régimes (tableau 4.4), à l'exception du régime 3 pour lequel un modèle (GFDL) est le seul à montrer une diminution de surface. L'augmentation de la surface des régimes 4 et 5 et la diminution de celle des régimes 1 et 2 peut donc être considérée comme un résultat

	IPSL	MIROC	NORESM	GFDL	Moyenne
Regime1	-3322 (-46%)	-758 (-21%)	6 (0%)	-2379 (-49%)	-1613
Regime2	-705 (-75%)	-1587 (-81%)	-1437 (-83%)	-139 (-54%)	-967
Regime3	492 (34%)	67 (3%)	116 (5%)	-677 (-43%)	0
Regime4	3870 (220%)	6131 (208%)	3411 (132%)	3159 (98%)	4143
Regime5	513(240%)	892 (448%)	380 (104%)	2173 (514%)	990

TABLE 4.4 – *Différence de surface totale assignée à chaque régime de productivité entre les périodes future et historique, en milliers de km². Le changement relatif est indiqué entre parenthèses, en % de la surface historique.*

robuste de ces expériences.

En moyenne, ces conclusions sont retrouvées à l'échelle régionale : la surface assignée aux régimes 4 et 5 augmente en moyenne sur les expériences (figure 4.13), dans toutes les régions, tandis que celle assignée au régime 2 diminue ou reste stable, dans toutes les régions, allant presque jusqu'à disparaître. Ce bilan régional est moins clair pour les régimes 3 et 1. Pour le régime 3, la surface diminue en moyenne sauf pour les trois régions Inde, Méditerranée et NordAmérique. La surface assignée au régime 1 diminue dans cinq régions sur neuf. Cette diminution est particulièrement forte en Australie, et ramène la surface occupée par le régime 1 dans une proportion comparable à celle des autres régions. Cette réduction massive de la surface du régime 1 en Australie explique la diminution de la surface de ce régime à l'échelle globale, en dépit des variations régionales. Cette surface augmente, en effet, dans les régions NordAmérique, EstAndes, EstBresil et Méditerranée.

Enfin, ainsi que le montrent les cartes de répartition de ces régimes (figure 4.14 et figure A23 en annexe), le domaine tropical semi-aride s'élargit à des régions qui n'étaient pas incluses à la période historique : notamment le plateau centre-eurasien, le nord du Vénézuéla et le nord du bassin méditerranéen. Les régimes majoritairement identifiés dans ces nouvelles régions sont les régimes 1 et 4, respectivement.

► L'élargissement du domaine tropical semi-aride d'ici la fin du 21^e siècle selon le RCP 8.5 s'accompagne d'une redistribution des régimes de productivité au sein de cette enveloppe. Le trait le plus remarquable en est l'inversion de l'importance respective des régimes 1 et 4, au profit de ce dernier. Cette augmentation de la surface assignée au régime 4 se manifeste au sein de toutes les régions du domaine tropical semi-aride. L'implication attendue est une augmentation de productivité arborée : elle sera étudiée dans la section 4.3.

→ Les surfaces qui composent le domaine tropical semi-aride du début du 21^e siècle connaissent trois sortes d'évolution : soit les conditions climatiques sont très altérées, dans le sens d'une aridification conduisant à un changement de classe climatique (vers la classe très aride), soit les conditions climatiques deviennent moins arides, conduisant à un reclassement dans le groupe tropical subhumide, soit les conditions climatiques ne sont pas suffisamment altérées pour induire un changement de classe climatique. Dans ce troisième cas, la surface reste classée tropicale semi-aride, mais elle peut encore subir un changement de régime de productivité au sein de ce régime.

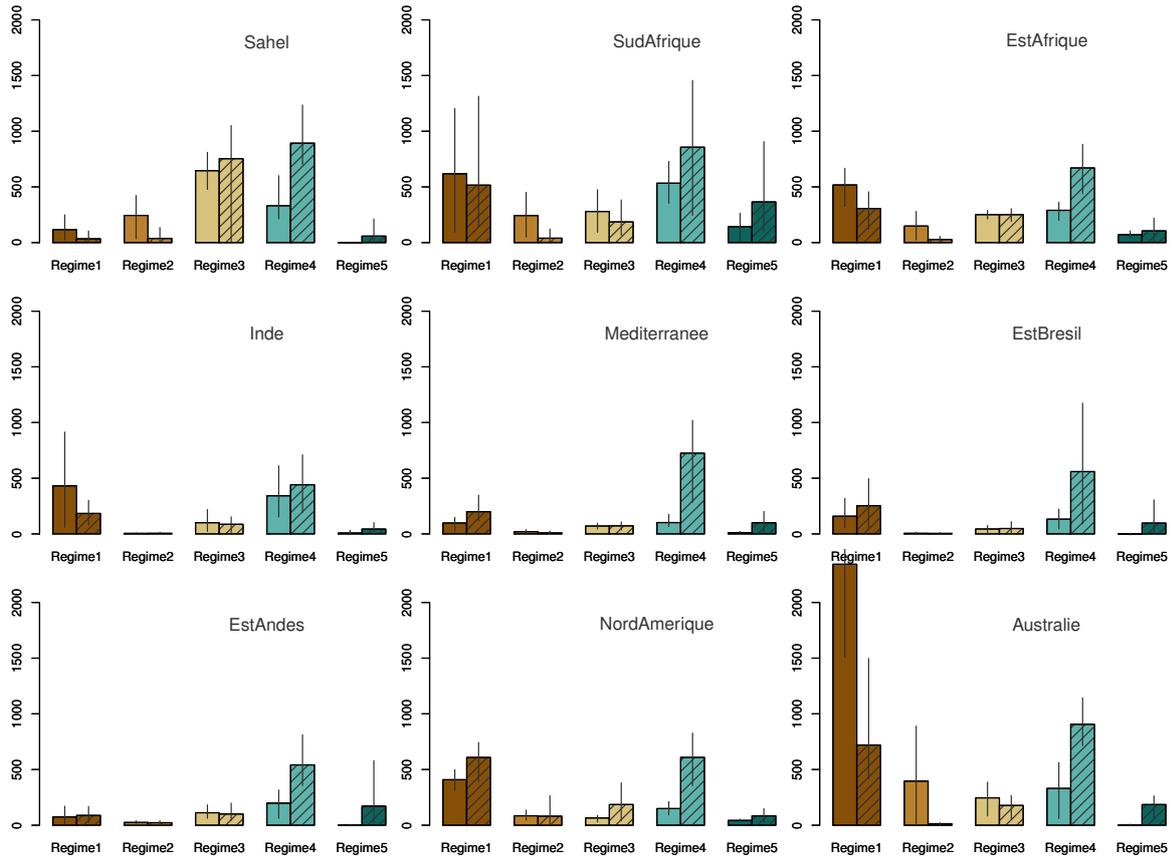


FIGURE 4.13 – *Surface régionale assignée à chaque régime de productivité. Valeur en milliers de km² en moyenne pour les sorties de modèles pour les périodes historique (plein) et future (hâché). Les segments verticaux indiquent la dispersion entre les expériences (minimum et maximum).*

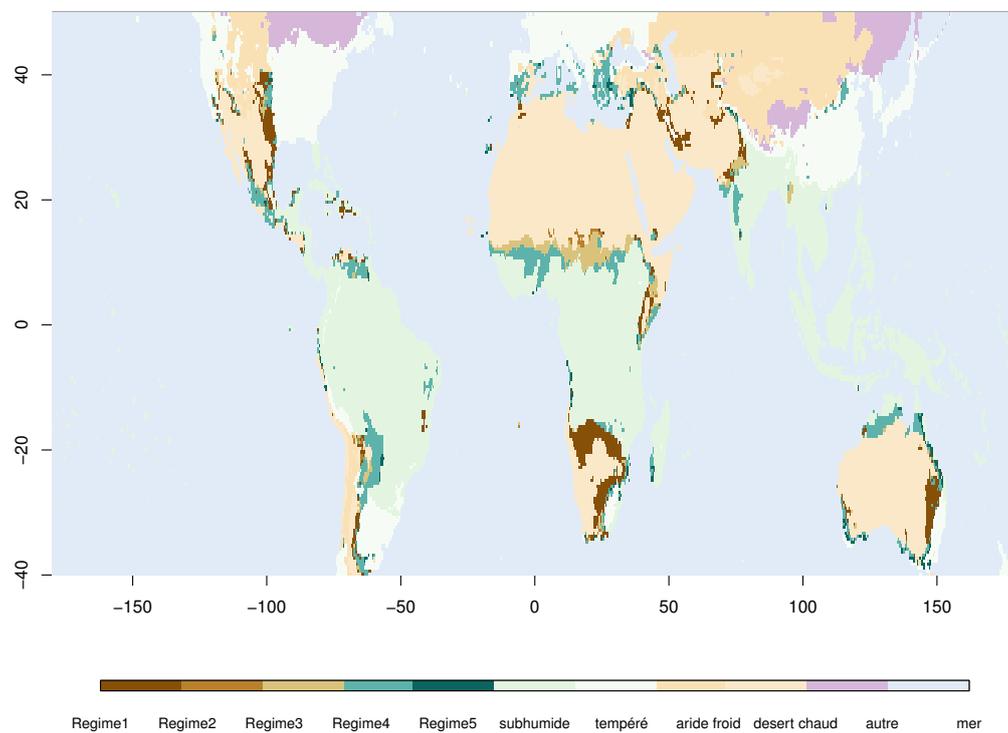


FIGURE 4.14 – Répartition des régimes de productivité identifiés pour la période future pour l'expérience IPSL fut. Figure à comparer avec la figure 4.6 pour la période historique.

4.2.2 Analyse prospective au sein du domaine tropical semi-aride de la période historique

Dans un premier temps, on étudie l'évolution des régimes de productivité au sein du domaine classé tropical semi-aride à la période historique. La moitié de ce domaine reste classé tropical semi-aride dans le futur (37 à 60% sur l'ensemble des modèles), tandis que 12% en moyenne change de classe et évolue vers des classes plus humides (équatoriales sub-humides en quasi-totalité) et 38% vers la classe très aride chaude (figure 4.15). Ceci correspond aux ordres de grandeur des résultats analogues présentés au chapitre 2 (tableau 2.7).

Sortie du domaine tropical semi-aride

L'évolution vers les classes plus humides est principalement alimentée par les régimes 3 à 5, qui sont à la fois les plus favorables¹ à l'entretien d'un couvert arboré dense (figure 4.5) et les moins arides (figure 4.10) ; celle vers la classe très aride par les régimes 1 et 2, les plus défavorables et les plus arides. Le sens de ces évolutions correspond donc à une intensification des conditions plus ou moins arides aux limites climatiques du domaine tropical semi-aride.

La transformation d'une partie du domaine tropical semi-aride vers la classe très aride se produit massivement dans la région Australie (figure 4.16 et figure A32 en annexe), ce qui contribue à expliquer la diminution de surface assignée au régime 1 dans cette région entre les deux périodes (figure 4.13). Les autres régions concernées par cette transformation fluctuent entre les modèles. D'ampleur variable, on la retrouve pourtant de manière consensuelle dans les régions Méditerranée, SudAfrique et NordAmérique (figure A32 en annexe).

La transformation vers les classes plus humides se produit de façon plus hétérogène encore entre les modèles. Elle se retrouve principalement dans les régions EstBresil et Inde pour le modèle IPSL (figure 4.16), pour les régions Sahel et EstAfrique pour le modèle MIROC, Inde et Australie pour le modèle NORESM, enfin de façon plus dispersée pour le modèle GFDL (figure A32 en annexe).

Ces différences entre les modèles sont en partie issues des différences dans la délimitation et la partition entre les régimes déjà constatées pour la période historique. En effet, en ce qui concerne la région EstBresil, le modèle IPSL est le seul à lui allouer une surface tropicale semi-aride importante pour la période historique (figure A20 en annexe), ce qui explique qu'il soit également le seul à pouvoir témoigner de changements importants au sein de ce domaine². Un argument du même ordre peut être avancé pour la région Australie, pour laquelle le modèle GFDL classe déjà la majeure partie de sa surface comme très aride pour la période historique. Le cas de la région Sahel montrant une forte évolution vers la classe équatoriale subhumide avec le modèle MIROC peut être expliqué par la déformation vers le nord de la zone tropicale semi-aride dans le futur (figures A20 et

1. comme expliqué au chapitre 3, les régimes 1 à 5 sont de plus en plus favorables à l'entretien d'un couvert arboré dense, du point de vue du potentiel climatique : les régimes 3 à 5 ont le potentiel climatique de supporter une forte densité arborée sans que le niveau de développement des arbres devienne négligeable, contrairement aux régimes 1 et 2, pour lesquels les densités arborées les plus élevées ne peuvent pas être maintenues.

2. sans pour autant expliquer le sens de cette transformation, surtout quand on constate que ce sens est opposé à celui des autres modèles, qui montrent une aridification de cette région dans le futur

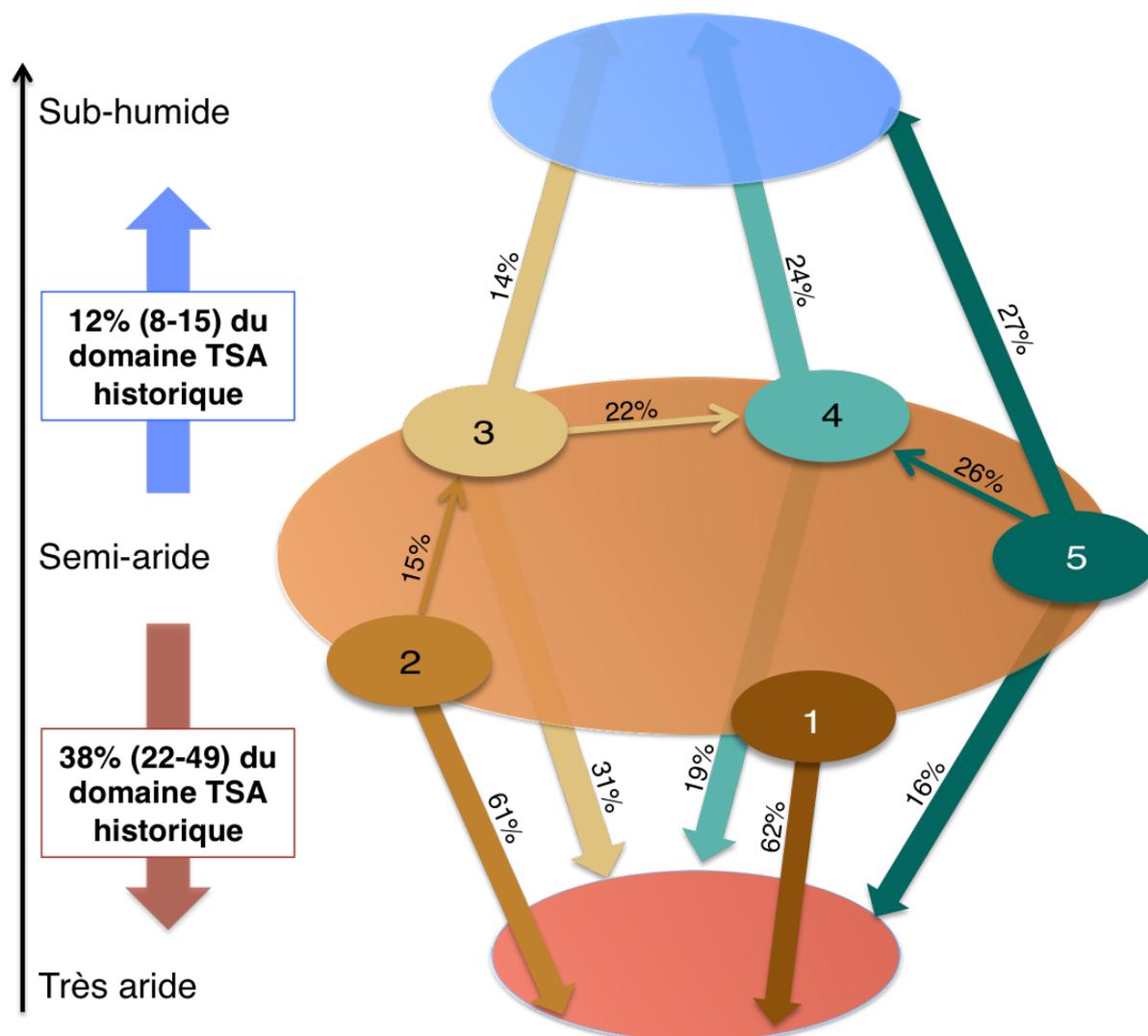


FIGURE 4.15 – *Transformations majoritaires subies par le domaine tropical semi-aride historique projeté dans la période future. Les flèches indiquent les surfaces relatives (en % de la surface assignée au régime dans la période historique) impliquées à raison de plus de 10% dans ces transformations. Les résultats sont donnés en moyenne sur l'ensemble des modèles ; dans les encadrés, les minimum et maximum sont indiqués entre parenthèses.*

	Très aride	régime 1	régime 2	régime 3	régime 4	régime 5	Humide
régime 1	62% (1)	15% (5)	1% (1)	5% (2)	9% (5)	1% (0)	8% (5)
régime 2	61% (12)	7% (3)	6% (4)	15% (12)	7% (3)	0% (0)	4% (4)
régime 3	31% (6)	6% (1)	1% (1)	25% (17)	22% (6)	1% (0)	14% (6)
régime 4	19% (0)	9% (6)	0% (0)	7% (3)	37% (19)	3% (0)	24% (10)
régime 5	16% (2)	3% (5)	0% (0)	1% (0)	26% (7)	26% (21)	27% (22)

TABLE 4.5 – *Evolution du domaine tropical semi-aride historique (TSA), en pourcentage de la surface assignée à chaque régime à la période historique. Pour chaque régime du domaine historique (lignes), la proportion (%) de surface concernée par les différentes assignations futures (colonnes) est donnée en moyenne sur l'ensemble des modèles (écart-type entre parenthèses). Les colonnes en blanc indiquent les transformations internes au domaine tropical semi-aride. En marron sont de plus repérées les surfaces ne subissant pas de changement de régime. Les colonnes rouge et bleu clair signalent les changements de classe climatique dans le futur, respectivement vers les classes très aride et équatoriales subhumides.*

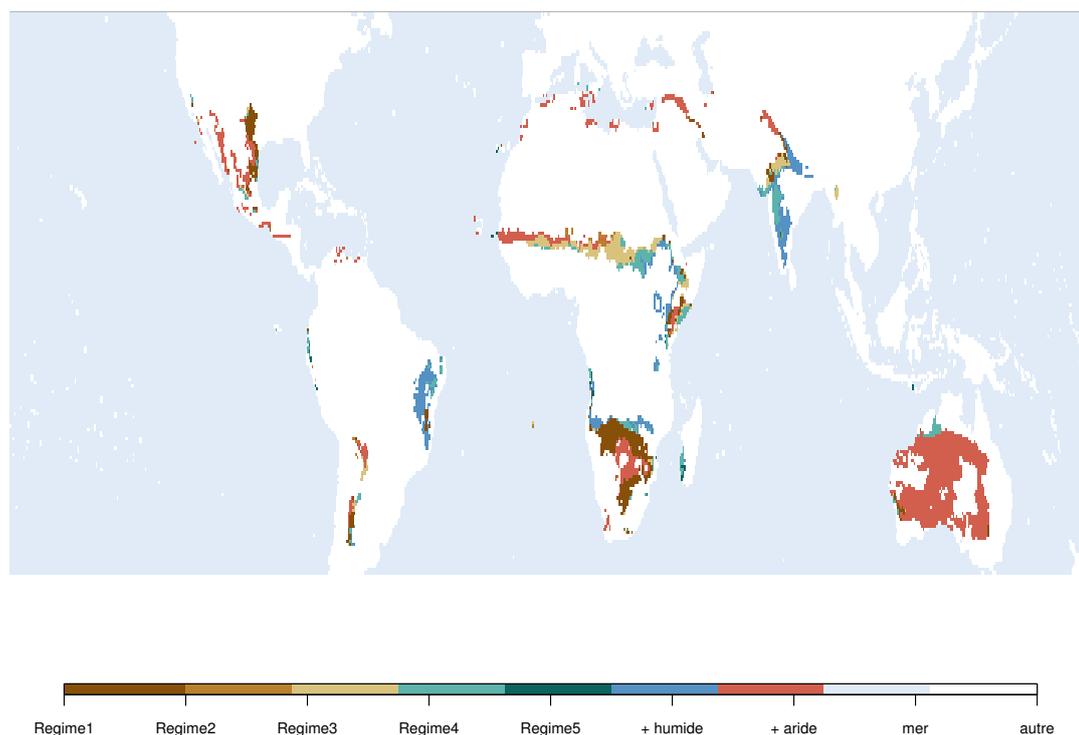


FIGURE 4.16 – *Distribution des régimes de productivité pour la période future dans les régions du domaine tropical semi-aride historique, pour le modèle IPSL.*

A21). L'augmentation des précipitations dans la région sahélienne avec ce modèle a été expliquée par la simulation d'un réchauffement plus intense de la température à la surface des océans (SST) dans la zone extra-tropicale de l'hémisphère Nord (Park *et al.*, 2015).

Redistribution au sein du domaine tropical semi-aride stable

Au sein du domaine demeurant tropical semi-aride dans la période future, on assiste à une redistribution entre les différents régimes. Les régimes 1 et 2, qui évoluent majoritairement vers la classe très aride, participent peu à cette redistribution. La surface assignée au régime 1 tend à le rester (tableau 4.5). Celle assignée au régime 2 et demeurant tropicale semi-aride évolue majoritairement vers le régime 3, et dans une moindre mesure vers les régimes 1 et 4. Seulement 6% de sa surface initiale demeure assignée à ce régime, conduisant à sa quasi-disparition déjà mentionnée (figure 4.13).

Plus de la moitié des surfaces assignées aux régimes 3 à 5 demeure tropicale semi-aride dans le futur. Au sein de ce domaine resté stable, le régime 4 joue le rôle d'attracteur pour les régimes 3 et 5 (figure 4.15) : respectivement 22% et 26% en moyenne de leurs surfaces historiques convergent en effet vers ce régime. Celui-ci conserve de plus 37% de sa surface en moyenne (tableau 4.5). L'écart-type de ces valeurs (entre parenthèses dans le tableau 4.5) signale cependant une forte disparité (du même ordre que la valeur moyenne) entre les modèles pour l'évolution des régimes 4 et 5.

Dans le climat futur, le régime 4 hérité du domaine historique (soit directement, soit par transition depuis un autre régime) occupe principalement les régions Inde, Sahel,

EstAfrique et EstAndes (figure A32 en annexe), tout en montrant une forte variabilité entre les modèles.

► La moitié environ du domaine tropical semi-aride historique évolue vers les classes climatiques plus arides (38% du domaine) et plus humides (12%) dans le futur, selon le RCP 8.5. L'autre moitié du domaine subit une redistribution des régimes de productivité en faveur du régime 4.

4.2.3 Analyse rétrospective pour les régions *devenues* tropicales semi-arides dans le futur

On s'intéresse à présent aux régions classées tropicales semi-arides dans la période future et qui appartenaient à une autre classe climatique dans la période historique. Le futur domaine tropical semi-aride n'est en effet composé qu'en minorité de surfaces héritées du domaine historique. Il compte 50-70% (sur l'ensemble des modèles) de régions nouvellement converties à cette classe climatique. Ces nouvelles surfaces apparaissent dans chacune des régions examinées jusqu'ici, ainsi que dans le bassin caribéen (figure 4.17 et figure A33 en annexe). Elles sont majoritairement assignées au régime 4 (50% en moyenne) et au régime 1 (26% en moyenne, figure 4.18).

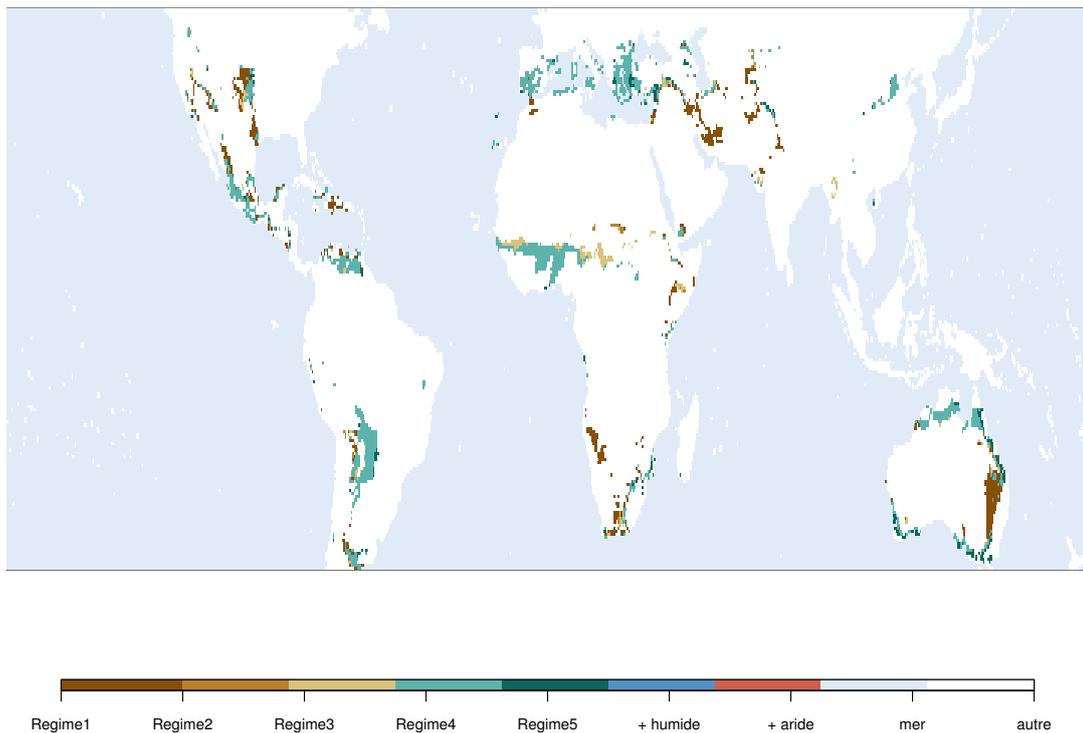


FIGURE 4.17 – *Distribution des régimes de productivité pour la période future dans les régions non héritées domaine tropical semi-aride historique, pour le modèle de l'IPSL.*

Les nouvelles régions tropicales semi-arides sont héritées, pour 53 à 77% d'entre elles (sur l'ensemble des modèles), de la transition depuis les classes subhumides, et pour les

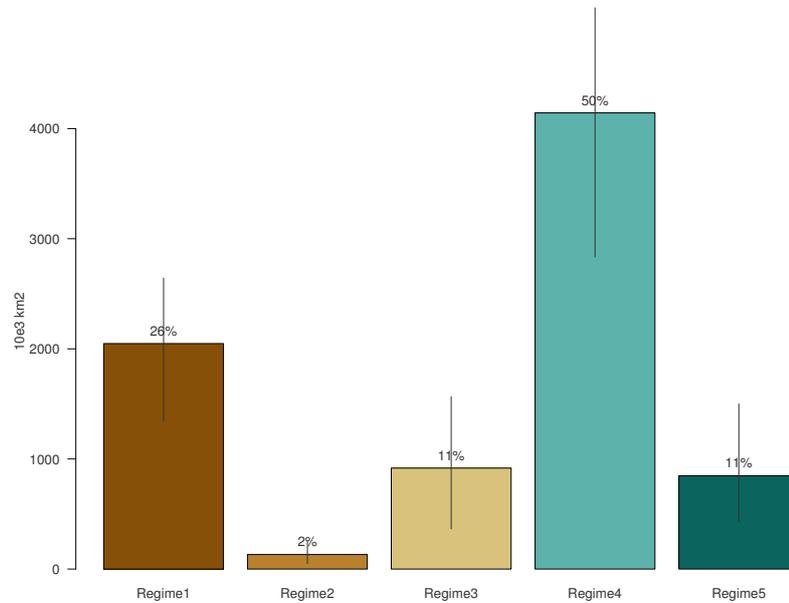


FIGURE 4.18 – *Distribution des régimes de productivité pour la période future dans les régions non héritées domaine tropical semi-aride historique. Valeurs de surface moyennes sur l'ensemble des expériences, en milliers de km². La proportion du domaine tropical semi-aride total de chaque régime est indiquée en % au-dessus des barres du graphique.*

autres d'une classe aride - soit très aride, soit semi-aride froide. Les classes plus humides dont sont héritées plus de la moitié de ces nouvelles zones sont les classes tropicales sub-humides (pour 47 à 64%, sur l'ensemble des expériences) et tempérées chaudes (36 à 53%). Les classes arides d'où sont issues l'autre partie de ces nouvelles zones sont les classes très aride chaude (32 à 42%), et semi-aride froide (53 à 62%). De manière générale, les classes tropicales subhumides et celles très arides chaudes alimentent plutôt les nouvelles surfaces TSA dans les régions tropicales, tandis que les autres concernent plutôt les latitudes tempérées (comme cela avait été démontré au chapitre 2, figure 2.25).

Les figures 4.17 et A33 (en annexe) permettent d'identifier les types de transition dans chaque région. Malgré une certaine variabilité entre les expériences, les surfaces héritées de classes plus humides sont en moyenne majoritairement assignées au régime 4 dans le futur (63%), tandis que celles héritées de classes arides sont majoritairement dirigées vers le régime 1 (46% en moyenne, tableau 4.6). Une certaine dispersion entre les régimes est observée, particulièrement pour les surfaces héritées des classes arides, expliquée vraisemblablement par l'origine déjà semi-aride (BSk, tableau 4.6) de certaines surfaces et assimilées au domaine domaine tropical semi-aride sous l'effet du réchauffement.

► Le domaine tropical futur est composé en majorité (50-70%) de surfaces qui appartiennent à des classes climatiques différentes dans la période historique. Parmi celles-ci, la majorité est issue de classes plus humides qui sont assignées au régime 4 en rejoignant le domaine tropical semi-aride dans la période future. Moins nombreuses, les surfaces héritées de classes arides sont principalement assignées au régime 1. Le régime 4 est donc majoritairement représenté parmi ces nouvelles régions tropicales semi-arides, suivi par le régime 1.

		régime 1	régime 2	régime 3	régime 4	régime 5
ex-Humide	ex-A	14% (10)	0% (1)	6% (5)	66% (12)	13% (12)
	ex-C	21% (7)	0% (0)	5% (2)	59% (10)	15% (5)
	<i>total</i>	<i>17% (4)</i>	<i>0% (0)</i>	<i>5% (2)</i>	<i>63% (7)</i>	<i>15% (9)</i>
ex-Aride	ex-BWh	45% (25)	5% (4)	32% (23)	18% (12)	0% (0)
	ex-BWk	85% (9)	3% (3)	9% (6)	2% (3)	0% (0)
	ex-BSk	43% (6)	5% (2)	16% (4)	32% (5)	5% (5)
	<i>total</i>	<i>46% (13)</i>	<i>4% (2)</i>	<i>22% (11)</i>	<i>25% (6)</i>	<i>3% (3)</i>

TABLE 4.6 – *Proportion de surface tropicale semi-aride future, non-héritée du domaine historique, assignée à chaque régime. Les valeurs sont exprimées en proportion de la surface tropicale semi-aride totale héritée d'une classe climatique donnée (ou d'un groupe) : groupe des classes équatoriales subhumide (ex-A), groupe des classes tempérées chaudes (ex-C) (ex-Humide), classe très aride chaude (ex-BWh), classe très aride froide (ex-BWk) et classe semi-aride froide (ex-BSk). Les résultats sont donnés en moyenne sur les expériences. L'écart-type de la dispersion entre les expériences est indiqué entre parenthèses (en %). Les lignes en italiques donnent les valeurs obtenues pour l'ensemble des classes humides (ex-Humide) et pour l'ensemble des classes arides (ex-Aride) devenues tropicales semi-arides.*

→ Dans le domaine tropical semi-aride de la période future, le régime 4 devient prépondérant, à la fois par redistribution des régimes au sein du domaine tropical semi-aride historique et par addition de nouvelles régions semi-arides majoritairement assignées à ce régime. Nous analysons dans la suite les implications en termes de potentiel arboré.

4.3 Evolution du potentiel arboré entre le début et la fin du 21e siècle

4.3.1 Augmentation globale du niveau de productivité

Comme dans la section 4.1 (figure 4.3), les distributions des valeurs de NPP annuelle maximale sur l'ensemble du gradient de fraction arborée sont représentées pour l'ensemble du domaine tropical semi-aride. La figure 4.19 représente ces distributions pour chaque modèle et pour chacune des deux périodes de temps étudiées.

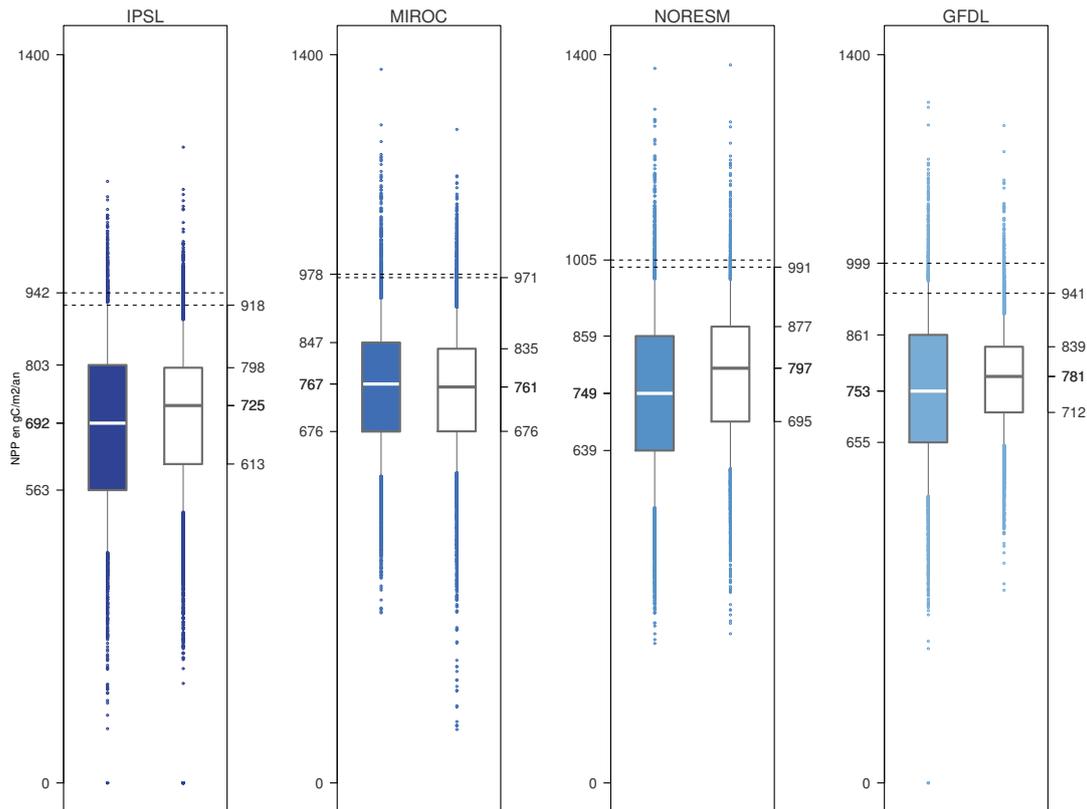


FIGURE 4.19 – *Distribution des valeurs de NPP individuelle maximale sur l'ensemble du domaine tropical semi-aride pour les périodes historique et future. En ordonnées sont représentées les valeurs de NPP en $gC/m^2/an$, à gauche pour la période historique, à droite pour la période future. Pour chaque expérience, la période historique est figurée en couleur, tandis que celle future est en blanc.*

Les distributions de ces maxima sont très proches entre les sorties de modèles pour les périodes historique et future, sans être tout à fait identiques (figure 4.19) : elles se resserrent vers le haut des distributions historiques pour trois modèles (IPSL, NORESM et GFDL), en montrant une légère augmentation de la valeur médiane et du quantile 1, sans cependant que les valeurs extrêmes les plus hautes augmentent. Au contraire même, la valeur du pourcentage 95% diminue légèrement. Pour le quatrième modèle (MIROC), la distribution ne varie presque pas entre les périodes historique et futur, si ce n'est par un élargissement vers le bas de la queue de la distribution.

Si ces valeurs maximales de productivité ne sont que légèrement augmentées dans la

période future, les profils de productivité en fonction de la fraction arborée sont en revanche très altérés entre les périodes historique et future. Ainsi, sur l'exemple d'un modèle (IPSL), la figure 4.20, les aplats de couleur grise représentent l'enveloppe de valeurs de productivité (quantiles 1 et 3) individuelle des arbres (à droite) et totale du peuplement (à gauche), obtenues pour chaque fraction arborée. L'enveloppe de pointillés gris, qui correspond à la période future, montre clairement un déplacement de cette enveloppe vers des niveaux de productivité plus élevés pour toutes les fractions arborées par rapport à la période historique. Les maxima des valeurs de productivité individuelle des arbres (graphique de droite) sont toujours obtenus pour la fraction 10%, où la dispersion des valeurs est la plus faible. C'est également pour cette fraction que l'écart entre les périodes historique et future est le moins important, ce qui est cohérent avec la figure 4.19. Ce que ne révélait pas cette dernière, c'est que les valeurs maximales (limite du troisième quantile sur cette figure) sont maintenues sur tout le gradient des fractions arborées, alors qu'elles étaient limitées aux plus petites fractions dans la période historique. En outre, la limite inférieure de cette enveloppe est déplacée vers le haut, pour la plupart des fractions arborées, et vers la gauche jusqu'à la fraction 90%. Ceci indique que la fraction permettant de maintenir des couverts arborés plus denses augmente dans le domaine tropical semi-aride futur.

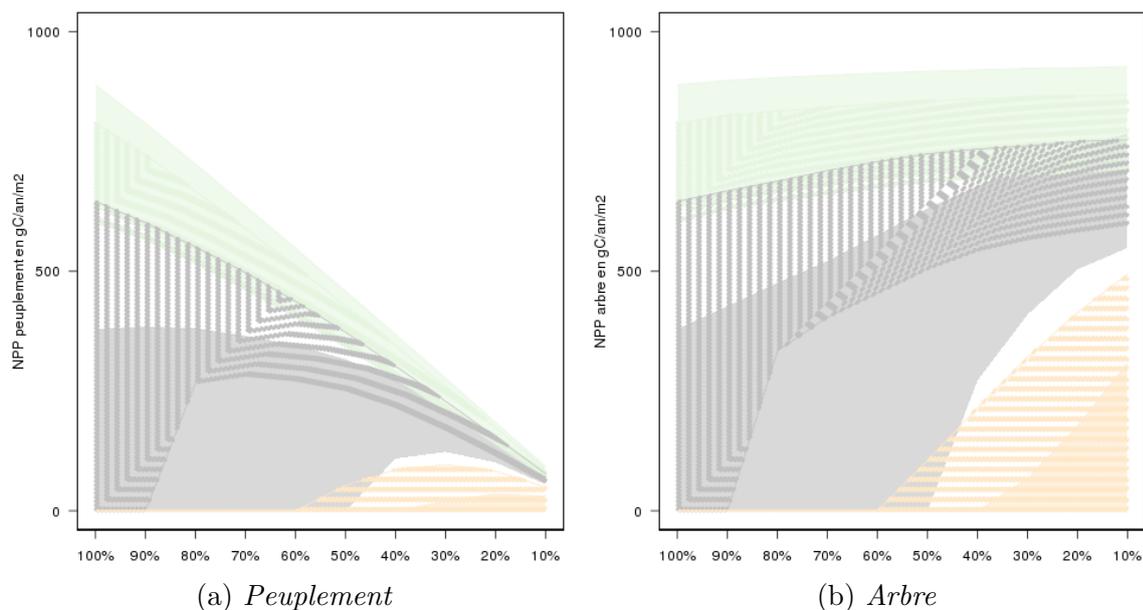


FIGURE 4.20 – *Intervalles de valeurs de NPP pour les périodes historique (plein) et future (pointillé)*. Enveloppes des premier et troisième quantiles des distributions, sur l'ensemble des points assignés à une classe climatique, des moyennes interannuelles de sommes annuelles de productivité primaire nette en gC/m^2 , pour chaque fraction arborée. Vert : classe tropicale subhumide. Gris : classe semi-aride chaude (tous régimes confondus). Jaune : classe très aride chaude. Les abscisses sont orientées des plus petites fractions arborées, à droite, vers les plus grandes, à gauche.

D'autre part, sur la même figure sont représentées les enveloppes de valeurs de productivité obtenues pour les classes climatiques subhumides (en vert) et très aride (en jaune), ainsi que le déplacement de celles-ci dans la période future (pointillés). Leur présence permet de montrer que l'enveloppe du domaine tropical semi-aride continue à occuper

l'espace compris entre ces deux classes, comme à la période historique, mais en se rapprochant des classes subhumides dans le futur au point de commencer à chevaucher celles-ci. L'augmentation dans le futur des niveaux de productivité maximale et des fractions arborées associées pour la classe très aride montre que l'augmentation de productivité au sein des domaines climatiques présentant un certain niveau d'aridité est général, au moins pour les régions chaudes. Les profils de productivité totale du peuplement, corrélés à ceux de productivité individuelle des arbres, montrent des tendances analogues.

Les figures données en annexe (figure A31) montrent que l'ensemble des résultats présentés pour le modèle IPSL sont valables également pour les trois autres modèles. Cette augmentation des niveaux de productivité reflète la redistribution des régimes au sein du domaine tropical semi-aride, et l'inversion de l'importance relative des régimes 1 et 4, discutée dans la section précédente.

► L'expansion du domaine tropical semi-aride dans la période future s'accompagne d'une hausse générale du niveau de productivité des arbres, au sein de l'enveloppe des valeurs correspondant à l'enveloppe climatique du domaine étudié. Le déplacement de la distribution des niveaux de productivité vers des valeurs et des fractions arborées plus élevées est cohérent avec la redistribution des régimes au profit du régime 4, plus favorable.

→ Les régimes ont été construits de sorte que leurs potentiels arborés associés (intervalle de fractions arborées acceptables et de niveaux de productivité associé) soient ordonnés du plus bas, pour le régime 1, au plus élevé, pour le régime 5. Par conséquent, le passage d'un régime à l'autre devrait pouvoir être directement interprété en termes d'augmentation ou de diminution de potentiel arboré. Des nuances apparaissent cependant avec la comparaison des résultats des expériences historiques et futures, comme le montre la section suivante.

Une manière d'interpréter l'analyse des potentiels arborés en termes de recommandations pour les stratégies de reforestation consiste à fournir des cartes de distribution des régimes, auxquels sont associées des valeurs globales de potentiel arboré, pour chaque période. La comparaison des cartes permet d'analyser tous les types de changements possibles entre les 5 régimes entre eux et avec les classes plus humides et plus arides. Une interprétation plus synthétique est proposée ici, interprétant l'évolution du potentiel arboré entre les deux périodes. Plusieurs types de changements seront ainsi regroupés sous une même étiquette plus ou moins favorable. Pour construire une telle interprétation, il faut en premier lieu pouvoir associer à chaque type de changement une augmentation, une diminution ou une stagnation du potentiel arboré. La section suivante donne les clés d'interprétation des échanges entre régimes. L'interprétation finale est proposée en section 4.3.3.

4.3.2 Caractérisation de l'évolution du potentiel arboré selon les différents changements de régime ou de classe climatique

Interprétation des changements de régime

Les changements de régime se produisent au sein du domaine tropical semi-aride « stable », c'est-à-dire restant dans cette classe climatique dans les deux périodes, historique et future.

Si, par construction des régimes, les niveaux de productivité sont maintenus au sein des mêmes enveloppes de valeurs quelle que soit la configuration de l'expérience (choix des données climatiques et de la période étudiée), il n'en pas va de même pour l'intervalle des fractions arborées « acceptables », constituant le potentiel arboré. Dans le cas des régimes 4 et 5, cet intervalle couvre tout le gradient des fractions arborées, mais pour les régimes 1 à 3 sa longueur peut varier, modifiant ainsi le potentiel arboré. La figure 4.21 représente l'évolution de ces potentiels entre les périodes historique et future pour le modèle IPSL.

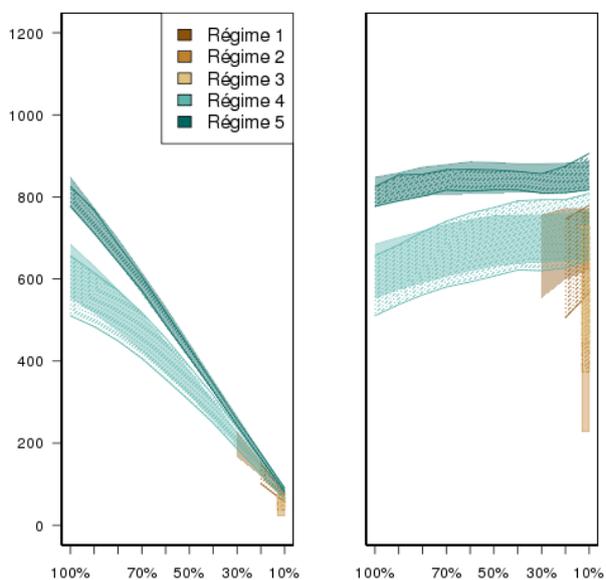


FIGURE 4.21 – *Comparaison des potentiels arborés historiques (plein) et futurs (pointillés) de chaque régime, pour le modèle IPSL. A gauche, productivité totale du peuplement, à droite, productivité des arbres. L'axe des ordonnées, exprimé en $gC/m^2/an$ est commun aux deux graphiques. Les fractions arborées, en abscisses, sont orientées de la droite (10%) vers la gauche (100%).*

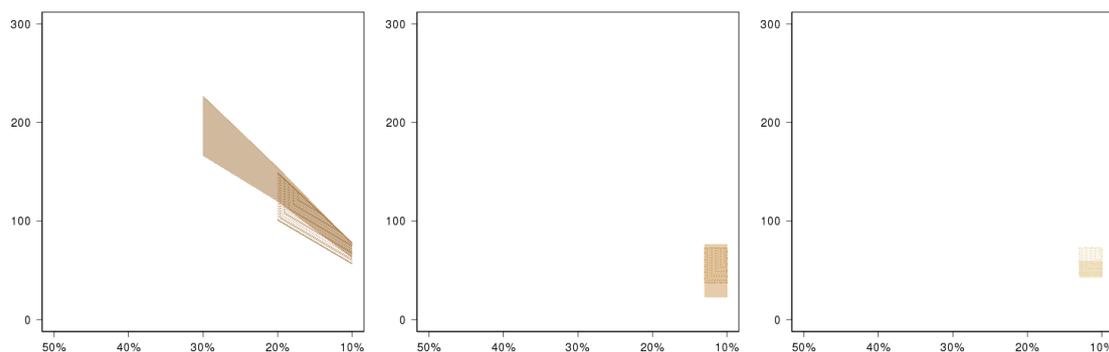


FIGURE 4.22 – *Zoom sur les régimes 1 à 3 (de gauche à droite), pour la NPP du peuplement, de la figure 4.21.*

Les régimes 4 et 5 occupent le même espace de productivité en fonction de la fraction arborée à l'échelle de l'arbre et du peuplement, sans que des changements flagrants soient

constatés entre les périodes historique et future.

L'expérience IPSL ne permet pas non plus de distinguer de différence entre les deux périodes pour les régimes 2 et 3 (la fraction arborée reste figée à 10%, figure 4.22). Pour le régime 1, en revanche, le potentiel arboré manifeste une régression dans le futur, passant de la fraction maximale 30% à 20%. Pour ces régimes 1 à 3, les modèles divergent sur le sens de l'évolution du potentiel arboré. Les résultats varient entre les expériences pour ces trois régimes.

► Les potentiels arborés demeurent stables dans le futur pour les régimes 4 et 5, mais des fluctuations du potentiel des régimes 1 à 3 peuvent survenir, sans qu'un sens clair de changement puisse être diagnostiqué.

→ Au sein de la classe semi-aride chaude, la caractérisation des régimes en termes de niveau de productivité est donc similaire dans les deux périodes. La caractérisation climatique des régimes change cependant, comme nous le verrons section 4.4.

Interprétation des changements de classe climatique

Le raisonnement diffère pour les nouvelles régions tropicales semi-arides, héritées des classes plus ou moins arides. En effet, la notion de potentiel arborée utilisée ici a été définie spécifiquement pour le domaine tropical semi-aride. Les surfaces classées subhumides ou très arides à la période historique n'ont pas de potentiel arboré formellement défini en ce sens. Néanmoins, cette notion n'est pas nécessaire pour interpréter le passage de conditions semi-arides à subhumides comme favorables en termes de potentiel climatique d'un couvert arboré, et inversement pour une transition vers une classe plus aride.

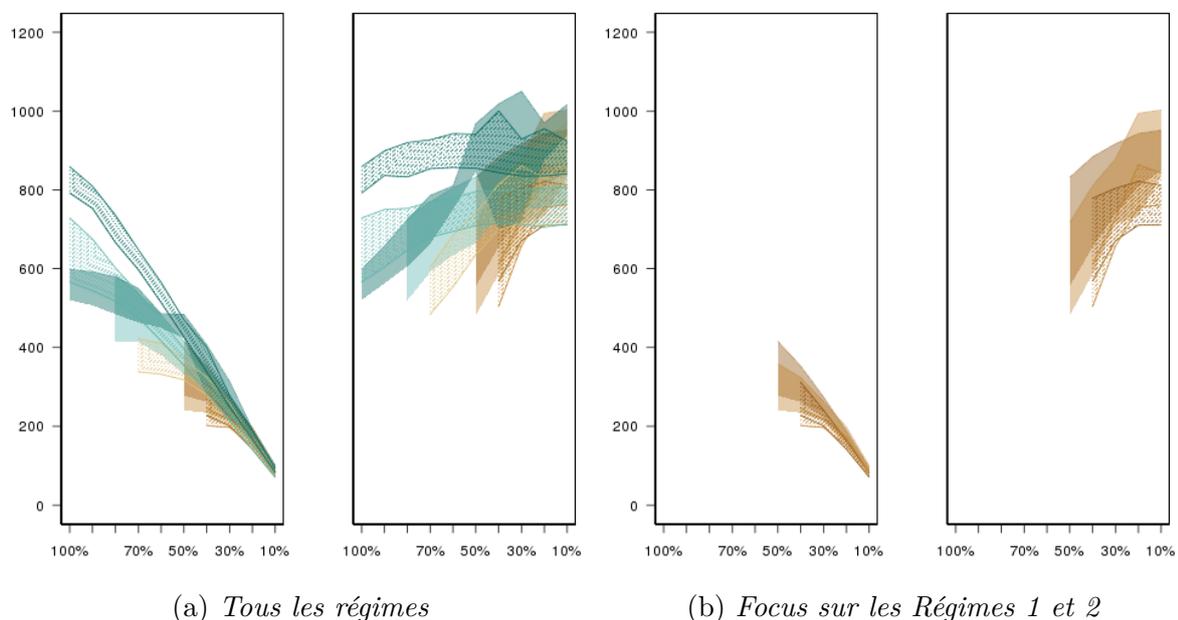


FIGURE 4.23 – *Potentiels arborés comparés pour les périodes historique (plein) et future (pointillé) des ex-surfaces semi-arides froides. Expérience IPSL*

Un cas cependant est moins immédiat : celui de la transition de la classe semi-aride froide vers le domaine tropical semi-aride. Cette transition est importante dans la région

du plateau centre-urasien notamment. Pour départager les différents sens d'évolution possibles du potentiel arboré dans les ex-surfaces semi-arides froides, un « potentiel arboré analogue » est calculé pour la période historique pour les surfaces assignées à cette classe et évoluant vers les différents régimes du domaine tropical semi-aride dans le futur. Ce potentiel analogue est défini de la même manière que dans la typologie décrite au chapitre 3, en utilisant les mêmes seuils. Pour chaque régime (déterminé dans le futur), ce potentiel analogue historique est comparé au potentiel arboré futur (figure 4.23 et figure A35 en annexe). Ainsi, pour les régimes 3 à 5, l'évolution se fait dans le sens d'une augmentation du potentiel arboré, en termes de niveau de productivité et de fraction arborée. En revanche, pour les régimes 1 et 2, l'évolution se fait dans le sens d'une diminution du potentiel arboré, comme il est montré plus spécifiquement sur la figure 4.23b.

► Les transitions vers une classe climatique plus humide ou plus aride s'interprètent logiquement comme une augmentation ou une baisse de potentiel arboré. La transition de zones semi-arides froides vers le domaine tropical semi-aride implique une hausse de potentiel pour une assignation aux régimes 3, 4 et 5, une baisse sinon.

4.3.3 Interprétation en termes de recommandations pour les stratégies de reforestation

En suivant les clés d'interprétation données ci-dessus, les différents types de redistribution des régimes de productivité peuvent être rassemblés selon leur caractère plus ou moins favorable : une transition vers la classe climatique très aride est défavorable, tandis qu'elle est favorable vers une classe suhumide. D'autre part, une transition, au sein du domaine tropical semi-aride historique vers un régime d'indice inférieur (dans la majorité des cas, le régime 1), est considérée comme défavorable, tandis qu'une transition vers un régime d'indice directement supérieur ou vers une classe climatique subhumide est considérée comme favorable. Ces considérations permettent de concevoir une gamme de recommandations à formuler pour les stratégies de reforestation décidées aujourd'hui pour une perspective à long-terme :

- Ne pas reforester (« NON ») : l'évolution se fait dans le sens d'une transition vers une classe climatique plus aride. La reforestation est donc à déconseiller ;
- Diminution du potentiel arboré (« Diminution » ou *Dimin*) : transition vers un régime de productivité moins favorable (1, 2 ou 3). La reforestation est possible, mais la fraction arborée optimale est inférieure à celle actuelle ;
- Potentiel limité constant (« Limité Stable » ou *LimStable*) : maintien dans un régime de productivité peu favorable (1, 2 ou 3). La stratégie de reforestation peut être décidée en fonction des conditions actuelles ;
- Augmentation du potentiel arboré, qui reste limité (« Oui mais » ou *OuiMais*) : transition vers un régime de productivité plus favorable, mais dont la fraction arborée optimale reste limitée (régime 1, 2 ou 3). Une reforestation un peu plus dense qu'à la période actuelle est possible, tout en demeurant limitée ;
- Potentiel d'arborisation illimité (« OUI ») : transition vers (ou maintien dans) un régime de productivité favorable (4 ou 5). Le niveau de reforestation peut être ajustée en fonction d'autres critères.

Ce dernier cas peut concerner des régions héritées de classes climatiques plus humides, devenue semi-arides chaudes et assignées aux régimes 4 et 5 ; cette configuration est très importante notamment dans la région Méditerranée, mais également dans les régions Sahel, EstAndes, ainsi que dans le bassin caribéen. Le potentiel arboré diminue alors, en termes de niveaux de productivité, mais sans remettre en cause l'intervalle de fractions arborées acceptables. On considère donc ici que l'opportunité de la reforestation n'est pas remise en question par ce critère, et que la stratégie doit être élaborée en fonction d'autres critères de décision, ainsi qu'évoqué au chapitre 3. Cette recommandation inclut par conséquent des régions héritées de régimes de productivité moins favorables et des régions anciennement suhumides. La figure 4.24 rassemble les cartes de recommandation pour les expériences traitées ici.

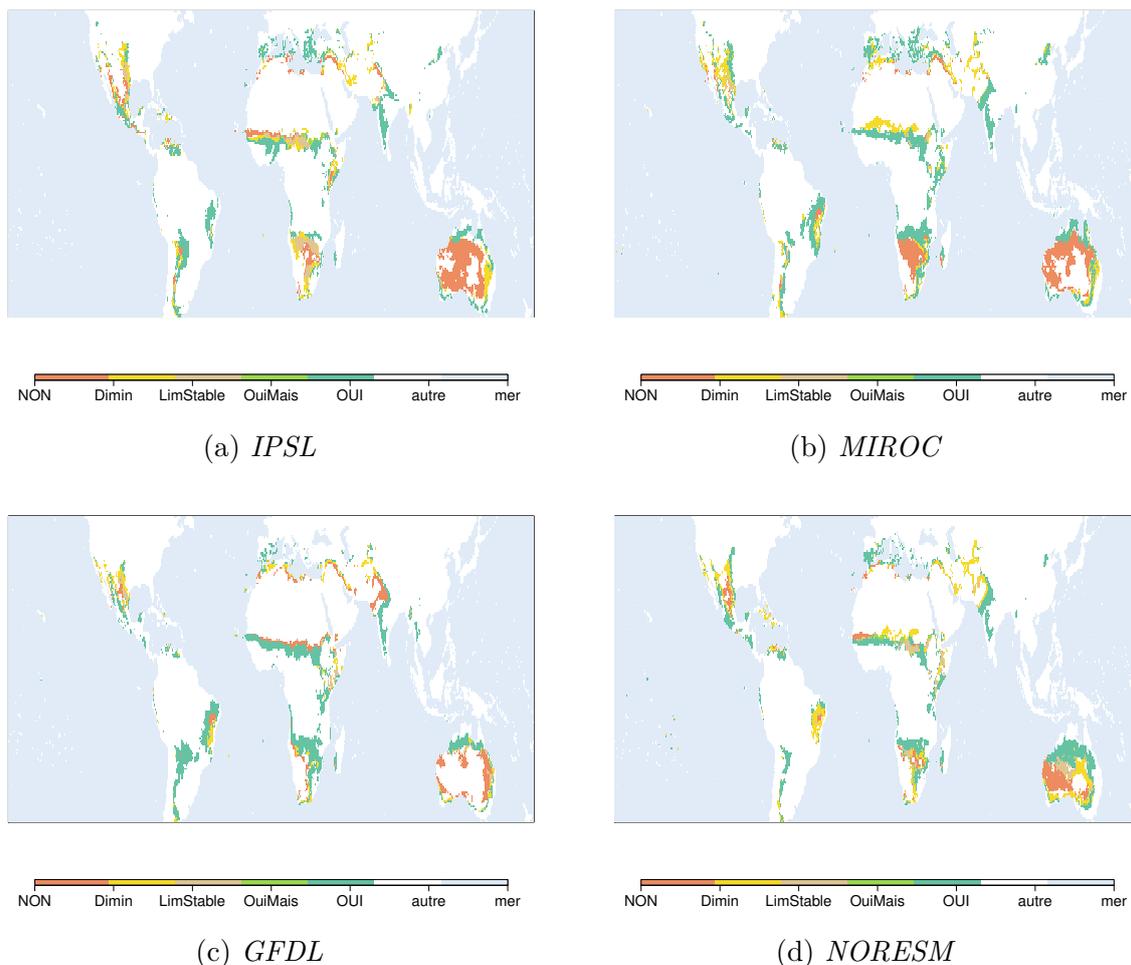


FIGURE 4.24 – *Interprétation de l'évolution de la répartition des régimes de productivité en termes de recommandations pour l'élaboration de stratégies de reforestations.*

Les cartes obtenues à partir des quatre expériences montrent une forte variabilité dans la plupart des régions. Des messages robustes peuvent cependant être dégagés : le « OUI » l'emporte dans le nord de la région Méditerranée, en Inde, dans le nord de la région Australie, dans le sud de la région Sahel, dans la région EstAndes et dans le bassin caribéen. Cela concerne des zones anciennement subhumides. Dans ce cas le potentiel de reforestation est donc maintenu, malgré une baisse éventuelle du niveau de productivité associé.

D'autres régions indiquent une diminution du potentiel de reforestation selon les quatre modèles : le plateau centre-eurasien, le nord de la région Sahel, le sud de la région Méditerranée (en Afrique du Nord) et la région NordAmérique.

La plus forte incertitude pèse enfin sur les régions EstBrésil et SudAfrique, pour lesquelles les différentes expériences conduisent à des résultats opposés. Le cas de la région Australie, enfin, se distingue en apparence par l'étendue des surfaces concernées. Comme il a déjà été discuté, le principal facteur de divergence entre les résultats de ces expériences dans cette région vient de la classification climatique (de Köppen) au centre du continent.

Si on en fait abstraction, alors les modèles montrent une certaine cohérence entre une augmentation de potentiel vers le nord, où la transition s'effectue depuis des zones plus humides, et une diminution vers le centre, où les conditions sont plus arides.

► L'interprétation en termes de potentiel de reforestation montre que celui-ci reste favorable dans de nombreuses régions, tandis que pour certaines régions la reforestation n'est pas à recommander. La variabilité entre les expériences impose cependant une incertitude qui demandera à être levée dans l'avenir.

4.4 Effets combinés de l'aridification et de l'augmentation de la concentration en CO₂ sur le potentiel arboré

Cette dernière partie explore les facteurs déterminants de la productivité arborée dans le domaine tropical semi-aride pour le climat historique et pour le climat futur.

4.4.1 Evolution des caractéristiques climatiques des régimes de productivité

En moyenne dans chaque régime, le rapport P/EP reste discriminant dans la période future. Les distributions de ses valeurs entre les régimes sont néanmoins plus rapprochées qu'à la période historique (figure 4.25 et figure A29 en annexe). Globalement, les spectres sont décalés vers la gauche, donc dans le sens d'un niveau d'aridité accru, excepté dans le cas du régime 1, pour lequel le spectre est décalé vers la droite.

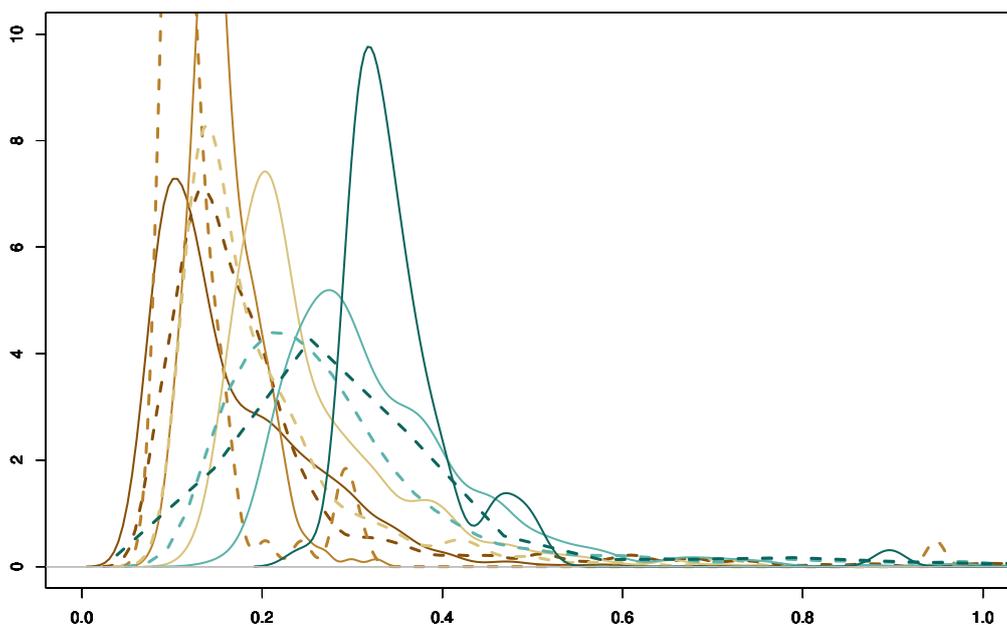


FIGURE 4.25 – *Comparaison des distributions de l'indice d'aridité P/EP de chaque régime pour les périodes historique (plein) et future (pointillé), pour le modèle de l'IPSL. L'axe des abscisse représente le rapport P/EP (sans unité).*

➔ L'évolution de l'indice d'aridité au sein de chaque régime entre les périodes historique et future pose question : comment les régimes peuvent-ils être caractérisés, dans la période future, par un plus haut niveau d'aridité, sans que leurs niveaux de productivité soient altérés, voire soient augmentés ? L'expérience suivante, comparant les conditions futures avec et sans augmentation du CO₂ atmosphérique permet de tester l'hypothèse de l'effet de fertilisation par le CO₂ pour expliquer cette apparente contradiction.

4.4.2 Effet de l'augmentation du CO₂ atmosphérique les potentiels arborés futurs

Effet sur l'indice d'aridité des régimes

Cette analyse est proposée ici pour un seul modèle (IPSL). L'expérience complémentaire est identique en tout point à l'expérience Expe IPSL Fut, à la valeur de la concentration en CO₂ atmosphérique près (tableau 4.1) : celle-ci est maintenue à la même valeur que dans la période historique. La méthodologie est appliquée comme précédemment aux résultats de cette expérience, et une nouvelle répartition des régimes de productivité est déterminée pour la période future. La caractérisation des régimes de productivité montre alors des différences significatives entre les deux expériences (avec et sans augmentation du CO₂) pour la période future.

Pour reprendre la comparaison des profils d'indices d'aridité historiques et futurs qui posait question à la section précédente, la figure 4.26 superpose, pour chaque régime, les profils obtenus avec l'expérience historique (trait plein) et les expériences futures avec CO₂ augmenté (trait pointillés longs) et CO₂ historique (trait pointillés courts). De manière systématique pour les régimes 1 à 4 (encore que de manière moins évidente pour le régime 1), les profils de l'expérience future avec CO₂ augmenté sont décalés vers la gauche (aridité supérieure) par rapport à ceux de l'expérience future avec CO₂ historique. Dans le cas du régime 5, il n'y a pas de profil pour l'expérience avec CO₂ historique, car ce régime n'est pas assez représenté (figure 4.27).

Par rapport aux résultats de l'expérience avec la climatologie historique (trait plein), le profil obtenu avec la climatologie future mais le CO₂ historique est très légèrement décalé vers la droite, c'est-à-dire vers des conditions moins arides.

Les régimes de productivité sont donc associés, dans les conditions futures avec CO₂ augmenté, à des conditions moyennes plus arides que dans les conditions historiques (sauf pour le régime 1), ou que pour dans les conditions futures sans augmentation du CO₂. Ces différences peuvent être expliquées par l'effet du CO₂ sur le fonctionnement de la végétation, comme il est discuté ensuite.

Effet sur la répartition des régimes

D'autre part, la répartition des régimes est différente entre les deux domaines tropicaux semi-arides futurs : dans le cas où le CO₂ est maintenu à sa valeur historique, cette répartition change peu entre les périodes historique et future (figure 4.27). Le régime 1 reste largement majoritaire dans ce cas.

Les différences d'assignation de régime dans la période future entre les deux expériences peuvent être synthétisées sous la forme binaire : assignation plus favorable ou moins favorable. Ces deux modalités sont représentées respectivement en vert et en rouge sur la carte de la figure 4.28. En considérant comme précédemment que le potentiel arboré augmente des régimes 1 à 5, l'assignation à un régime d'indice supérieur dans l'expérience avec CO₂ augmenté est considérée comme plus favorable ; celle à un régime d'indice inférieur comme moins favorable. La couleur noire sur la carte représente le domaine tropical semi-aride futur pour lequel les deux expériences ne montrent pas de différence de régime de productivité.

Il apparaît clairement que l'effet de l'augmentation du CO₂, lorsqu'il se manifeste, est

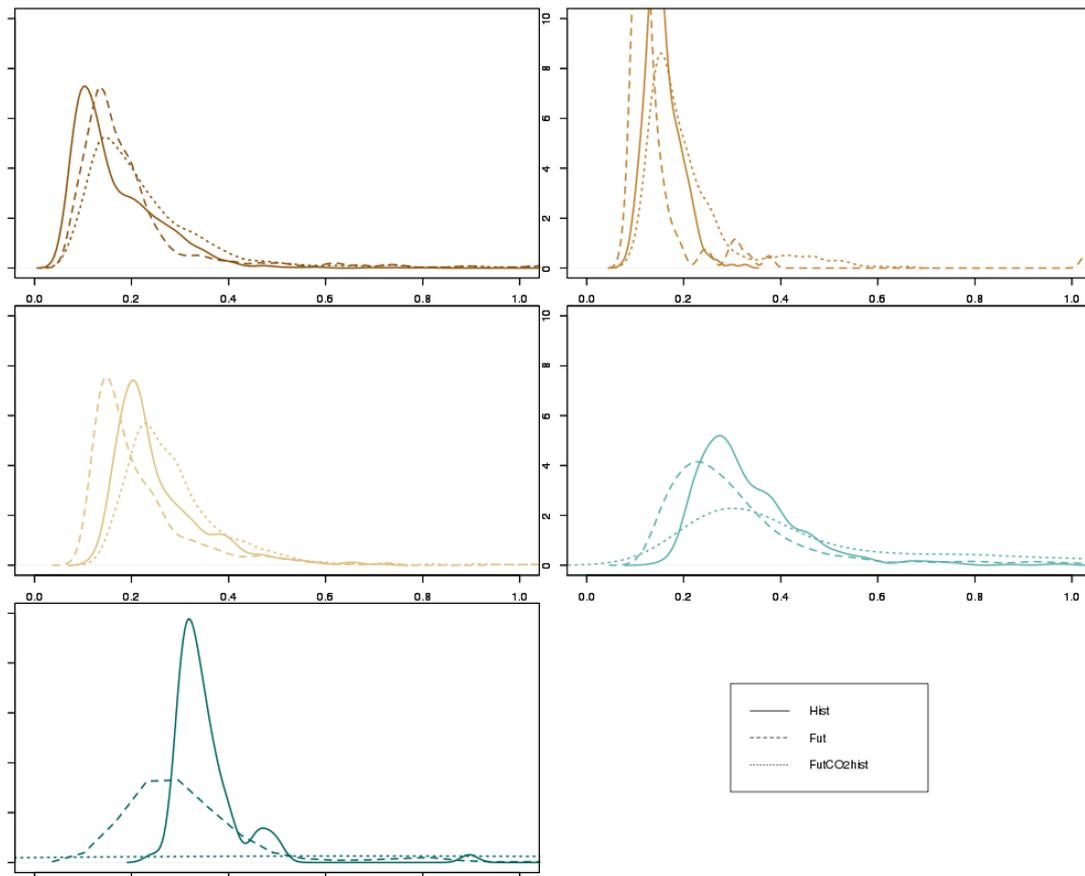


FIGURE 4.26 – *Densité de répartition des valeurs de P/EP par régime selon les trois expériences IPSL. Comparaison des évolutions obtenues à partir de l'expérience historique (trait plein) et des expériences futures à CO_2 atmosphérique historique (trait pointillé court), et de celle avec CO_2 augmenté (trait pointillé long), pour le domaine tropical semi-aride futur.*

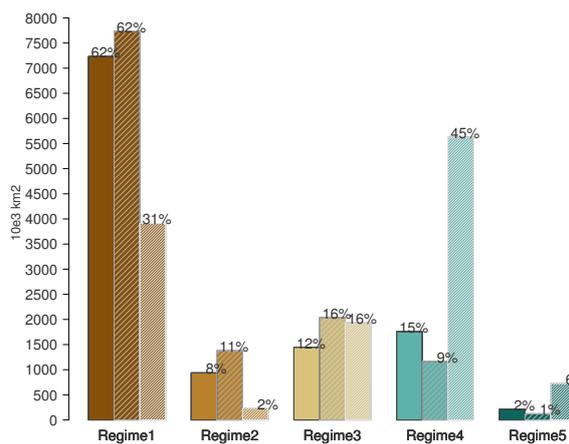


FIGURE 4.27 – *Répartition de la surface du domaine tropical semi-aride entre les régimes pour les trois expériences IPSL : historique, future avec CO_2 historique (hâchures larges) et future avec CO_2 augmenté (hâchures serrées). L'axe des ordonnées est gradué en milliers de km^2 . La proportion relative de la surface de chaque régime à la surface totale du domaine tropical semi-aride est indiquée au-dessus de chaque barre.*

presque uniformément positif. Les différences entre les deux expériences ne sont cependant pas uniformément réparties dans le monde. Ainsi, dans la région SudAfrique, s'il y a un effet de fertilisation du CO_2 , alors il n'est pas suffisant pour prendre le pas, en termes de régime de productivité, sur l'influence du facteur climatique. Dans la région Sahel, en revanche, on observe un effet du CO_2 suffisant pour modifier le régime de productivité

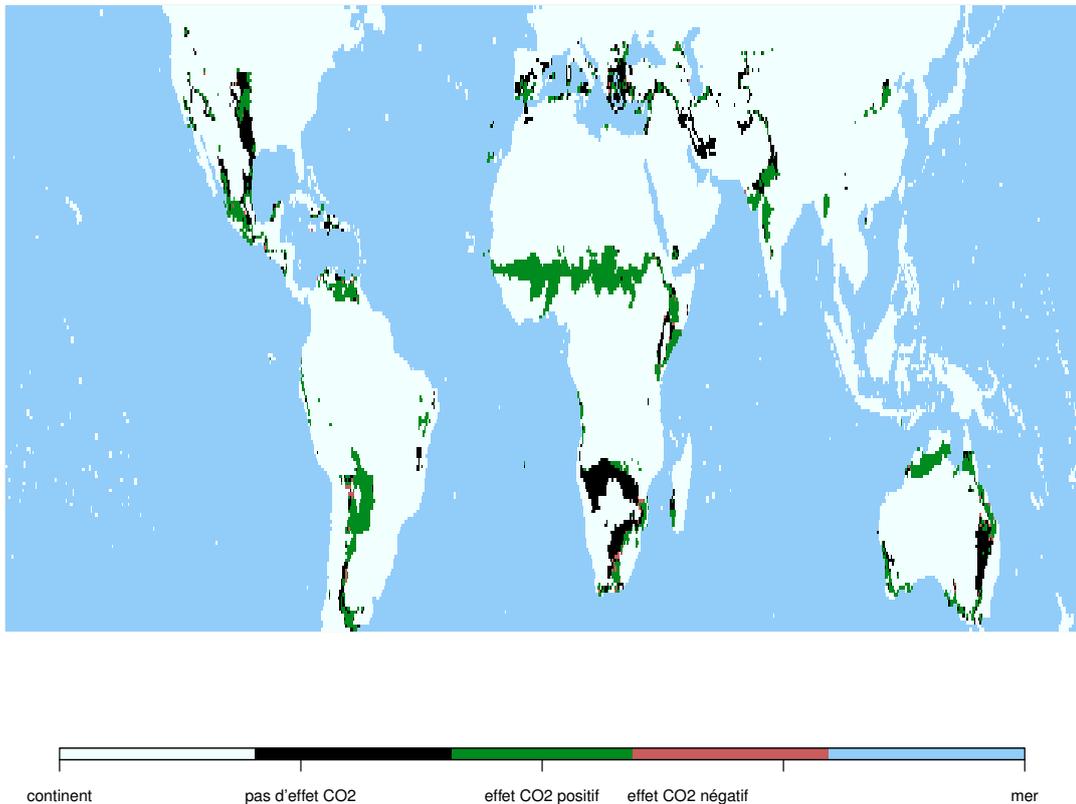


FIGURE 4.28 – *Comparaison de la répartition des régimes obtenue à partir de l'expérience future à CO_2 augmenté et à CO_2 historique, pour le domaine tropical semi-aride futur. En vert (rouge, quasi-absent), les cas où le régime est supérieur (inférieur) pour la simulation avec CO_2 augmenté.*

déterminé par les conditions climatiques. **L'effet du CO_2 est donc positif dans la plupart des cas, mais il se manifeste principalement dans certaines régions.**

► Au sein de l'enveloppe climatique relativement homogène, par définition, le CO_2 atmosphérique apparaît donc comme un facteur d'altération de la relation entre la productivité des arbres et leur densité arborée, en augmentant la capacité des peuplements arborés à se maintenir dans des conditions climatiques de même niveau d'aridité.

Principe de modélisation de cet effet

- La concentration de l'air en CO_2 a un double effet sur la physiologie de la plante :
- un effet de fertilisation en augmentant la productivité ;
 - un effet antitranspirant en provoquant la fermeture des stomates.

Ces deux effets contribuent, dans le modèle, à favoriser le maintien des arbres dans des conditions limitantes. Premièrement, l'augmentation de la productivité primaire brute permet un démarrage de croissance plus rapide au début de la saison des pluies, et moins

dépendant de la réserve de carbohydrates. Le risque d'entrer dans un cercle vicieux d'épuisement de cette réserve (voir chapitre 3, figure 3.21) est donc réduit. Deuxièmement, la fermeture des stomates a pour effet de limiter la perte d'eau par transpiration, donc d'augmenter l'efficacité d'utilisation de l'eau par la plante, de limiter le prélèvement dans le sol. La vidange des réservoirs en eau du sol est ainsi ralentie, ce qui permet, dans les régions présentant un certain degré d'aridité, d'allonger la durée de la saison de croissance indexée sur la disponibilité en eau du sol. Indirectement, ce prolongement de la saison de croissance a, dans les régions arides, un effet positif sur la productivité totale de la plante.

4.5 Discussion et perspective

Les expériences conduites et analysées dans ce chapitre concluent à une augmentation future du potentiel arboré sous l'effet de l'augmentation du CO₂ atmosphérique, dans une grande partie du domaine tropical semi-aride du début du 21e siècle, selon le scénario RPC 8.5. L'effort d'interprétation en termes de recommandations pour l'élaboration de stratégies de reforestation dans une perspective à long terme suggère que les zones dans lesquelles une reforestation serait à déconseiller sont assez peu étendues, en comparaison de la superficie totale des domaines tropicaux semi-arides historique et futur. Ainsi, dans la région Sahel, en grande partie assignée au régime 1 dans la période historique, et appelée à demeurer semi-aride dans le futur, le potentiel arboré pourrait se maintenir, voire même augmenter à horizon 2100. Le bilan est néanmoins plus contrasté dans la partie Sud de l'Afrique, pour laquelle les expériences divergent fortement sur le sens de l'évolution du potentiel arboré.

Ce résultat est cohérent avec ceux des expériences de simulations réalisées pour le continent africain avec un modèle global de végétation dynamique spécifiquement adapté aux écosystèmes de savanes (aDGVM, Scheiter et Higgins (2008)). Ce modèle simule notamment une évolution adaptative de certains paramètres des types fonctionnels de plantes, comme l'allocation de carbone, en réponse à l'évolution des conditions climatiques. Avec ce modèle forcé par des projections climatiques pour un modèle de climat (ECHAM5) et un scénario climatique (SRES A1B, issu du quatrième exercice du GIEC), les auteurs ont testé l'hypothèse selon laquelle les basculements d'écosystèmes attendus dans le futur se produiront probablement dans ce qu'ils appellent le complexe de savane (*savanna complex*, en anglais), connu pour être en équilibre dynamique entre des états stables, forêts et prairies (Higgins et Scheiter, 2012). En effet, les résultats présentés ici montrent que la moitié environ du domaine tropical semi-aride actuel évoluera vers des conditions plus arides, dans lesquelles le couvert arboré ne peut être maintenu, et où la formation végétale dominante prendra la forme d'un couvert herbacé. Au contraire, dans la moitié du domaine conservant les conditions climatiques tropicales semi-arides, le régime dominant sera favorable au maintien d'un couvert arboré plus dense, allant dans le sens de la transition vers des écosystèmes à dominance ligneuse accrue prédite par Higgins et Scheiter (2012), dans ce domaine tropical semi-aride en particulier, selon la même classification climatique.

Le rôle du CO₂ atmosphérique, explicitement simulé par Higgins et Scheiter (2012) et démontré ici par une expérience utilisant un seul modèle de climat, demanderait à être encore approfondi. Elargir la comparaison à d'autres modèles de climat, pour commencer, permettrait d'estimer une éventuelle variabilité inter-régionale des résultats. En effet, il a été souligné au cours de cette étude que la convergence entre les expériences à l'échelle globale pouvait masquer des divergences à l'échelle régionale. Dans le cas de l'Afrique du Sud, par exemple : alors que les résultats, pour un seul forçage climatique, de Higgins et Scheiter (2012) montrent l'augmentation de la biomasse arborée, les résultats des expériences analysées ici sont divergeants, interprétés en termes soit d'une augmentation soit d'une diminution du potentiel arboré (figure 4.24). C'est avec le modèle IPSL qu'est pronostiquée une baisse du potentiel arboré. Or c'est également avec ce modèle que l'expérience de mise en lumière de l'effet du CO₂ atmosphérique n'a pas révélé d'effet significatif dans cette région. Les résultats pourraient être différents avec les autres modèles de climat.

Enfin, l'augmentation du potentiel arboré dans les régions tropicales semi-arides permettent de relativiser l'effet *a priori* négatif de leur expansion projetée. Cependant, le caractère positif de l'effet de fertilisation du carbone sur la végétation doit être nuancé par la prise en compte de ses impacts rétroactifs à l'échelle globale, qui peuvent être contradictoires sur le réchauffement climatique. Sur le cycle de l'eau, pour commencer, la diminution de la transpiration causée par la fermeture des stomates aurait un effet rétroactif positif sur le réchauffement, tandis que l'augmentation de la productivité et de l'intensification du fonctionnement de la plante, pourrait conduire à une évaporation plus importante, et donc à un effet rétroactif négatif sur le réchauffement (Pitman, 2003). Sur le cycle du carbone, par ailleurs, la séquestration du carbone augmenterait du fait de l'amplification de l'activité et de l'efficacité photosynthétiques, mais diminuerait d'autre part sous l'effet de l'intensification de la respiration de la faune du sol et des plantes associée au réchauffement (Cox *et al.*, 2013). Pour approfondir ces questions, le recours à des simulations couplées surface-atmosphère devra être envisagé dans le futur.

Ces résultats sont en cours de transmission vers la société KINOME, acteur de programmes de reforestation en particulier dans les régions tropicales semi-arides. Cet échange permettra d'améliorer l'interprétation des résultats présentés ici et d'orienter la poursuite du travail sur la reforestation en milieu tropical semi-aride.

4.6 Résumé du chapitre 4

La méthodologie présentée au chapitre 3 a été appliquée aux sorties de quatre modèles de climat, pour la période actuelle et pour la période future (fin du 21^e siècle) selon un scénario climatique.

La comparaison des résultats obtenus pour la période actuelle à ceux de l'expérience de référence a montré que la répartition des régimes de productivité obtenue pour le début du 21^e siècle à partir des sorties de modèles était équivalente à celle de l'expérience de référence : le régime 1, le plus défavorable, est largement prépondérant, tandis que le régime 5 est minoritaire. Parmi les régimes intermédiaires, le régime 4, assez favorable, est le plus représenté.

Dans le futur, cette répartition évolue en faveur du régime 4, au sein du futur domaine tropicale semi-aride. Celui-ci est formé en majorité (50-70%) de surfaces qui appartenaient à des classes climatiques différentes dans la période actuelle, et dont la majorité sont héritées de classes plus humides. La partie du domaine actuel évoluant en-dehors de cette classe climatique devient en majorité plus aride (38% du domaine actuel).

L'expansion du domaine tropical semi-aride dans la période future s'accompagne d'une hausse générale du niveau de productivité des arbres. L'interprétation en termes de potentiel de reforestation montre que celui-ci reste favorable dans de nombreuses régions, tandis que pour d'autres régions la reforestation n'est pas à recommander. La variabilité entre les expériences impose cependant une incertitude qui demandera à être levée dans l'avenir.

Enfin une expérience complémentaire a montré que, pour un modèle, le CO₂ atmosphérique apparaissait comme un facteur d'augmentation de la capacité des peuplements arborés à se maintenir dans des conditions climatiques de même niveau d'aridité. En accord avec d'autres résultats de la littérature, ce diagnostic demande néanmoins à être approfondi en répétant au moins l'expérience avec un plus grand nombre de modèles.

Conclusions et perspectives

L'achèvement d'une oeuvre complexe doit non dissimuler son inachèvement, mais le révéler.

Edgar Morin, *Éduquer pour l'ère planétaire*

Ce travail de thèse s'inscrit dans la problématique à la fois large et spécifique de l'élaboration et de l'évaluation de projets de reforestation en milieu tropical semi-aride : large par l'ensemble des dimensions et des enjeux impliqués, spécifique par des contraintes climatiques particulières. Dans ce contexte, j'ai choisi d'aborder le problème par la question de la faisabilité et de la durabilité de tels projets du point de vue climatique. L'objection immédiate, dans le cadre d'échanges entre scientifiques comme non-scientifiques, est en effet toujours celle de l'opportunité de reforester dans des conditions limitées en eau, qui plus est dans un contexte d'aridification sous l'action combinée de la désertification en cours et du réchauffement climatique. Il semblait donc pertinent de répondre en premier à cette objection, avant d'aborder celle de l'évaluation des impacts de projets de reforestation.

Du point de vue climatique, la problématique de la faisabilité et de la durabilité de la reforestation dans les régions tropicales semi-arides pose trois questions :

- Les conditions climatiques des régions à reforester sont-elles propices à l'implantation d'un couvert arboré ?
- Comment ces conditions vont-elles évoluer dans le futur ?
- L'étendue des régions concernées va-t-elle augmenter sous l'effet du changement climatique ?

J'ai abordé ces questions dans une perspective globale. A l'objectif de leur apporter des réponses s'ajoutait celui de tester la capacité d'outils de modélisation globale pour aborder une problématique appliquée, relevant de l'étude d'impact. En effet, dans le contexte de changement climatique en cours, les seuls outils disponibles aujourd'hui pour envisager l'évolution des conditions climatiques sont les modèles de circulation générale. Leur utilisation impose d'amorcer l'étude des projections futures à partir de l'échelle globale pour éventuellement effectuer une descente à l'échelle régionale ou locale, à l'aide de modèles

spécifiquement développés pour ces échelles. A quel moment cette jonction doit-elle être opérée? A quel niveau de précision l'approche utilisant uniquement des outils globaux cesse-t-elle d'être pertinente?

Les projets de reforestation, comme il a été souligné dans l'introduction et le premier chapitre de ce manuscrit, doivent être abordés à l'échelle globale *et* à l'échelle locale.

La circulation atmosphérique globale, qui définit le climat terrestre, est par définition modélisée à l'échelle du monde. Les efforts de lutte contre le réchauffement climatique doivent par conséquent être coordonnés à cette échelle. Il en va de même pour la désertification : amplifiée par le déséquilibre climatique, elle constitue un problème socio-économique et écologique mondial, qui doit être envisagé globalement. Enfin lors de la descente aux échelles inférieures, les contraintes sont au premier ordre déterminées par la répartition des différentes conditions climatiques à la surface du globe.

A l'échelle régionale ou locale, les enjeux et contraintes spécifiques s'expriment en d'autres termes qui peuvent diverger ou non des enjeux et contraintes globaux. Leur prise en compte est indispensable à la durabilité des actions entreprises, de sorte que la performance des actions entreprises localement conditionne la réussite à l'échelle globale. Il n'y a pas de réussite globale sans réussite locale.

Le travail réalisé ici permet d'apporter des réponses à l'échelle globale et à une échelle intermédiaire, analogue de l'échelle du biome : sans descendre à l'échelle locale, des types de contraintes peuvent être regroupés et analysés, ce qui permettra dans la suite de situer les problématiques locales dans le cadre de ces types - appelés régimes ici. Il s'agit d'une analogie avec le biome, mais pas d'une équivalence : le biome est une unité fonctionnelle, avec des relations climat-végétation déterminées *a priori*. Les régimes définis ici, au contraire, voient ces relations évoluer avec le changement climatique sous l'effet de la fertilisation par le CO₂ atmosphérique, de sorte que l'influence du climat sur la végétation ne peut pas être transposée au sein de ces enveloppes bioclimatiques du présent vers le futur.

La figure 4.29 situe les travaux réalisés dans cette thèse selon deux axes : la dimension spatiale, de l'échelle globale à l'échelle locale, et la dimension temporelle, de la période actuelle au futur tel que projeté par des scénarios climatiques.

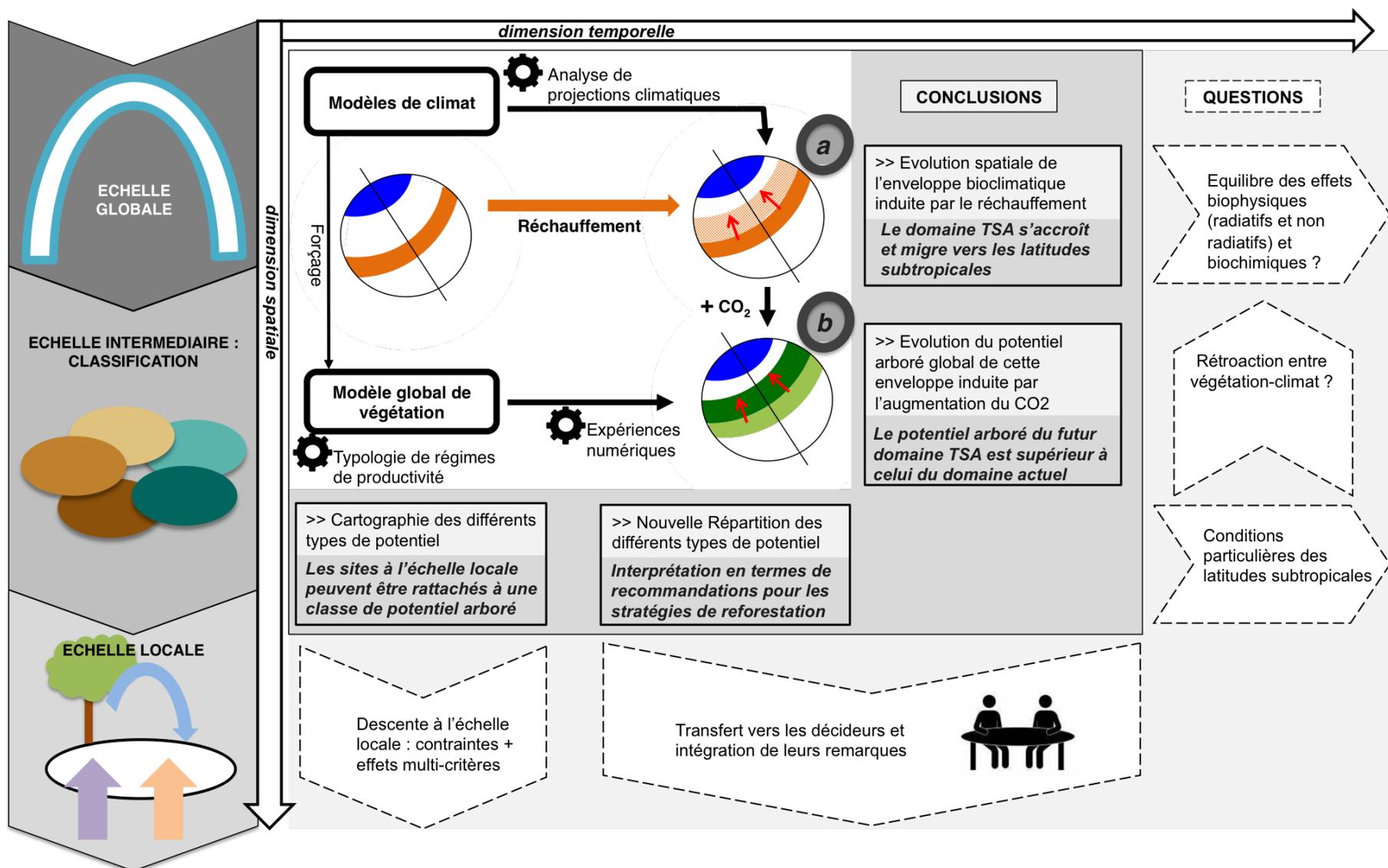


FIGURE 4.29 – *Figure de synthèse* du positionnement, de la méthodologie, des résultats et des perspectives de ce travail de thèse, à rapprocher de la figure 1.6. L'échelle régionale est remplacée par une échelle intermédiaire utilisant une typologie définie pour l'échelle globale. a) Le réchauffement induit un élargissement du domaine tropical semi-aride (TSA). b) Les effets combinés du réchauffement et du CO₂ induisent une modification des régimes de productivité.

Synthèse des résultats

La revue de littérature (**chapitre 1**) permet de dégager des grandes lignes de réponse à la problématique. La théorie et les expériences scientifiques démontrent, en premier lieu, que les projets de reforestation ayant vocation à atténuer le réchauffement climatique ont plus de chances de réussite sous les latitudes tropicales, où les différents effets (biochimiques et biophysiques) de la végétation sur le climat, y compris dans leurs interactions, convergent dans le sens d'un refroidissement climatique global.

Dans ces régions tropicales, d'autre part, ce sont les régions identifiées comme arides et semi-arides qui manifestent le plus fort besoin de programmes de développement. Dans ces milieux, la reforestation (le plus souvent sous la forme de développement de l'agroforesterie) a pour objectif de diversifier les ressources locales, de restaurer la fertilité des sols cultivés et d'améliorer les conditions microclimatiques de température et d'humidité. Ces régions sont en outre reconnues pour leur fort potentiel de séquestration de carbone atmosphérique. La reforestation dans les zones tropicales semi-arides est ainsi porteuse d'effets bénéfiques tant globalement que localement. Cependant, l'implantation d'un couvert arboré dans des conditions semi-arides pourrait n'être pas soutenable à long terme. En effet, l'identification de conditions « semi-arides » sur le terrain ne recouvre pas exactement l'enveloppe climatiquement semi-aride : certaines zones sont identifiées comme semi-arides sous l'effet de facteurs anthropiques ou écologiques alors que la ressource en eau est moins limitée que dans l'enveloppe climatique strictement semi-aride. Dans ce contexte, l'implantation d'un couvert arboré trop dense pourrait avoir finalement des effets opposés à ceux recherchés.

Enfin, le climat est actuellement en pleine transition, vers un réchauffement global au cours des décennies à venir. Dans ce contexte, et alors qu'un processus de désertification est déjà observé sur le terrain, l'expansion des zones semi-arides est attendue. Les conséquences en sont doubles pour les projets de reforestation : leur besoin en qualité de mesure d'adaptation à des conditions allant en empirant se fera de plus en plus sentir, d'une part, tandis que le maintien des couverts forestiers dans ces régions sera de plus en plus compromis, d'autre part.

Cette évolution du domaine tropical semi-aride global sous l'effet de plusieurs scénarios de changement climatique fait l'objet du **chapitre 2**. Une approche « bioclimatique » est choisie avec pour objectif de dessiner le paysage tropical semi-aride futur et d'anticiper la transformation de régions vers des conditions semi-arides dans le futur, dont il faudra tenir compte pour les stratégies de reforestation. Les données climatiques utilisées sont un ensemble multi-modèle de projections réalisées dans le cadre du dernier exercice du GIEC. L'analyse multi-modèle permet d'asseoir la robustesse des changements ainsi observés.

Ainsi, selon les projections climatiques pour les scénarios RCP, il est démontré que le domaine tropical semi-aride actuel se maintient en majeure partie dans les conditions futures. Une certaine proportion de sa surface, dispersée entre les différentes régions tropicales semi-arides du globe, cependant, évolue vers des conditions soit plus arides (jusqu'à +21% du domaine global) soit plus humides (jusqu'à 12% du domaine). Cette évolution vers d'autres classes climatiques se produit en marge des régions tropicales semi-arides actuelles. Les régions tropicales semi-arides actuelles ne sont donc pas appelées à disparaître d'ici la fin de ce siècle, mais seront « grignotées » peu à peu, principalement sur leur front le plus aride. Cela suggère que les conditions climatiques au sein du domaine

tropical semi-aride vont en s'aridifiant, jusqu'à franchir le seuil de sortie de cette classe. En dépit de ce front de disparition de surface, le futur domaine tropical semi-aride est plus étendu qu'au début du siècle. Son accroissement total atteint jusqu'à +38% en moyenne, pour le RCP 8.5. Il résulte d'un élargissement progressif en-dehors de la ceinture tropicale, principalement dans l'hémisphère nord, dont la corrélation avec le réchauffement global est démontrée. Ceci est cohérent avec l'hypothèse d'un élargissement de la circulation de Hadley sous l'effet du réchauffement climatique (Seidel *et al.*, 2008).

Ces résultats précisent ceux de travaux analogues réalisés à l'échelle de l'ensemble des classes climatiques selon la classification de Köppen (Rubel et Kottek, 2010). Ce focus sur une seule classe permet de comparer les résultats obtenus avec ceux d'autres travaux portant sur les zones semi-arides et utilisant d'autres méthodes d'analyse (Feng et Fu, 2013). Ces deux types d'approche ont en commun d'être fondées sur les conditions climatiques en surface. D'autres travaux portent sur les conditions atmosphériques à différentes altitudes et diagnostiquent un déplacement des zones de subsidence, lesquelles déterminent la localisation des régions tropicales semi-arides (Seidel *et al.*, 2008). Ces travaux ont mis en évidence l'élargissement de la circulation de Hadley à l'échelle locale et projettent la poursuite de ce phénomène dans le futur. Le recours à la classification de Köppen comme outil d'identification des zones tropicales semi-arides en surface et de leur évolution dans le futur prouve ici son efficacité pour suivre l'effet des changements atmosphériques globaux tout en offrant la possibilité de subdiviser les régions concernées en fonction des types de changements subis.

La méthodologie proposée au **chapitre 3** a pour objectif d'analyser les implications de cette évolution du domaine tropical semi-aride sur le potentiel climatique de maintien et d'entretien d'un couvert arboré. En effet, une des problématiques globales liées à la question de la reforestation dans le domaine tropical semi-aride est celle du « potentiel arboré » dans ces conditions limitantes : quelle densité de couvert arboré ces milieux peuvent-ils supporter ? Comment définir, selon quels critères, un optimum arboré ?

Le premier levier de la méthodologie proposée est l'utilisation d'un modèle de végétation pour simuler ce potentiel arboré dans l'enveloppe de conditions climatiques du domaine tropical semi-aride. L'utilisation d'un modèle global de végétation offre en effet la possibilité de prendre en compte de manière mécaniste tous les facteurs climatiques déterminant, de façon combinée, la croissance de la plante. Il permet ainsi d'évaluer les réponses de la végétation à des conditions climatiques contrastées et à leur évolution. En contrepartie, son maniement impose d'accepter des hypothèses simplificatrices qui permettent une appréhension à l'échelle globale. Le modèle global de végétation retenu pour ce travail est le modèle ORCHIDEE développé à l'IPSL. Le second levier de la méthodologie proposée est une typologie des profils de résultats obtenus en sortie des expériences de modélisation. Ces profils délimitent des sous-régions caractérisées chacune par une relation distincte du niveau de productivité à la surface occupée par la forêt.

L'expérience de référence, réalisée à partir de données climatiques issues d'observations, dessine les contours de sous-régions du domaine tropical semi-aride avec des profils contrastés de réponse à l'évolution de la densité de couvert arboré. La typologie des profils de résultats de l'expérience permet d'assigner chaque point du domaine tropical semi-aride à un parmi cinq « régimes » classés du plus défavorable (régime 1) au plus favorable (régime 5) en termes d'effet de la densité arborée sur le niveau de développement des arbres. Le régime le plus défavorable occupe près de la moitié (47%) du domaine tro-

pical semi-aride, selon l'expérience de référence, présent majoritairement dans les régions sudafricaine et australienne. Ce régime 1 est caractérisé par un développement des arbres plus élevé pour les petites densités arborées, et devenant nul pour les plus grandes, pour lesquelles aucun couvert arboré ne peut donc être maintenu. Le second régime le plus représenté au sein du domaine tropical semi-aride est le régime 4 (28%). Régime favorable au couvert arboré, il est défini par un développement des arbres élevé pour toutes les densités arborées, malgré la persistance d'un effet de ces dernières sur le développement. Il occupe principalement les régions sahéenne, est-africaine et indienne. C'est également le régime majoritaire dans la région méditerranéenne, par ailleurs peu représentée dans le domaine tropical semi-aride global.

Au sein de chaque régime, le « potentiel arboré » peut être évalué. La notion d'optimum est introduite pour caractériser ce potentiel arboré par une valeur de fraction arborée unique, celle conduisant à la productivité maximale tout en préservant le niveau de développement individuel des arbres. Cet optimum peut être utilisé pour comparer les potentiels selon différentes dimensions, comme dans le temps (futur versus présent, par exemple), ou dans l'espace (variabilité inter-régionale). Cependant, les critères de définition d'un tel optimum restent assujettis aux enjeux d'une problématique particulière. A partir d'une définition arbitraire, cet optimum est utilisé ici pour analyser la sensibilité de différents critères aux variations de densité arborée. Les critères d'évaluation sont choisis parmi les variables disponibles en sortie de modèle, et selon leur pertinence au regard des enjeux de reforestation. La surface ombragée sous couvert arboré et l'extrême de chaleur journalier au niveau du sol ont été retenus. Il est démontré que ces deux critères varient conjointement à celui de la productivité totale du peuplement. En outre, la sensibilité de chaque critère autour de l'optimum arbitrairement défini suggère que celui-ci réalise effectivement le meilleur compromis pour les trois régimes les plus favorables. L'arbitrage est plus contrasté, en revanche, pour les régimes plus défavorables, en raison des évolutions fortes, et de sens opposé, des critères de développement des arbres, d'une part, et de productivité totale du peuplement arboré d'autre part.

Cette approche à l'interface entre les échelles globale et locale permet d'aborder la problématique de façon à intégrer les résultats issus de différents champs de recherche en ouvrant vers le développement d'outils d'évaluation et d'aide à la décision transversaux. Cette échelle intermédiaire est proche de l'échelle régionale sans toutefois s'y assimiler. L'approche proposée s'appuie sur des *unités bioclimatiques fonctionnelles* qui portent la notion d'un potentiel quantifiable admettant différents niveaux de réalisation. Ces unités sont en cela différentes à la fois des classes bioclimatiques de la classification de Köppen et de la notion de biome. Le raisonnement par unité fonctionnelle est utilisé dans d'autres domaines, comme par exemple en géographie avec le développement du concept d'*anthrome* (Ellis et Ramankutty, 2008; Ellis, 2011) : le principe est que la majeure partie des biomes de la planète ont été, à l'heure actuelle, modifiés par l'action anthropique au point d'en faire de nouvelles entités nommées « anthromes ». Ces unités permettent d'analyser de manière intégrée le fonctionnement des systèmes à la fois humains et écologiques. Dans le contexte de ce type d'étude, la connaissance du *potentiel* lié à chaque facteur - écologique, humain, mais aussi climatique - permet d'évaluer le système de façon complexe, de réaliser des évaluations pondérées et de mettre en place des compromis. Les unités (régimes) bioclimatiques déterminées dans ce travail sont-elles compatibles avec une autre typologie, celle établie pour les anthromes? La carte des anthromes (Ellis et Ramankutty (2008), figure 1) établie pour le début du 21^e siècle montre que les grandes régions

semi-arides sont occupées par des types d'anthromes différents. La typologie des régimes de productivité donnerait un contexte climatique pour la caractérisation de chaque anthrome. Inversement, le type d'anthrome donne des indications sur les priorités locales (zone plutôt résidentielle ou agricole, par exemple) et oriente l'évaluation multi-critère du potentiel de reforestation.

L'application de cette méthodologie à des projections climatiques futures, pour un des scénarios les plus sévères (RCP 8.5), fait l'objet du **chapitre 4**. Le modèle ORCHIDEE est forcé cette fois-ci avec des sorties de modèles, comme au chapitre 2, pour le début (période historique) et pour la fin (période future) du 21^e siècle, de manière à produire des résultats tenant compte de l'incertitude liée aux modèles. Elle montre que l'agrandissement et l'extension sub-tropicale du domaine tropical semi-aride sont accompagnés d'une redistribution des régimes de productivité. Le régime 1, le moins favorable, ne représente plus que 25% du domaine total, en moyenne sur les expériences réalisées à partir des sorties différents modèles de climat, tandis que le régime 4 devient prépondérant (49% de la surface totale du domaine). Cette évolution en faveur de ce régime plus favorable est opérée d'une part au niveau du domaine tropical semi-aride actuel - dont la moitié en moyenne (37 à 60%) est maintenue dans le futur, et dont 45% en moyenne est assignée au régime 4 -, d'autre part au niveau des nouvelles régions rejoignant ce domaine : elles sont en majorité (53 à 77%) héritées de zones plus humides et, parmi celles-ci, 63% sont assignées au régime 4.

La délimitation des régimes (par des valeurs de seuils identiques) est identique entre les périodes actuelle et future, et leur potentiel arboré, calculé à partir des valeurs obtenues pour chacune des deux périodes, reste stable. Il est donc possible d'interpréter une évolution vers un régime plus ou moins favorable comme une augmentation ou une diminution de potentiel arboré. Les résultats montrent ainsi que le potentiel arboré du domaine tropical semi-aride ne subit systématiquement pas la diminution que l'augmentation de l'aridité laissait présager. Une expérience complémentaire, à partir des sorties d'un seul modèle, montre que la raison en est principalement l'effet de fertilisation du CO₂ atmosphérique dont la concentration est plus que doublée en fin de 21^e siècle selon le RCP 8.5. Cet effet compense celui de l'aridification climatique, ce qui contribue à expliquer l'augmentation de la productivité dans l'enveloppe climatique tropicale semi-aride.

L'interprétation de ces résultats en termes de recommandations pour l'élaboration de stratégies de reforestation dans une perspective à long terme montre ainsi que les zones dans lesquelles une reforestation serait à déconseiller sont assez peu étendues, en comparaison de la superficie totale des domaines tropicaux semi-arides historique et futur. Ces résultats suggèrent notamment que, dans la région Sahel, en grande partie assignée au régime 1 dans la période historique, et appelée à demeurer semi-aride dans le futur, le potentiel arboré pourrait se maintenir, voire même augmenter à horizon 2100. Le bilan est néanmoins plus contrasté dans la partie Sud de l'Afrique, pour laquelle les expériences divergent fortement sur le sens de l'évolution du potentiel arboré. Dans le cas des nouvelles régions du domaine futur, l'assignation majoritaire au régime 4 implique une diminution modérée du potentiel de productivité, mais qui ne remet pas en cause l'intervalle de fractions arborées acceptables.

Ces résultats soulignent en particulier l'importance de mieux comprendre et représenter l'effet du CO₂ atmosphérique sur la végétation : de cet effet dépend en partie la possibilité de reforester les régions tropicales semi-arides au cours du 21^e siècle. Or des

prédictions très différentes sont faites selon si l'effet de fertilisation du CO₂ est ou non (et comment ?) pris en compte (par exemple pour la région méditerranéenne : Keenan et al. 2011).

Limites du protocole de modélisation

Une série d'incertitudes dans le travail présenté ici relèvent à la fois de celles inhérentes à la recherche sur le changement climat et des simplifications consenties lors du protocole expérimental mis en oeuvre dans les chapitres 3 et 4. Dans la recherche sur le changement climatique, l'incertitude est d'abord induite par l'élaboration et le choix des scénarios climatiques futurs, par la variabilité entre les modèles de climat et par les performances de ces derniers. La complexité sans cesse croissante des modèles de climat, tout en améliorant la représentation des mécanismes physiques, rend de plus l'appréhension et la quantification de cette incertitude quasi-impossible. L'analyse réalisée au chapitre 2 porte donc cette incertitude multi-modèle et multi-scénario, dont nous avons essayé de tenir compte. Le recours à un jeu de plusieurs modèles permet de fournir des barres d'erreur représentant la variabilité inter-modèle, et l'utilisation de plusieurs scénarios climatiques de construire une enveloppe de résultats possibles. Selon le cadre d'évaluation du GIEC, la convergence des résultats au sein de ces enveloppes multi-scénarios et multi-modèles leur confère la plus grande robustesse à laquelle il est aujourd'hui possible d'accéder.

Dans les chapitres 3 et 4, l'incertitude multi-modèle et multi-scénario prise en compte au chapitre 2 est encore accrue par le nombre restreint de modèles de climat et de scénarios utilisés. En outre, un seul modèle de végétation a été utilisé, qui plus est dans une configuration simplifiée au regard de l'étendue des modalités du modèle ORCHIDEE. Un faisceau de raisons logistiques expliquent les simplifications réalisées : sorties de modèles de climat accessibles au moment des expériences, peu de validation des modules d'hydrologie et de végétation dynamique dans les milieux tropicaux semi-arides pour le modèle ORCHIDEE, coût des heures de calcul sur les supercalculateurs. Ces raisons ne constituent cependant pas les seuls motifs d'allègement du protocole expérimental : celui-ci est également le prix consenti pour pousser plus loin l'exploration de la problématique, dans un temps limité, et de manière à maîtriser les paramètres en jeu. J'ai choisi en effet d'utiliser le modèle ORCHIDEE, modèle généraliste, dans une configuration simplifiée : un seul type d'arbre (deux types de plantes) sur les six types d'arbres proposés dans le modèle et dont deux autres au moins seraient pertinents pour explorer les limites de la problématique (le type d'arbre de la forêt tropicale humide et celui de la forêt tempérée sèche), le schéma hydrologique le plus simple en sachant qu'un schéma proposant une description plus complexe de la stratification du sol existe et a vocation à remplacer complètement le schéma simple utilisé ici, et surtout sans module de végétation dynamique. Ce dernier permet de déterminer la composition végétale (répartition entre les différents types de plante) la plus adaptée à des conditions climatiques ; l'utiliser suppose alors d'accepter des règles de composition végétale *a priori*, ce qui n'était pas l'objet de ce travail. Ce niveau de modélisation est donc délibérément simplifié pour concentrer l'analyse sur une question : celle du potentiel climatique de maintien d'un couvert arboré dans l'ensemble des régions tropicales semi-aride des périodes actuelles et futures. Les résultats ainsi obtenus ont vocation à encadrer ce potentiel climatique, à l'échelle globale.

La poursuite de ce travail devra donc consister premièrement à améliorer la qualité des résultats obtenus dans le cadre de ce protocole.

Approfondissement des résultats

Un des axes prioritaires d'approfondissement est constitué par l'**évaluation de la performance du modèle de végétation dans les zones tropicales semi-arides** et son amélioration en conséquence. Peu de travaux existent à ce jour dans ce contexte. L'évaluation du modèle dans ces régions a fait l'objet d'une partie d'une thèse publiée en 2012 (Brender, 2012) sur la base de données recueillies sur un site sahélien : les principaux défauts de la configuration par défaut du modèle sont pointés et une amélioration des performances du modèles via l'optimisation numérique de certains paramètres est réalisée.

Un autre axe d'approfondissement est constitué par l'**augmentation du nombre de PFT** représentés dans les simulations. En effet, pour simuler les arbres implantés dans les futures régions « tropicales » semi-arides, situées pour une grande partie en-dehors des limites strictes de la ceinture tropicale, il serait peut-être plus réaliste de prendre en compte une sensibilité accrue aux variations de température. L'approche adoptée ici repose sur la délimitation d'une enveloppe bioclimatique fondée sur les valeurs annuelles de température et de précipitations, ainsi que sur la répartition saisonnière de ces dernières, mais ignore la variabilité intra-annuelle et journalière de ces variables. Cette variabilité joue peu dans la phénologie des plantes du domaine tropical semi-aride actuel, ainsi que dans leur représentation par le modèle ORCHIDEE. Dans les limites subtropicales de ce domaine, en revanche, les arbres des écosystèmes en place ont des caractéristiques de fonctionnement influencées par les variations de température, en particulier, et il n'est pas réaliste d'envisager le remplacement total de ces espèces par celles des régions tropicales semi-arides actuelles. Pour simuler l'évolution du comportement de ces plantes, l'introduction d'autres types fonctionnels semble indispensable. Une piste alternative serait le recours à la représentation de la végétation selon des « traits fonctionnels » permettant de mieux représenter l'évolution adaptative des plantes aux changements de conditions climatiques. Ces approches, prometteuses, ne sont cependant pas encore opérationnelles, surtout pour les milieux tropicaux semi-arides.

Un troisième axe porte sur le protocole expérimental : alors que les expériences ont été réalisées en climat stabilisé, il sera intéressant d'**explorer la réponse de la végétation à une évolution continue des conditions climatiques**. Le principe serait de réaliser une expérience constituée d'un jeu de simulations démarrant d'un état stabilisé à la période actuelle et se poursuivant dans le futur selon les différents scénarios climatiques. L'objectif d'une telle expérience serait de répondre à la question de la pérennité future des couverts mis en place, dans l'idée d'optimiser non seulement leur performance future mais aussi leur performance globale sur les décennies à venir. Une telle expérience pose plusieurs questions méthodologiques non triviales et demanderait d'élaborer un protocole plus complexe que celui suivi ici : par exemple en « relançant » des plantations arborées périodiquement (tous les dix ans environ).

Poursuite des travaux pour répondre à la problématique

Au-delà de la consolidation des résultats envisagée ci-dessus, l'étude de la problématique demande un élargissement des travaux vers l'échelle globale, vers l'échelle locale et vers la dimension sociétale.

A l'échelle globale, la réalisation de simulations couplées surface-atmosphère permettrait d'évaluer l'effet de la rétroaction du fonctionnement de la végétation implantée sur le climat, qui pourrait entraîner une modification des conditions climatiques. Il existe des travaux dans ce sens, reposant soit sur des scénarios extrêmes de reforestation, soit sur des scénarios réalistes (par exemple Davin *et al.* (2014)). Ceux-ci pourraient être améliorés en imaginant un scénario de reforestation à hauteur du potentiel arboré évalué avec le modèle non couplé (chapitre 3). Par ailleurs, l'effet rétroactif de la végétation sur les variables atmosphériques au niveau du point de grille pourrait affecter les flux turbulents et modifier les conditions microclimatiques (par exemple la température de surface), et ces changements pourraient conduire à une évolution du potentiel arboré, en modifiant, par exemple, la réserve d'eau disponible dans le sol. La prise en compte de cet effet pourrait permettre (si la rétroaction est positive) d'améliorer la simulation des impacts de la reforestation sur les services écosystémiques liés aux conditions climatiques locales, qui, comme il a été discuté au chapitre 3, sont mal représentés par le modèle non couplé.

A l'échelle locale, la limite d'évaluation des services écosystémiques ne vient pas, dans ce travail, de la représentation des types de plantes, mais de la restriction des variables accessibles et de la prise en compte des rétroactions atmosphère-végétation, comme déjà évoqué plus haut. Le protocole expérimental mis en oeuvre ici fournit un cadre d'évaluation multi-critère défini à partir de l'intervalle de fraction arborée autorisant le maintien du couvert. La notion d'optimum permet alors d'étudier la sensibilité des différents critères à de petites variations. La relative stabilité des performances de certains critères autour de cet optimum permet d'indiquer les cas dans lesquels plus de latitude peut être accordée à d'autres critères. L'interprétation de ces résultats peut donc être faite selon l'axe d'évolution du potentiel arboré sous l'effet du changement climatique, comme il a été montré au chapitre 4, mais un second axe d'interprétation est celui de la marge de manoeuvre pouvant être accordée à d'autres critères d'évaluation, représentant différents services écosystémiques, au sein des différents régimes identifiés. Cette analyse a été esquissée au chapitre 3. Les limites de la méthodologie du protocole expérimental pour réellement analyser différents services écosystémiques sont alors apparues. C'est pourquoi cette analyse des changements futurs n'a pas été jugée pertinente. Il sera nécessaire de quitter l'échelle globale pour approfondir l'évaluation des effets de la reforestation sur différents services écosystémiques aux échelles régionales et locales, à l'aide de modèles plus spécialisés. Les variables comme la production de bois d'oeuvre, de combustible, de fruits, ainsi que la réserve d'eau dans le sol, la structure du sol, la fertilisation azotée (dans le cas des légumineuses très présentes parmi les ligneux des régions semi-arides), relèvent de propriétés particulières des différentes espèces d'arbres, et sont fortement influencées par la conduite des peuplements. Des études plus approfondies devraient donc être élaborées à des échelles plus locales, sur des problématiques moins généralistes, et faire appel à des modèles forestiers et écologiques plus précis : des pratiques adaptées peuvent par exemple optimiser l'utilisation de l'eau de pluie par les arbres (pratique des semis en « demi-lune » par exemple), tandis que la régulation par les feux naturels modifie l'équilibre entre arbres et herbacées.

Sur ces derniers points, une analyse intéressante avant d'orienter l'étude de problématiques plus spécifiques serait de comparer les potentiels arborés simulés à partir d'observations climatiques (chapitre 3) avec le taux d'arborisation effectivement observé sur le terrain. Cette comparaison permettrait de cartographier les zones où le potentiel arboré

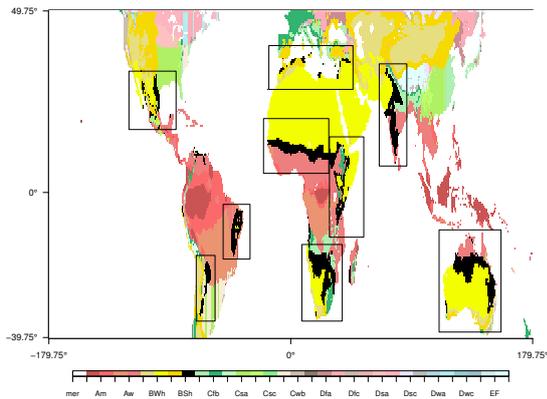
climatique permettrait une augmentation de cette densité, tout en mettant en avant l'influence de facteurs non climatiques, qui ne sont sans doute pas si facilement surmontables.

Nouvelles questions de recherche soulevées par ces résultats

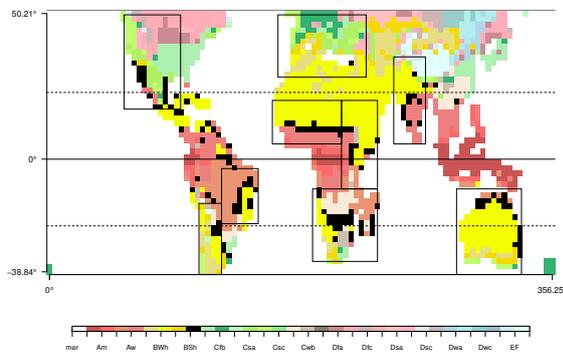
Au-delà de la poursuite des travaux présentés ici, ces résultats soulèvent d'autres questions, non pas nouvelles, mais qui paraissent plus éloignées de la problématique lorsque j'ai commencé à l'aborder.

D'ordre méthodologique, la question de l'influence de la correction de biais des sorties de modèle de climat sur les résultats obtenus relève en partie de la discussion sur l'incertitude inhérente à la recherche climatique, mais le raisonnement suivi ici lui ouvre d'autres perspectives. La correction de biais utilisée ici a été effectuée dans le cadre du programme d'intercomparaison ISI-MIP avec pour objectif de maintenir la cohérence des simulations climatiques utilisées pour forcer les modèles d'impact avec les données d'observation. L'enjeu est d'une part de permettre la comparaison des impacts des changements climatiques futurs avec l'état actuel, d'autre part de satisfaire les conditions d'utilisation de certains modèles d'impacts calibrés à partir de ces données d'observation. Le risque principal de la correction de biais est en effet de perdre la cohérence entre les variables climatiques, corrigées séparément (Hempel *et al.*, 2013). Or l'approche bioclimatique utilisée ici a pour objet d'étude le produit de la combinaison de deux variables, température et précipitations, qui ont donc été corrigées séparément. En outre, il se trouve que la classification bioclimatique a été établie au chapitre 2 à partir des sorties de modèles brutes, et à partir des sorties corrigées au chapitre 4. Ce choix réalisé pour des motifs logistiques pourrait donner l'opportunité de faire une comparaison riche d'enseignements. Cependant, la comparaison entre ces résultats est rendue difficile par le trop petit nombre (deux) de modèles disponibles dans les deux chapitres, et par la différence de résolution spatiale entre données « brutes » et « corrigées ». Sur ce dernier point, tout regrillage introduirait une erreur supplémentaire, compromettant la comparaison.

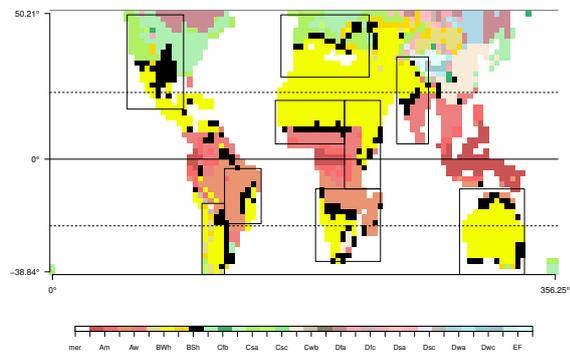
Ainsi, pour le modèle de l'IPSL utilisé avec et sans correction de biais, la comparaison visuelle des cartes de la classification de Köppen pour le début et la fin du 21^e siècle confirme que les résultats obtenus à partir des données corrigées sont plus proches de ceux obtenus à partir d'observations. La répartition des grandes régions tropicales semi-arides est analogue entre les deux types de sorties, pour les deux périodes, pour autant que les différences de résolution permettent d'en juger. Deux exceptions notables apparaissent cependant : en Amérique centrale et dans le nord-est brésilien les conditions sont classées plus arides avec les sorties de modèle non corrigées, pour les deux périodes temporelles. C'est aussi le cas en Australie, pour la période actuelle, de façon plus spectaculaire du fait de la superficie concernée. Lorsqu'un focus est fait, comme ici, sur une classe climatique donnée, les différences de classification induites par la correction de biais ont un effet qui peut se révéler non négligeable sur la caractérisation du domaine occupé par cette classe et sur son évolution. Cette comparaison ne faisait pas partie du travail présenté ici. Cependant, l'approche bioclimatique pourrait constituer un support pertinent pour évaluer l'effet de la correction de biais sur un produit combinant plusieurs variables climatiques. En particulier ici, la difficulté particulière posée par la correction des précipitations en milieu aride (Hempel *et al.*, 2013) trouverait un terrain d'analyse.



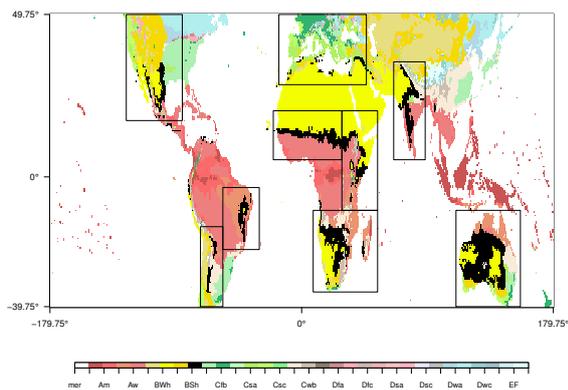
(a) Classification obtenue à partir des données d'observations pour la période



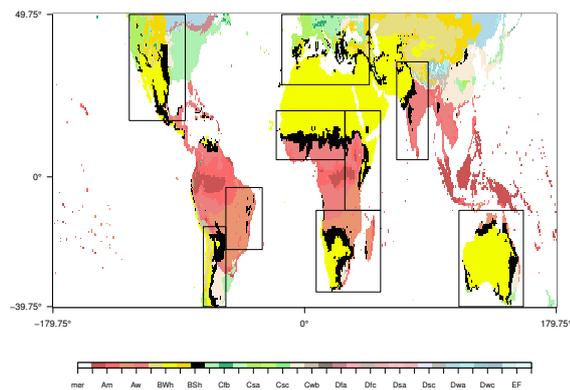
(b) Sorties non corrigées, 1991-2005



(c) Sorties non corrigées, 2086-2099



(d) Sorties corrigées, 1991-2005



(e) Sorties corrigées, 2086-2099

FIGURE 4.30 – Comparaison de la classification de Köppen obtenue à partir de sorties de modèle avec et sans correction de biais. Cartes de la classification de Köppen obtenue pour le modèle de l'IPSL, à partir des sorties non corrigées (en haut) et corrigées (en bas), pour les périodes historique et future.

D'ordre climatique, la question de l'effet de la reforestation des régions « tropicales » semi-arides doit être reposée dans leur positionnement géographique futur. En effet, le raisonnement exposé au chapitre 1 concluait que, sous les latitudes tropicales, effet biochimique (capture du carbone) et effet biophysique convergeaient dans le sens d'un refroidissement global. L'effet biophysique est composé d'effets radiatifs (albedo) et non radiatifs (flux turbulents). Les seconds sont décuplés sous les basses latitudes du fait de l'importance supérieure de l'énergie disponible par rapport aux hautes latitudes, tandis que les premiers sont plus importants sous les latitudes boréales où le contraste d'albedo entre couvert arboré et couvert herbacé ou de sol nu est plus marqué. Or les futures régions « tropicales » semi-arides vont s'étendre sous les latitudes subtropicales, comme il a été montré, dans une zone où le bilan entre ces différents effets est actuellement non concluant. Ces nouvelles régions constitueront-elles donc de bonnes candidates à la reforestation dans un objectif d'atténuation du réchauffement climatique, comme leurs analogues à la période actuelle ? La réponse à cette question se trouve en partie dans l'étude de la nouvelle répartition énergétique dans le futur, à l'échelle globale. Elle remet en cause la définition actuelle des grandes zones climatiques terrestres.

Une dernière question enfin, d'ordre biologique, concerne la réponse physiologique des plantes à l'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique. Cette réponse peut prendre la forme d'une augmentation de productivité, comme le simule le modèle ORCHIDEE, mais cet effet ne se poursuivra pas indéfiniment, et atteindra un plafond de saturation : à quel moment l'effet de fertilisation pourrait-il cesser de compenser celui de l'aridification des conditions ? Cette saturation peut être induite par l'équilibre entre carbone et azote sur le fonctionnement de la photosynthèse. Ces mécanismes sont encore mal représentés dans les modèles de végétation généralistes comme ORCHIDEE et constituent une piste d'étude cruciale pour l'anticipation des effets du réchauffement climatique sur la végétation des régions limitées en eau. Ainsi, la relation entre potentiel arboré et indice d'aridité constatée dans la période actuelle (chapitre 3) n'est pas maintenue dans le futur (chapitre 4). Cela laisse supposer qu'une classification climatique comme celle de Köppen ne peut pas être utilisée indifféremment dans toutes les conditions climatiques, mais doit être réactualisée en fonction des conditions, notamment de concentration en CO₂ atmosphérique.

Transfert des résultats en contexte d'incertitude

Ce travail recèle bien sûr de nombreuses limites. Cependant, le transfert des résultats vers les autres acteurs impliqués dans la problématique, qu'il s'agisse de scientifiques d'autres disciplines ou d'acteurs en lien avec le terrain, peut être amorcé dès à présent, en dépit de l'incertitude qui leur est associée. Cette idée s'appuie sur l'analyse d'un colloque consacré à la gestion de l'incertitude dans l'adaptation au changement climatique à laquelle j'ai participé. J'ai ainsi collaboré avec un groupe d'étudiants inscrits dans diverses disciplines (climatologie, géographie, économie et sociologie) pour analyser les interventions de ce colloque et réfléchir aux questions soulevées de manière interdisciplinaire. Le résultat de ce travail est synthétisé sous forme d'un article co-signé dans la revue de l'ID-DRI, et présenté en annexe de ce manuscrit (Quilcaille *et al.*, 2015). Une des conclusions que nous avons tirée était que la gestion de l'incertitude associée aux résultats scienti-

fiques n'était pas forcément pertinente pour tous les acteurs impliqués dans l'adaptation au changement climatique. Au contraire, véhiculer la notion d'incertitude en même temps que les conclusions scientifiques peut nuire à l'appréhension du message général par les non-spécialistes. Comment, dès lors, prendre en compte cette incertitude dans la transmission des connaissances et dans l'élaboration des stratégies d'adaptation ? Quel niveau d'incertitude doit, et peut, être transmis, et qui porte la responsabilité de cette décision ? Les conclusions issues des échanges au sein d'un panel d'intervenants appartenant au milieu scientifique, aux secteurs industriel et tertiaire et à la fonction publique, étaient ambivalentes : soit l'incertitude doit avoir disparu de l'information délivrée aux décideurs finaux, soit au contraire elle doit leur être transmise, dans une forme permettant à ces décideurs de choisir comment la traiter. La proposition alternative à cette problématique linéaire était d'engager cette transmission d'information scientifique dans un processus itératif entre les scientifiques, les décideurs et les éventuels acteurs intermédiaires. Un tel processus permet d'introduire petit à petit plus de nuance dans les connaissances transmises, et de prendre en compte l'incertitude de manière progressive, une fois les messages-clés appropriés. C'est dans ce cadre que je justifie, dans la présentation de mon travail, le recours à des résultats moyens, souvent sous forme de cartes (par exemple la carte de la figure 2.25 au chapitre 2). Un résultat moyen, sans barre d'erreur ou mesure d'incertitude, permet dans un premier temps de créer un cadre de réflexion commune de partager les implications qui surgissent à différents niveaux, dans différents domaines, à partir de tels messages-clés.

→ Le principal défi méthodologique de ce travail de thèse était d'aborder une problématique appliquée à l'aide d'outils de modélisation globale. L'approche proposée ici se situe à l'interface entre échelles globale et régionale. Elle est proposée comme support d'échange et de confrontation entre les outils et les méthodes relevant de ces différentes échelles, mais aussi entre différentes disciplines. L'enjeu pour la reforestation dans les régions tropicales semi-arides, limitées en ressources naturelles et hébergeant aujourd'hui des populations parmi les plus défavorisées du monde, est de savoir si les conditions climatiques l'autorisent dans leurs délimitations actuelles et futures. La partie strictement tropicale de ces régions soumise à l'aridification sous l'effet du réchauffement climatique n'est pas favorable à une reforestation durable. Cependant, la majeure partie du futur domaine tropical semi-aride, selon un scénario climatique sévère mais réaliste à horizon 2100, montre un potentiel arboré augmenté sous l'effet de l'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique, rendant possible la reforestation dans ces régions. En dépit des nombreuses limitations de ces résultats, leur transfert vers les autres acteurs de la problématique gagnerait à être amorcé sans attendre.

Bibliographie

- Agrawal, A. et Lemos, M.C., Adaptive development. *Nature Climate Change* **5**, 185–187 (2015).
- Ahlström, A., Xia, J., Arneeth, A., Luo, Y. et Smith, B., Importance of vegetation dynamics for future terrestrial carbon cycling. *Environmental Research Letters* **10**, 054019 (2015).
- Ayers, J.M. et Huq, S., Supporting adaptation to climate change : what role for official development assistance? *Development Policy Review* **27**, 675–692 (2009).
- Bala, G., Caldeira, K., Wickett, M., Phillips, T.J., Lobell, D.B. *et al.*, Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **104**, 6550–6555 (2007).
- Berthrong, S.T., Jobbágy, E.G. et Jackson, R.B., A global meta-analysis of soil exchangeable cations, pH, carbon, and nitrogen with afforestation. *Ecological Applications* **19**, 2228–2241 (2009).
- Betts, R.A., Self-beneficial effects of vegetation on climate in an Ocean-Atmosphere General Circulation Model. *Geophysical Research Letters* **26**, 1457–1460 (1999).
- Betts, R.A., Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. *Nature* **408**, 187–190 (2000).
- Bond, W.J., What Limits Trees in C4 Grasslands and Savannas? *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* **39**, 641–659 (2008).
- Bond, W.J., Midgley, G.F. et Woodward, F.I., What controls South African vegetation-climate or fire? *South African Journal of Botany* **69**, 79–91 (2003).
- Bond, W.J., Woodward, F.I. et Midgley, G.F., The global distribution of ecosystems in a world without fire. *New Phytologist* **165**, 525–538 (2005).
- Brender, P., *Modélisation des flux de carbone, d'énergie et d'eau entre l'atmosphère et des écosystèmes de steppe sahélienne avec un modèle de végétation global*, Ph.D. thesis, AgroParisTech (2012).

- Cannon, A.J., Koppen versus the computer : comparing Koppen-Geiger and multivariate regression tree climate classifications in terms of climate homogeneity. *Hydrology and Earth System Sciences* **16**, 217–229 (2012).
- Chen, D. et Chen, H.W., Using the Köppen classification to quantify climate variation and change : An example for 1901–2010. *Environmental Development* **6**, 69–79 (2013).
- Clarke, L., Edmonds, J., Jacoby, H., Pitcher, H., Reilly, J. *et al.*, Scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations. *US Department of Energy Publications* page 6 (2007).
- Claussen, M., Kubatzki, C., Brovkin, V., Ganopolski, A., Hoelzmann, P. *et al.*, Simulation of an abrupt change in Saharan vegetation in the Mid-Holocene. *Geophysical research letters* **26**, 2037–2040 (1999).
- Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.L., Fichet, T. *et al.*, *Long-term Climate Change : Projections, Commitments and Irreversibility*, book section 12, page 1029–1136, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (2013).
- Cox, P.M., Pearson, D., Booth, B.B., Friedlingstein, P., Huntingford, C. *et al.*, Sensitivity of tropical carbon to climate change constrained by carbon dioxide variability. *Nature* **494**, 341–344 (2013).
- Davin, E.L. et de Noblet-Ducoudré, N., Climatic impact of global-scale deforestation : Radiative versus nonradiative processes. *Journal of Climate* **23**, 97–112 (2010).
- Davin, E.L., Seneviratne, S.I., Ciais, P., Ollio, A. et Wang, T., Preferential cooling of hot extremes from cropland albedo management. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **111**, 9757–9761 (2014).
- Davis, S.M. et Rosenlof, K.H., A multidiagnostic intercomparison of tropical-width time series using reanalyses and satellite observations. *Journal of Climate* **25**, 1061–1078 (2012).
- de Noblet-Ducoudre, N., Biosphère terrestre et climat : une complicité mise en évidence. *L'Homme face au climat, Paris* pages 157–176 (2006).
- Devaraju, N., Bala, G. et Modak, A., Effects of large-scale deforestation on precipitation in the monsoon regions : Remote versus local effects. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **112**, 3257–3262 (2015).
- Ducoudré, N.I., Laval, K. et Perrier, A., SECHIBA, a new set of parameterizations of the hydrologic exchanges at the land-atmosphere interface within the LMD atmospheric general circulation model. *Journal of Climate* **6**, 248–273 (1993).
- Ellis, E.C., Anthropogenic transformation of the terrestrial biosphere. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **369**, 1010–1035 (2011).
- Ellis, E.C. et Ramankutty, N., Putting people in the map : anthropogenic biomes of the world. *Frontiers in Ecology and the Environment* **6**, 439–447 (2008).

- Epule, E.T., Peng, C., Lepage, L. et Chen, Z., The causes, effects and challenges of Sahelian droughts : a critical review. *Regional Environmental Change* pages 1–12 (2013).
- Fadl, K. et Sheikh, S., Effect of Acacia senegal on growth and yield of groundnut, sesame and roselle in an agroforestry system in North Kordofan state, Sudan. *Agroforest Syst* **78**, 243–252 (2010).
- Feddema, J.J., A revised Thornthwaite-type global climate classification. *Physical Geography* **26**, 442–466 (2005).
- Feng, S. et Fu, Q., Expansion of global drylands under a warming climate. *Atmos. Chem. Phys* **13**, 081–10 (2013).
- Fernández-Ondoño, E., Serrano, L.R., Jimenez, M.N., Navarro, F.B., Díez, M. *et al.*, Afforestation improves soil fertility in south-eastern Spain. *European Journal of Forest Research* **129**, 707–717 (2010).
- Ffolliott, P.F., Gottfried, G.J. et Rietveld, W., Dryland forestry for sustainable development. *Journal of Arid Environments* **30**, 143–152 (1995).
- Fraedrich, K., Gerstengarbe, F.W. et Werner, P.C., Climate shifts during the last century. *Climatic Change* **50**, 405–417 (2001).
- Fujino, J., Nair, R., Kainuma, M., Masui, T. et Matsuoka, Y., Multi-gas mitigation analysis on stabilization scenarios using AIM global model. *The Energy Journal* pages 343–353 (2006).
- Gardner, R.C., *Technological forests : Engineering nature with tree planting on the Great Plains, 1870-1944*, Ph.D. thesis, MONTANA STATE UNIVERSITY Bozeman (2013).
- Gibbard, S., Caldeira, K., Bala, G., Phillips, T.J. et Wickett, M., Climate effects of global land cover change. *Geophysical Research Letters* **32** (2005).
- GIEC, *Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux des gaz à effet de serre, préparé par le Programme pour les inventaires nationaux des gaz à effet de serre*, Eggleston, H.S. and Buendia, L. and Miwa, K. and Ngara, T. and Tanabe, K. (éds). IGES, Japon (2006).
- Griffiths, J.F., A chronology of items of meteorological interest. *Bulletin of the American Meteorological Society* **58**, 1058–1068 (1977).
- Grünzweig, J.M., Gelfand, I. et Yakir, D., Biogeochemical factors contributing to enhanced carbon storage following afforestation of a semi-arid shrubland. *Biogeosciences Discussions* **4**, 2111–2145 (2007).
- Guo, L.B. et Gifford, R.M., Soil carbon stocks and land use change : a meta analysis. *Global change biology* **8**, 345–360 (2002).
- Hempel, S., Frieler, K., Warszawski, L., Schewe, J. et Piontek, F., A trend-preserving bias correction—the ISI-MIP approach. *Earth System Dynamics* **4**, 219–236 (2013).
- Higgins, S.I. et Scheiter, S., Atmospheric CO₂ forces abrupt vegetation shifts locally, but not globally. *Nature* **488**, 209–212 (2012).

- Hijioka, Y., Matsuoka, Y., Nishimoto, H., Masui, T. et Kainuma, M., Global GHG emission scenarios under GHG concentration stabilization targets. *Journal of Global Environment Engineering* **13**, 97–108 (2008).
- Holmgren, M., Hirota, M., van Nes, E.H. et Scheffer, M., Effects of interannual climate variability on tropical tree cover. *Nature Climate Change* (2013).
- Hu, Y. et Fu, Q., Observed poleward expansion of the Hadley circulation since 1979. *Atmospheric Chemistry and Physics* **7**, 5229–5236 (2007).
- Jackson, R.B., Jobbágy, E.G., Avissar, R., Roy, S.B., Barrett, D.J. *et al.*, Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science* **310**, 1944–1947 (2005).
- Jackson, R.B., Randerson, J.T., Canadell, J.G., Anderson, R.G., Avissar, R. *et al.*, Protecting climate with forests. *Environmental Research Letters* **3**, 044006 (2008).
- Johanson, C.M. et Fu, Q., Hadley cell widening : Model simulations versus observations. *Journal of Climate* **22**, 2713–2725 (2009).
- Jung, M., Reichstein, M. et Bondeau, A., Towards global empirical upscaling of fluxnet eddy covariance observations : validation of a model tree ensemble approach using a biosphere model. *Biogeosciences* **6**, 2001–2013 (2009).
- Jung, M., Reichstein, M., Margolis, H.A., Cescatti, A., Richardson, A.D. *et al.*, Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. *Journal of Geophysical Research : Biogeosciences* **116** (2011).
- Jylhä, K., Tuomenvirta, H., Ruosteenoja, K., Niemi-Hugaerts, H., Keisu, K. *et al.*, Observed and projected future shifts of climatic zones in Europe and their use to visualize climate change information. *Weather, Climate, and Society* **2**, 148–167 (2010).
- Kim, H.J., Wang, B., Ding, Q. et Chung, I.U., Changes in arid climate over north china detected by the koppen climate classification. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II* **86**, 981–990 (2008).
- Kleidon, A., Fraedrich, K. et Heimann, M., A green planet versus a desert world : estimating the maximum effect of vegetation on the land surface climate. *Climatic Change* **44**, 471–493 (2000).
- Klijn, F. et de Haes, H.A.U., A hierarchical approach to ecosystems and its implications for ecological land classification. *Landscape ecology* **9**, 89–104 (1994).
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. et Rubel, F., World map of the Koppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* **15**, 259–263 (2006).
- Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J. *et al.*, A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles* **19**, GB1015 (2005).
- Köppen, W., Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. *Geographische Zeitschrift* **6**, 593–611 (1900).

- Laganier, J., Angers, D.A. et Pare, D., Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation : a meta-analysis. *Global Change Biology* **16**, 439–453 (2010).
- Lal, R., Forest soils and carbon sequestration. *Forest ecology and management* **220**, 242–258 (2005).
- Lal, R., Beyond copenhagen : mitigating climate change and achieving food security through soil carbon sequestration. *Food Security* **2**, 169–177 (2010).
- Lasslop, G., Reichstein, M., Papale, D., Richardson, A.D., Arneeth, A. *et al.*, Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach : critical issues and global evaluation. *Global Change Biology* **16**, 187–208 (2010).
- Lee, X., Forests and climate : a warming paradox. *Science* **328**, 1479–1479 (2010).
- Leggett, J., Pepper, W.J. et Swart, R.J., Emissions scenarios for the IPCC : an update. *Climate change* pages 71–95 (1992).
- Leu, S., Forests and climate : the search for specifics. *Science* **328**, 1479–1480 (2010).
- Lindell, L., Åström, M. et Öberg, T., Land-use change versus natural controls on stream water chemistry in the Subandean Amazon, Peru. *Applied Geochemistry* **25**, 485–495 (2010a).
- Lindell, L., Åström, M. et Öberg, T., Land-use versus natural controls on soil fertility in the Subandean Amazon, Peru. *Science of the Total Environment* **408**, 965–975 (2010b).
- Liu, H., Park Williams, A., Allen, C.D., Guo, D., Wu, X. *et al.*, Rapid warming accelerates tree growth decline in semi-arid forests of inner asia. *Global Change Biology* **19**, 2500–2510 (2013).
- Locatelli, B., Catterall, C.P., Imbach, P., Kumar, C., Lasco, R. *et al.*, Tropical reforestation and climate change : beyond carbon. *Restoration Ecology* **23**, 337–343 (2015).
- Lu, J., Vecchi, G.A. et Reichler, T., Expansion of the hadley cell under global warming. *Geophysical Research Letters* **34** (2007).
- Maier-Reimer, E. et Hasselmann, K., Transport and storage of CO₂ in the ocean — an inorganic ocean-circulation carbon cycle model. *Climate dynamics* **2**, 63–90 (1987).
- Malagnoux, M., Sène, E.H. et Atzmon, N., Forests, trees and water in arid lands : a delicate balance. *UNASYLVA-FAO*- **229**, 24 (2008).
- Mao, R. et Zeng, D.H., Changes in soil particulate organic matter, microbial biomass, and activity following afforestation of marginal agricultural lands in a semi-arid area of Northeast China. *Environmental management* **46**, 110–116 (2010).
- Metzger, M.J., Bunce, R.G.H., Jongman, R.H.G., Sayre, R., Trabucco, A. *et al.*, A high-resolution bioclimate map of the world : a unifying framework for global biodiversity research and monitoring. *Global Ecology and Biogeography* **22**, 630–638 (2013).

- Mitchell, T.D. et Jones, P.D., An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International journal of climatology* **25**, 693–712 (2005).
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K. *et al.*, The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* **463**, 747–756 (2010).
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J. *et al.*, Special report on emissions scenarios : a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Tech. rep., Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA (US), Environmental Molecular Sciences Laboratory (US) (2000).
- Nicholson, S.E., Evolution and current state of our understanding of the role played in the climate system by land surface processes in semi-arid regions. *Global and Planetary Change* **133**, 201–222 (2015).
- Ojima, D.S., Dirks, B.O., Glenn, E.P., Owensby, C.E. et Scurlock, J.O., Assessment of C budget for grasslands and drylands of the world, in *Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes Quantification of Sinks and Sources of CO₂*, pages 95–109, Springer (1993).
- Olson, D.M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E.D., Burgess, N.D., Powell, G.V. *et al.*, Terrestrial Ecoregions of the World : A New Map of Life on Earth A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. *BioScience* **51**, 933–938 (2001).
- Park, J.Y., Bader, J. et Matei, D., Northern-hemispheric differential warming is the key to understanding the discrepancies in the projected sahel rainfall. *Nature Communications* (2015).
- Parungo, F., Li, Z., Li, X., Yang, D. et Harris, J., Gobi dust storms and the Great Green Wall. *Geophysical research letters* **21**, 999–1002 (1994).
- Pitman, A.J., The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. *International Journal of Climatology* **23**, 479–510 (2003).
- Pramova, E., Locatelli, B., Djoudi, H. et Somorin, O.A., Forests and trees for social adaptation to climate variability and change. *WIREs Climate Change* **3**, 581–596 (2012).
- Quilcaille, Y., Chavaillaz, Y., Giguet, S., Jézéquel, A., Rajaud, A. *et al.*, (In)certitudes et adaptation au climat futur : le regard des "acteurs de demain". *Studies Iddri, Paris, France* **4**, 34p (2015).
- Reynolds, J.F., Smith, D.M.S., Lambin, E.F., Turner, B.L., Mortimore, M. *et al.*, Global desertification : building a science for dryland development. *science* **316**, 847–851 (2007).
- Riahi, K., Grübler, A. et Nakicenovic, N., Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change* **74**, 887–935 (2007).

- Rohli, R.V., Joyner, T.A., Reynolds, S.J. et Ballinger, T.J., Overlap of global Köppen–Geiger climates, biomes, and soil orders. *Physical Geography* **36**, 158–175 (2015).
- Rotenberg, E. et Yakir, D., Contribution of semi-arid forests to the climate system. *Science* **327**, 451–454 (2010).
- Rubel, F. et Kottek, M., Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorologische Zeitschrift* **19**, 135–141 (2010).
- Rubel, F. et Kottek, M., Comments on : The thermal zones of the Earth by Wladimir Köppen (1884). *Meteorologische Zeitschrift* **20**, 361–365 (2011).
- Sankaran, M., Hanan, N.P., Scholes, R.J., Ratnam, J., Augustine, D.J. *et al.*, Determinants of woody cover in African savannas. *Nature* **438**, 846–849 (2005).
- Scheiter, S. et Higgins, S.I., Impacts of climate change on the vegetation of Africa : an adaptive dynamic vegetation modelling approach. *Global Change Biology* **15**, 2224–2246 (2008).
- Seidel, D.J., Fu, Q., Randel, W.J. et Reichler, T.J., Widening of the tropical belt in a changing climate. *Nature geoscience* **1**, 21–24 (2008).
- Sendzimir, J., Reij, C.P. et Magnuszewski, P., Rebuilding resilience in the Sahel : regreening in the Maradi and Zinder regions of Niger. *Ecology and Society* **16**, 1 (2011).
- Snyder, P.K., Delire, C. et Foley, J.A., Evaluating the influence of different vegetation biomes on the global climate. *Climate Dynamics* **23**, 279–302 (2004).
- Stern, H., De Hoedt, G. et Ernst, J., Objective classification of Australian climates. *Australian Meteorological Magazine* **49**, 87–96 (2000).
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J. et Meehl, G.A., An overview of cmip5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* **93**, 485 (2012).
- Tougiani, A., Guero, C. et Rinaudo, T., Community mobilisation for improved livelihoods through tree crop management in Niger. *GeoJournal* **74**, 377–389 (2009).
- Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A. *et al.*, The representative concentration pathways : an overview. *Climatic change* **109**, 5–31 (2011).
- Wang, G. et Eltahir, E.A., Biosphere—atmosphere interactions over West Africa. II : Multiple climate equilibria. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **126**, 1261–1280 (2000).
- Wang, X.M., Zhang, C.X., Hasi, E. et Dong, Z.B., Has the Three Norths Forest Shelterbelt Program solved the desertification and dust storm problems in arid and semiarid China ? *Journal of Arid Environments* **74**, 13–22 (2010).
- Wilson, M.F. et Henderson-Sellers, A., A global archive of land cover and soils data for use in general circulation climate models. *Journal of Climatology* **5**, 119–143 (1985).

- Wise, M., Calvin, K., Thomson, A., Clarke, L., Bond-Lamberty, B. *et al.*, Implications of limiting CO₂ concentrations for land use and energy. *Science* **324**, 1183–1186 (2009).
- Woomer, P.L., Touré, A. et Sall, M., Carbon stocks in Senegal's Sahel transition zone. *Journal of arid environments* **59**, 499–510 (2004).
- Zhang, Y.Q., Liu, J.B., Jia, X. et Qin, S.G., Soil Organic Carbon Accumulation in Arid and Semiarid Areas after Afforestation : a Meta-Analysis. *Polish Journal of Environmental Studies* **22**, 611–620 (2013).
- Zhang, Z., Ramstein, G., Schuster, M., Li, C., Contoux, C. *et al.*, Aridification of the Sahara desert caused by Tethys Sea shrinkage during the Late Miocene. *Nature* **513**, 401–404 (2014).

Liste des acronymes

AI	Aridity Index (indice d'aridité)
AR4	4th Assessment Report 2007 (quatrième rapport du GIEC)
AR5	5th Assessment Report 2014 (cinquième rapport du GIEC)
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project Phase 5
CRU	Climate Research Unit
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
GCM	modèles de circulation générale
GDD	Growing Degree-Day (degré-jour de croissance)
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
IPSL	Institut Pierre et Simon Laplace
LSCE	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
ORCHIDEE	Organising Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems (modèle de surface continentale)
P	Précipitations
Pann	Précipitation annuelle
PE	Evapotranspiration potentielle
Pth	seuil Pth : seuil de sécheresse, exprimé en mm de pluie
RCP	Representative Concentration Pathways (scénarios climatiques futurs pour l'AR5)
REED+	Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation (programme des Nations-Unies)
SRES	Special Report on Emissions Scenarios (scénarios climatiques futurs pour l'AR4)
Tair	Température de l'air moyenne annuelle
Tann	Température de l'air
UNCCD	Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification
WWF	World Wildlife Fund
TSA	Tropical Semi-Aride

Annexes

Annexe Chapitre 2

Evolution de la limite nord incluant la majeure partie du domaine tropical semi-aride au 20^e siècle à partir des modèles

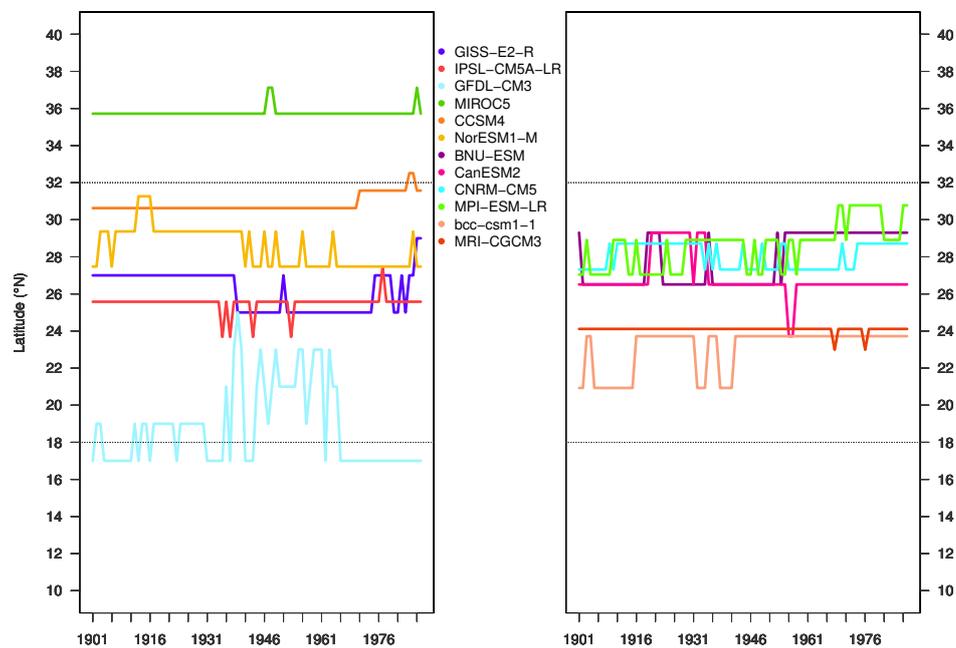


FIGURE A1 – *Evolution de la limite zonale incluant 85% de la surface totale classée chaude semi-aride à partir des sorties de modèles, pour l'hémisphère nord, sur la série des moyennes glissantes par 15 ans. Les modèles ont été arbitrairement répartis en deux sous-groupes sur la figure, afin de faciliter la lecture. Les lignes horizontales pointillées indiquent les limites de l'intervalle de valeurs prises les résultats de référence (CRU) sur l'ensemble du 20^e siècle.*

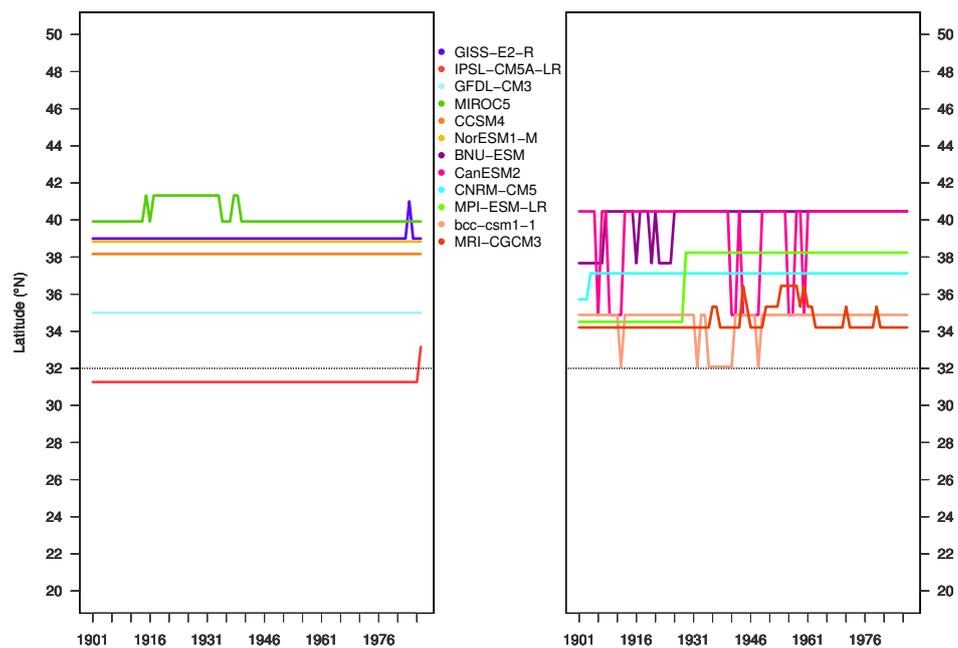


FIGURE A2 – *Evolution de la limite zonale incluant 99% de la surface totale classée chaude semi-aride à partir des sorties de modèles, pour l'hémisphère nord, sur la série des moyennes glissantes par 15 ans. Les modèles ont été arbitrairement répartis en deux sous-groupes sur la figure, afin de faciliter la lecture. Les lignes horizontales pointillées indiquent les limites de l'intervalle de valeurs prises les résultats de référence (CRU) sur l'ensemble du 20^e siècle. Pour représenter la limite d'extension maximale du domaine tropical semi-aride dans l'hémisphère nord, la valeur de 99% est choisie au lieu de 100% de la surface, pour éviter des petites instabilités dans le calcul.*

Evolution de la surface tropicale semi-aride totale obtenue à partir des modèles

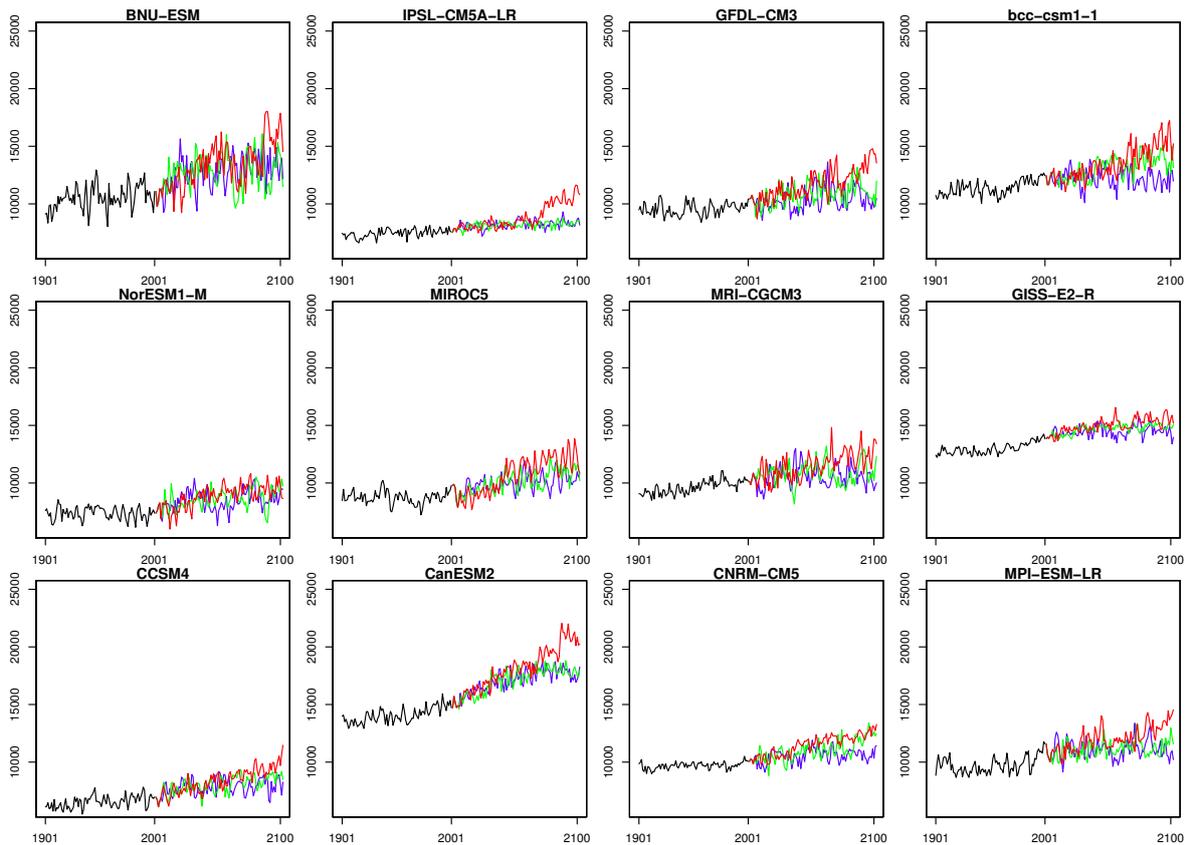


FIGURE A3 – *Evolution de la surface totale chaude semi-aride selon les simulations de modèles pour la période « historique » (1901-2005, en noir), et pour la période « future » (2006-2100) pour trois scénarios (RCP 2.6, 4.5 et 8.5 respectivement en bleu, vert et rouge). Les résultats sont présentés séparément pour chaque modèle, sur les mêmes axes (ordonnées exprimées en milliers de km²).*

Changement de distribution de précipitations totales annuelles pour les surfaces converties à la classe tropicale semi-aride dans le futur

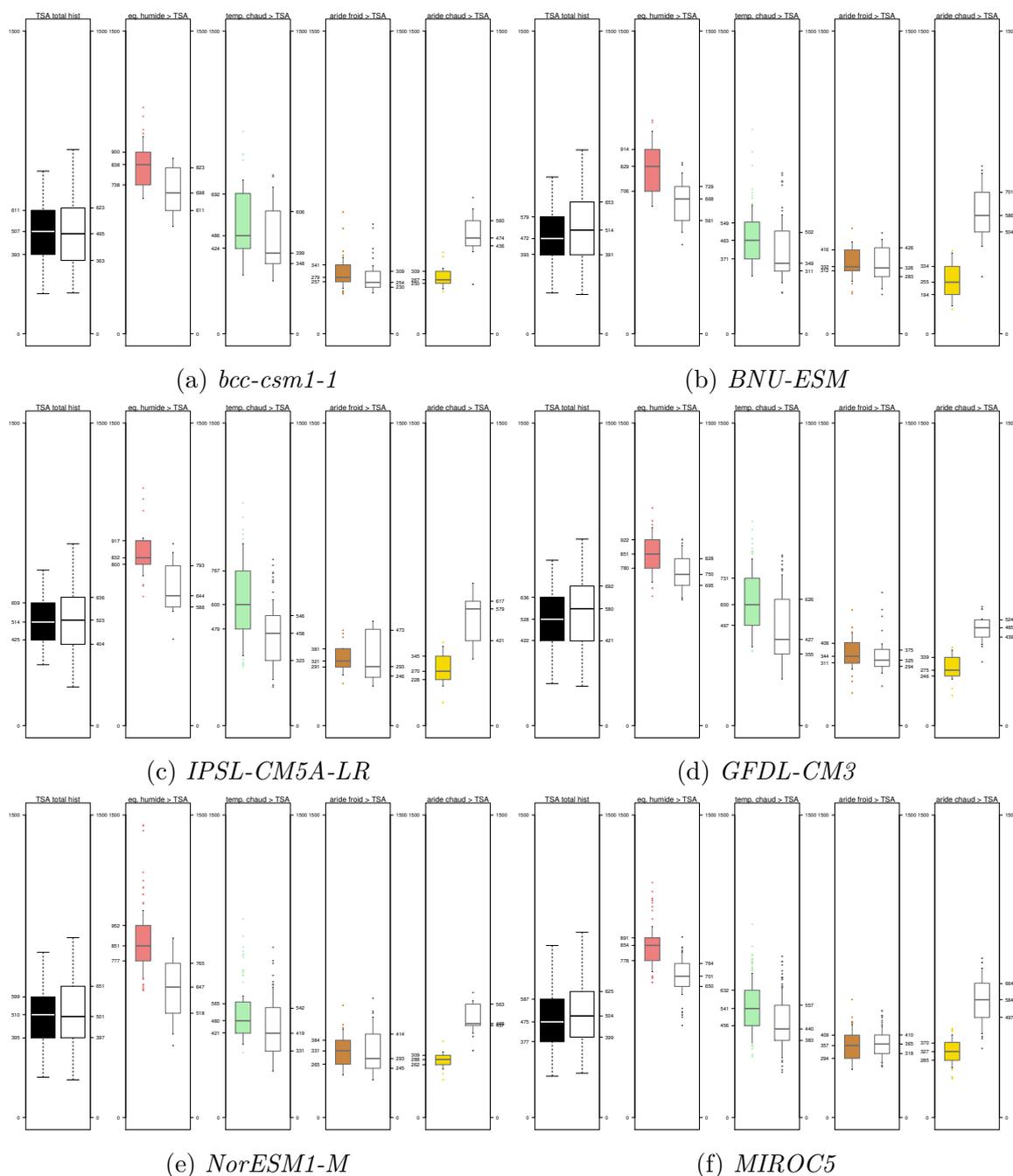


FIGURE A4 – *Evolution de la distribution spatiale des valeurs de sommes de précipitations annuelles pour les nouvelles aires tropicales semi-arides dans le futur.* Chaque sous-figure représente un modèle. Seul le RCP 8.5 est représenté. Pour chaque modèle, le premier compartiment contient les résultats pour l'ensemble du domaine tropical semi-aride au début du 21^e siècle (noir) et à la fin (blanc); les compartiments suivants montrent la dispersion au début (couleur) et à la fin du 21^e siècle (blanc) des valeurs obtenues sur l'aire géographique appartenant au groupe A (rose), C (vert), ou à la classe semi-aride froide (brun) ou aride chaude (jaune) et qui est classée tropicale semi-aride à la fin du siècle. Les ordonnées sont graduées en mm/an.

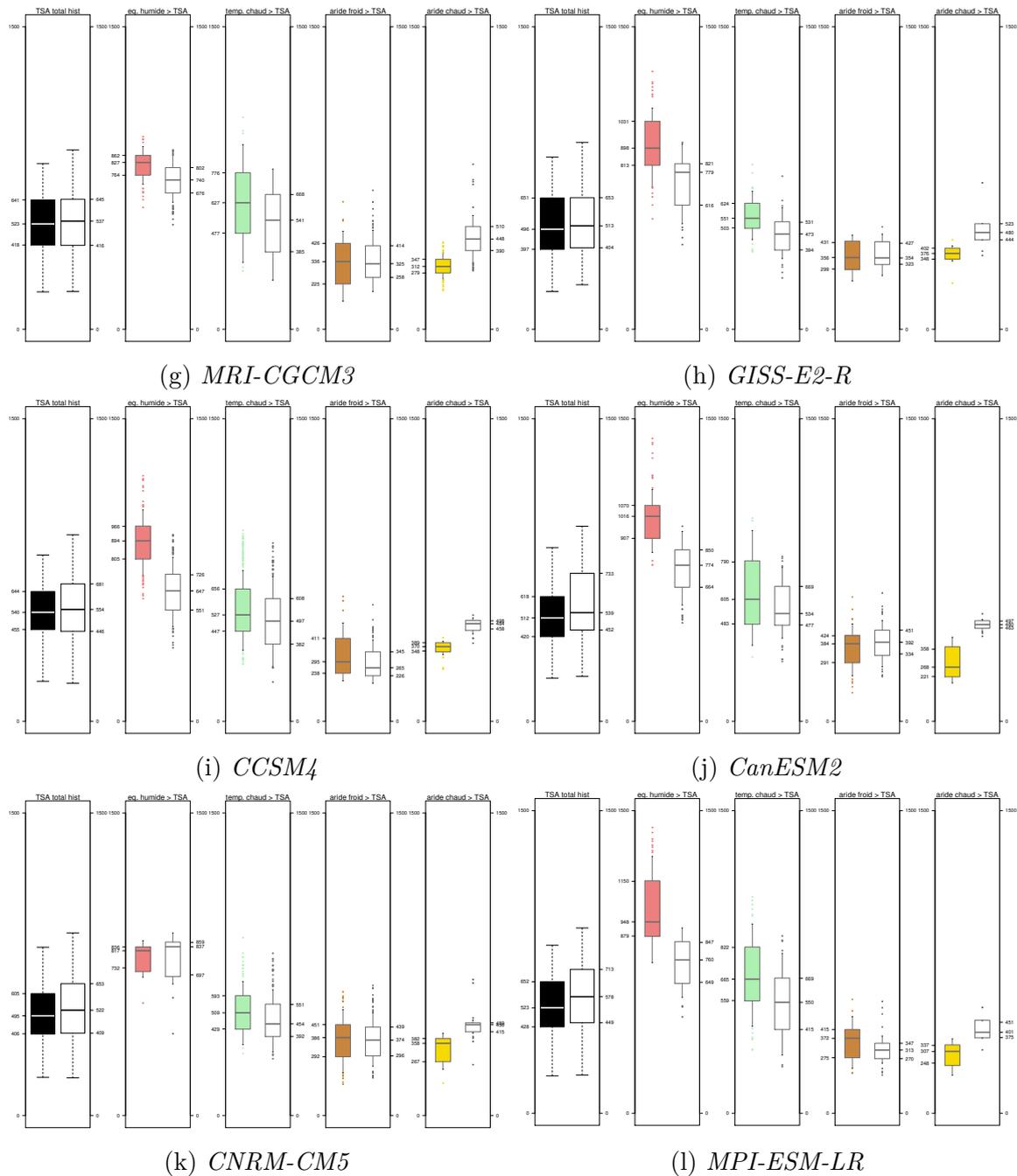


FIGURE A4 – *suite* : Evolution de la distribution spatiale des valeurs de sommes de précipitations annuelles pour les nouvelles aires tropicales semi-arides dans le futur. Chaque sous-figure représente un modèle. Seul le RCP 8.5 est représenté. Pour chaque modèle, le premier compartiment contient les résultats pour l'ensemble du domaine tropical semi-aride au début du 21^e siècle (noir) et à la fin (blanc); les compartiments suivants montre la dispersion au début (couleur) et à la fin du 21^e siècle (blanc) des valeurs obtenue sur l'aire géographique appartenant au groupe A (rose), C (vert), ou à la classe semi-aride froide (brun) ou aride chaude (jaune) et qui est classée tropicale semi-aride à la fin du siècle. Les ordonnées sont graduées en mm/an.

Changement de distribution de températures moyennes annuelles pour les surfaces converties à la classe tropicale semi-aride dans le futur

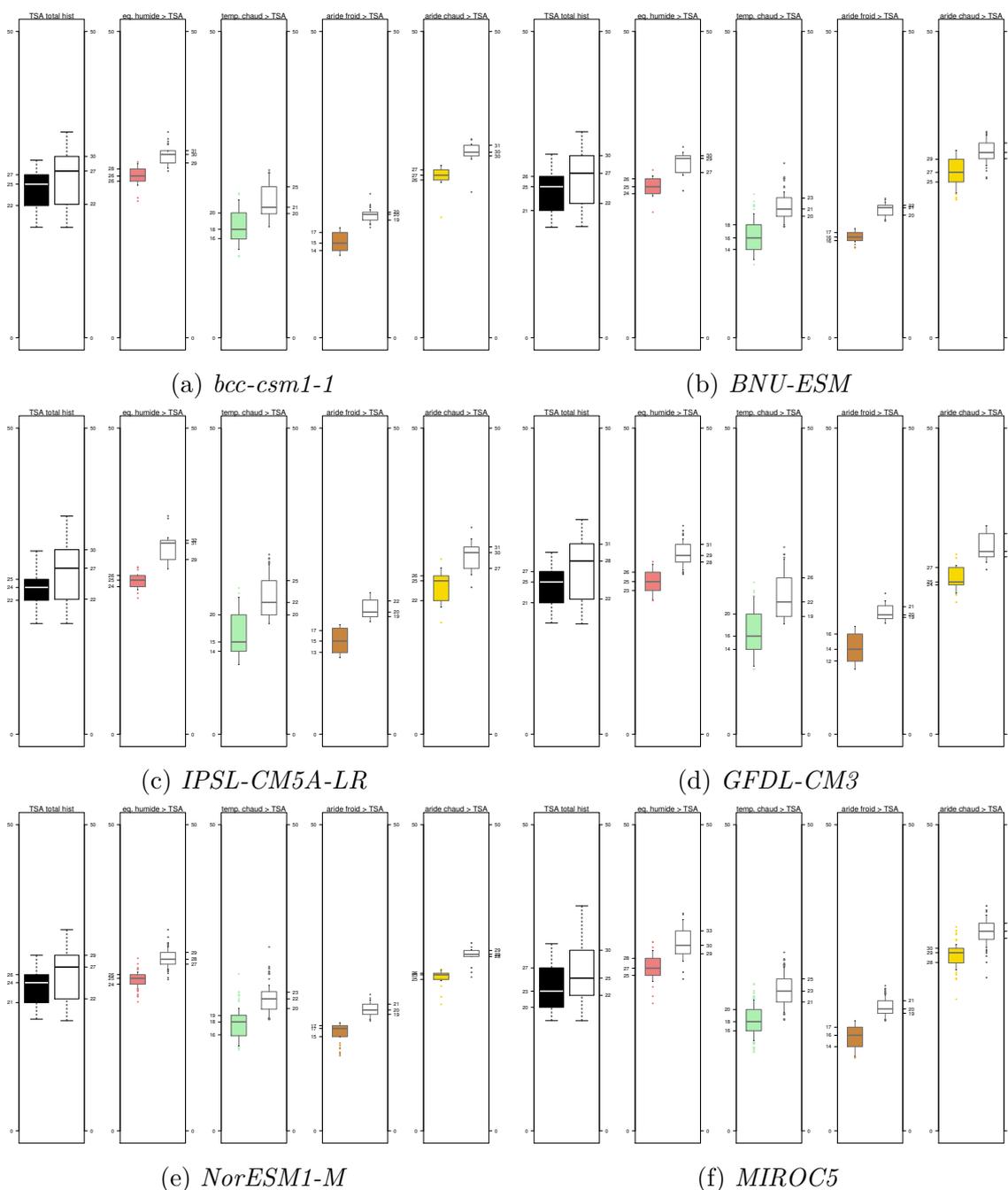


FIGURE A5 – *Evolution de la distribution spatiale des valeurs de températures moyennes annuelles pour les nouvelles aires tropicales semi-arides dans le futur. Chaque sous-figure représente un modèle. Seul le RCP 8.5 est représenté. Pour chaque modèle, le premier compartiment contient les résultats pour l'ensemble du domaine tropical semi-aride au début du 21^e siècle (noir) et à la fin (blanc); les compartiments suivants montrent la dispersion au début (couleur) et à la fin du 21^e siècle (blanc) des valeurs obtenues sur l'aire géographique appartenant au groupe A (rose), C (vert), ou à la classe semi-aride froide (brun) ou aride chaude (jaune) et qui est classée tropicale semi-aride à la fin du siècle. Les ordonnées sont graduées en °C.*

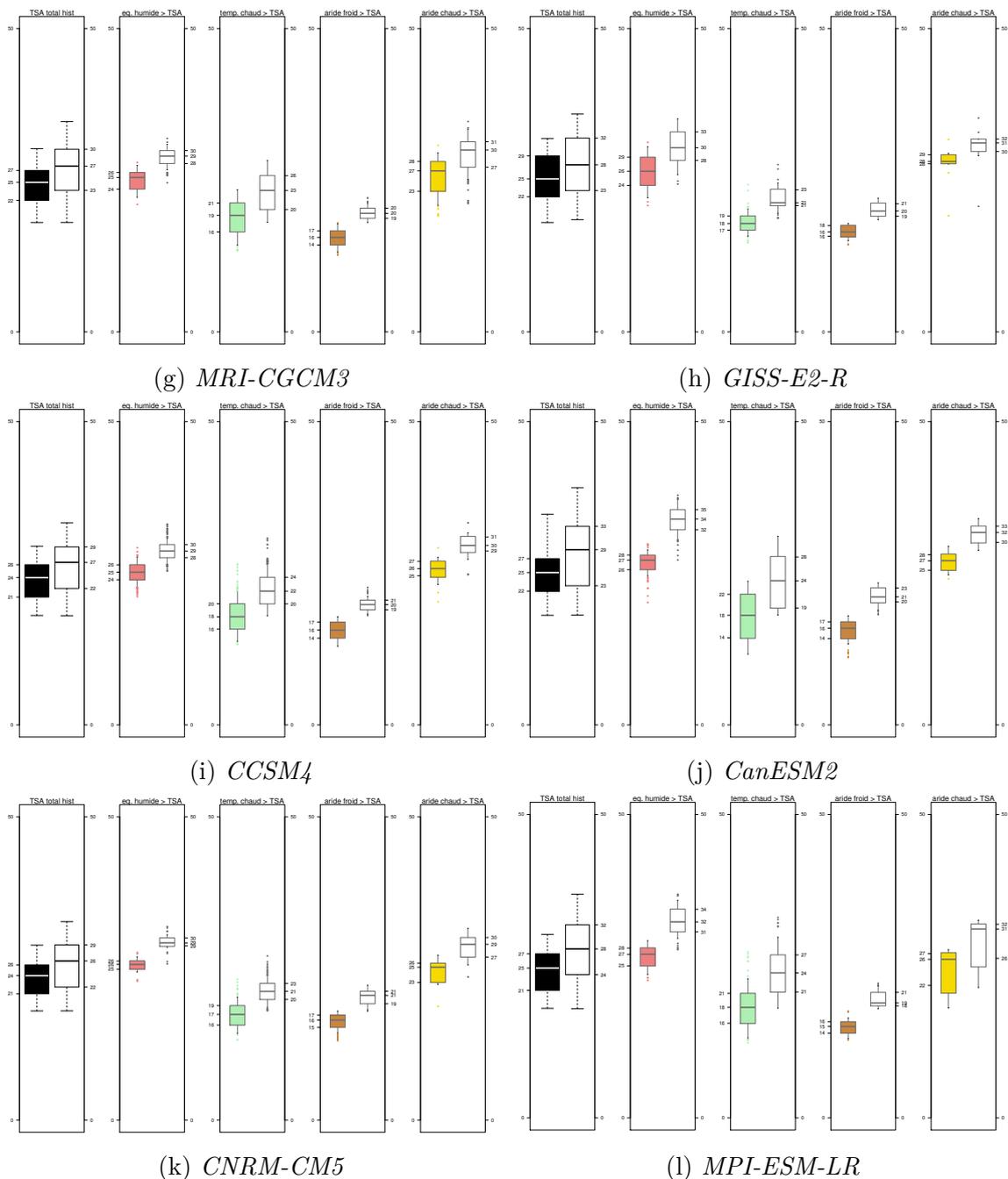


FIGURE A5 – *suite : Evolution de la distribution spatiale des valeurs de températures moyennes annuelles pour les nouvelles aires tropicales semi-arides dans le futur. Chaque sous-figure représente un modèle. Seul le RCP 8.5 est représenté. Pour chaque modèle, le premier compartiment contient les résultats pour l'ensemble du domaine tropical semi-aride au début du 21^e siècle (noir) et à la fin (blanc) ; les compartiments suivants montre la dispersion au début (couleur) et à la fin du 21^e siècle (blanc) des valeurs obtenue sur l'aire géographique appartenant au groupe A (rose), C (vert), ou à la classe semi-aride froide (brun) ou aride chaude (jaune) et qui est classée tropicale semi-aride à la fin du siècle. Les ordonnées sont graduées en °C.*

Cartes de « pedigree » des futures zones tropicales semi-arides, pour le RCP 8.5, pour tous les modèles

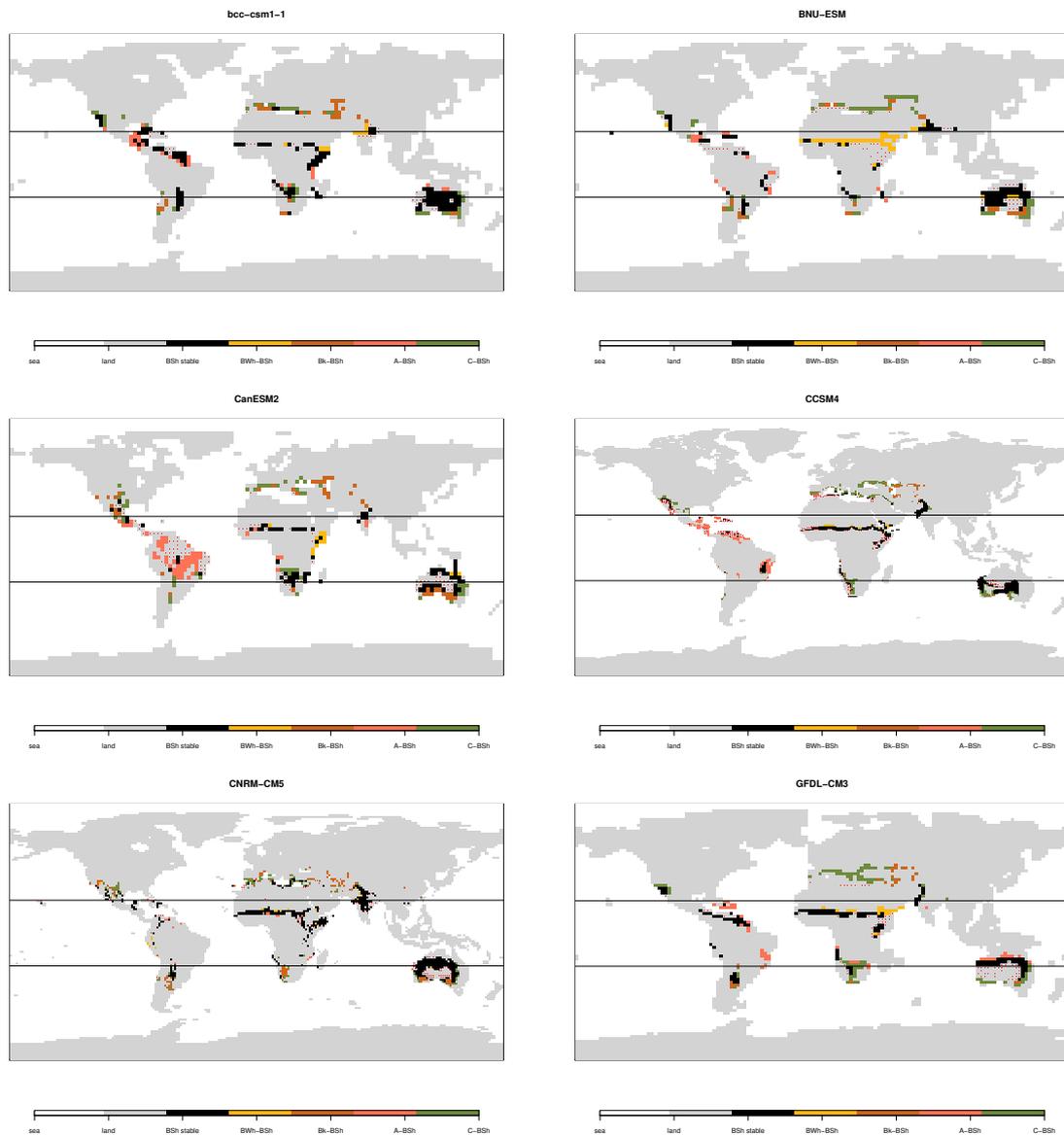


FIGURE A6 – Cartes de « pedigree » des futures zones tropicales semi-arides, pour le RCP 8.5, en fonction de la classe climatique assignée à ces zones à la fin du 20^e siècle (1987-2001). Chaque carte montre les résultats pour un modèle donné, sur sa grille d'origine

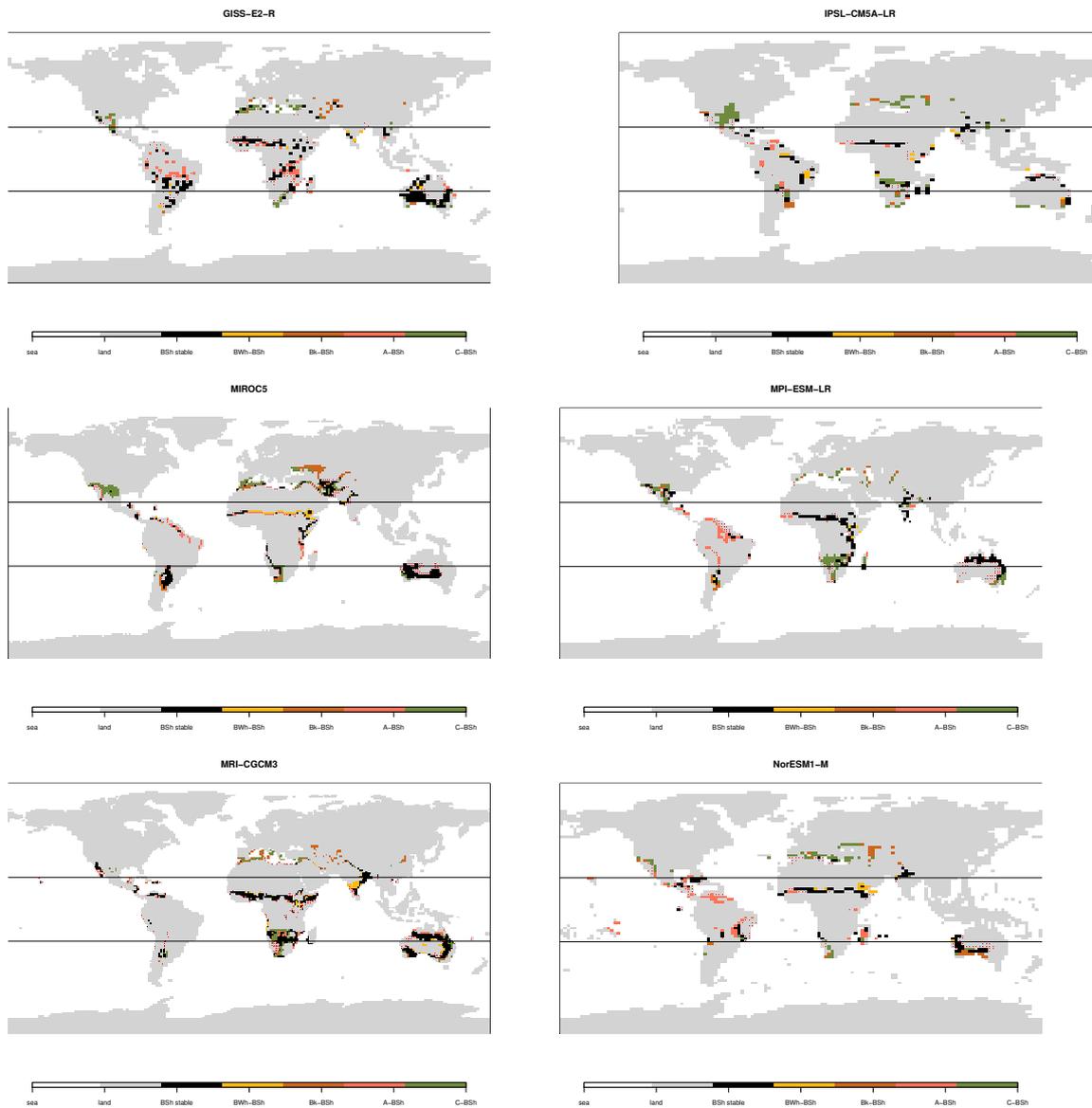


FIGURE A6 – suite : Cartes de « pedigree » des futures zones tropicales semi-arides, pour le RCP 8.5, en fonction de la classe climatique assignée à ces zones à la fin du 20^e siècle (1987-2001). Chaque carte montre les résultats pour un modèle donné, sur sa grille d'origine

Cartes de « pedigree » des futures zones tropicales semi-arides, pour les RCP 2.6 et 4.5, pour la moyenne multi-modèle

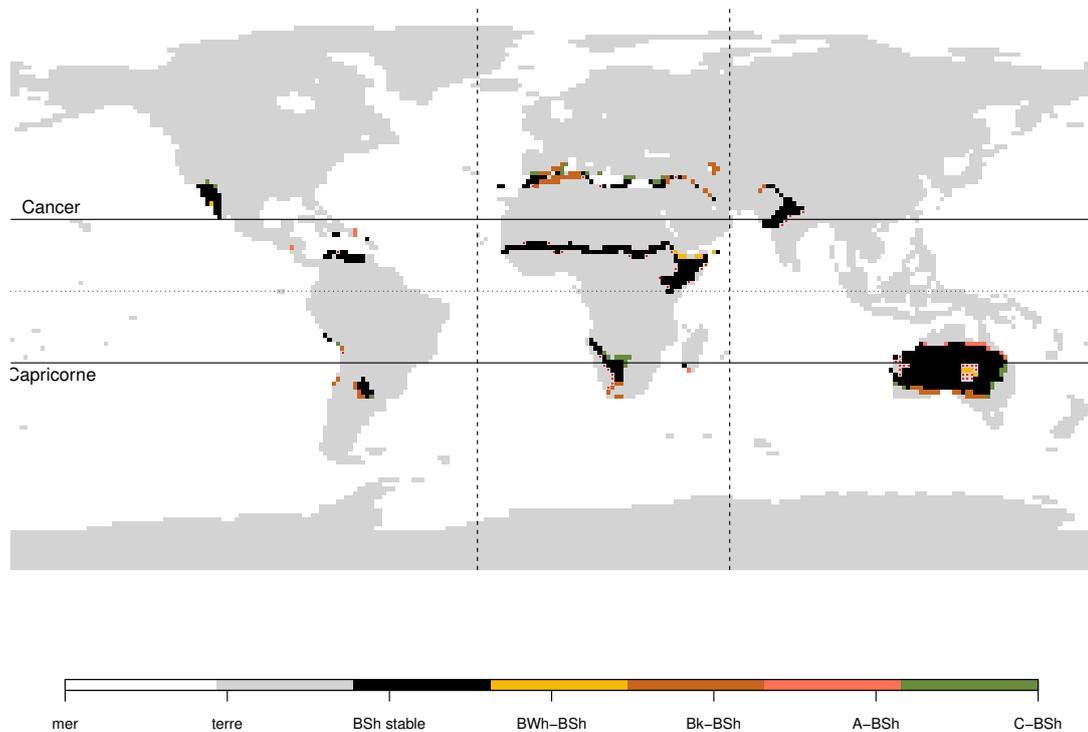


FIGURE A7 – *Carte de « pedigree » du domaine tropical semi-aride futur, pour le RCP 2.6, en fonction de la classe climatique assignée à à chaque point de ce domaine au début du 21^e siècle. Les points représentent les zones tropicales semi-arides au début du 21^e siècle qui seront converties dans une autre classe climatique à la fin du 21^e siècle.*

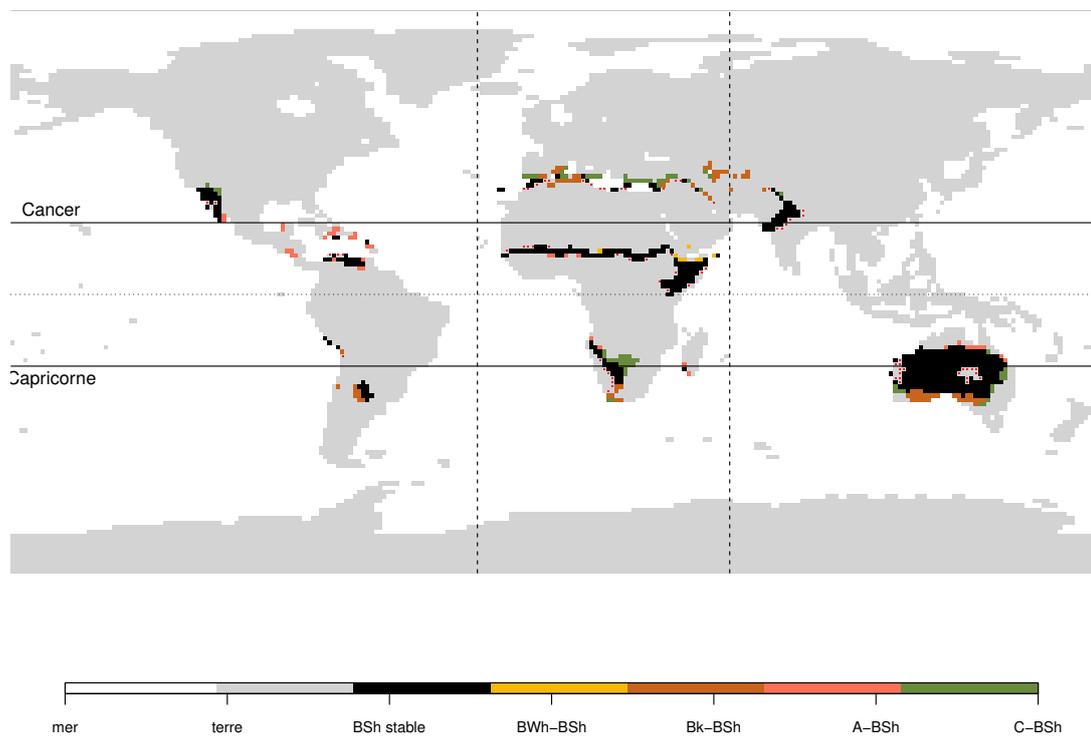


FIGURE A8 – *Carte de « pédigrée » du domaine tropical semi-aride futur, pour le RCP 4.5, en fonction de la classe climatique assignée à à chaque point de ce domaine au début du 21^e siècle. Les points représentent les zones tropicales semi-arides au début du 21^e siècle qui seront converties dans une autre classe climatique à la fin du 21^e siècle.*

**Caractérisation des différents régimes de productivité
en résultat d'expérience de référence (CRU)**

Régime 1

Définition : Le développement des arbres est élevé pour les petites densités arborées, et devient nul pour les celles les plus élevées, pour lesquelles aucun couvert arboré ne peut donc être maintenu.

Surface occupée

Surface (millions ha)	Proportion du domaine tropical semi-aride global (%)
447	47

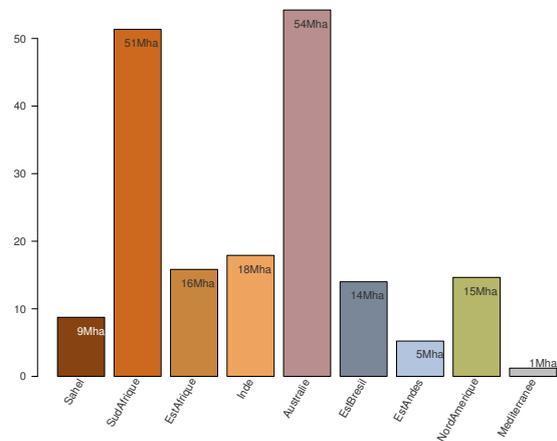


TABLE A1 – *Surface totale assignée au régime 1, pour l'expérience de référence.*

FIGURE A9 – *Surface régionale assignée au régime 1, pour l'expérience de référence.*

Moyennes climatiques

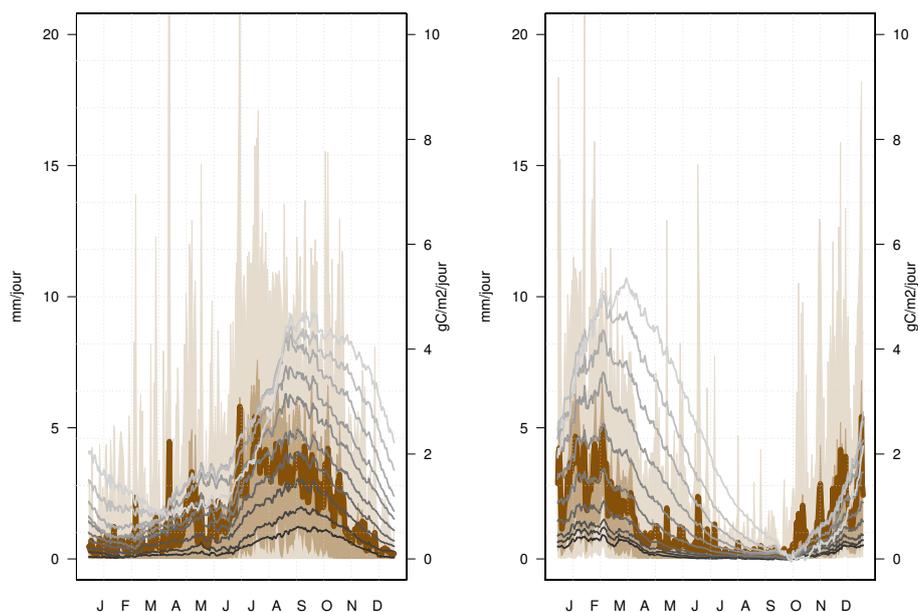
Précipitations annuelles (somme, mm/an)	Température annuelle (moyenne, ° C)	Indice d'aridité P/E (-)
522 [423-605]	23.93 [21.91-26.18]	0.23 [0.17-0.27]

TABLE A2 – *Moyennes climatiques sur la surface globale assignée au régime 1, pour l'expérience de référence. Les valeurs sont calculées sur l'ensemble de la surface assignée au régime 1 dans le domaine tropical semi-aride global. La moyenne est indiquée dans chaque case, accompagnée des valeurs des quantiles 1 et 3 entre crochets.*

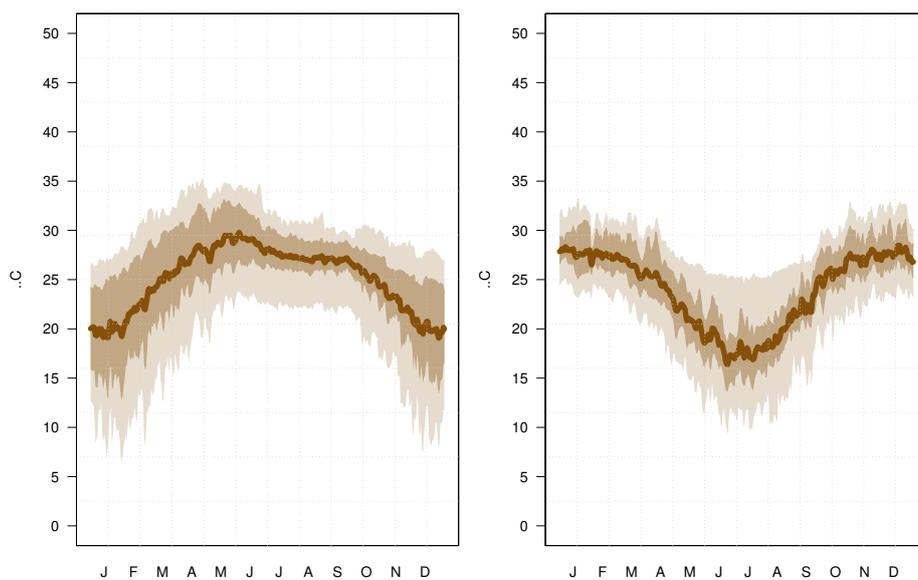
Niveau de productivité arborée

	Productivité totale (kgC/ha/an)	Productivité individuelle (kgC/ha/an)	Biomasse ligneuse totale (kgMat.Sec./ha)
10% arbres	825 [715-922]	8255 [7155-9221]	5079 [2041-7477]
50% arbres	1936 [0-3295]	3872 [0-6589]	14165 [677-19923]
100% arbres	559 [0-0]	559 [0-0]	4877 [308-1529]

TABLE A3 – *Résultats obtenus pour le régime 1, en moyenne globale, pour l'expérience de référence. Les valeurs sont calculées sur l'ensemble de la surface assignée au régime 1 dans le domaine tropical semi-aride global. La moyenne est indiquée dans chaque case, accompagnée des valeurs des quantiles 1 et 3 entre crochets.*



(a) Cycle annuel moyen de précipitations et de NPP.



(b) Cycle annuel moyen de température de l'air.

FIGURE A10 – **Cycles climatiques saisonniers moyens pour le Régime 1**, dans l'expérience de référence. Précipitations journalières (mm/jour) et température de l'air ($^{\circ}\text{C}$) moyennées sur 15 ans pour chaque point de grille, puis sur l'ensemble des points assignés au régime 1 - courbe colorée en gras. Les aplats de couleur montrent la dispersion entre les points de grille : pourcentiles 25 et 75 pour la nuance la plus foncée, et 5 et 95 pour la plus claire. Les hémisphères sont représentées séparément : Hémisphère Nord à gauche, Hémisphère Sud à droite. Les courbes en nuances de gris sur les graphiques du haut représentent la NPP journalière moyenne en $\text{gC}/\text{m}^2/\text{jour}$ (sur 15 ans et sur l'ensemble des points assignés à ce régime), de la fraction la plus faible (gris clair) à la plus élevée (gris foncé).

Régime 2

Définition : Le développement des arbres est élevé pour les petites densités arborées, et jamais complètement nul sur l'ensemble du gradient, mais, pour les densités arborées les plus élevées, il devient très faible.

Surface occupée

Surface (millions ha)	Proportion du domaine tropical semi-aride global (%)
64	7

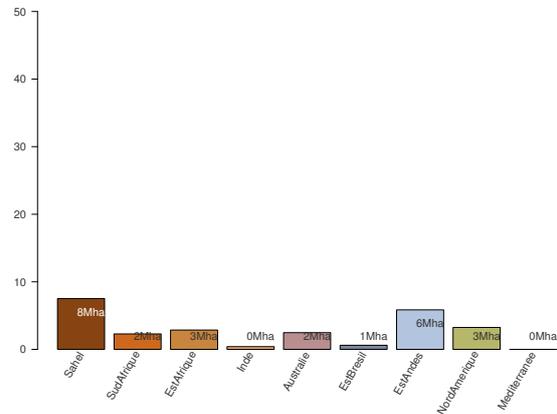


TABLE A4 – *Surface totale assignée au régime 2, pour l'expérience de référence.*

FIGURE A11 – *Surface régionale assignée au régime 2, pour l'expérience de référence.*

Moyennes climatiques

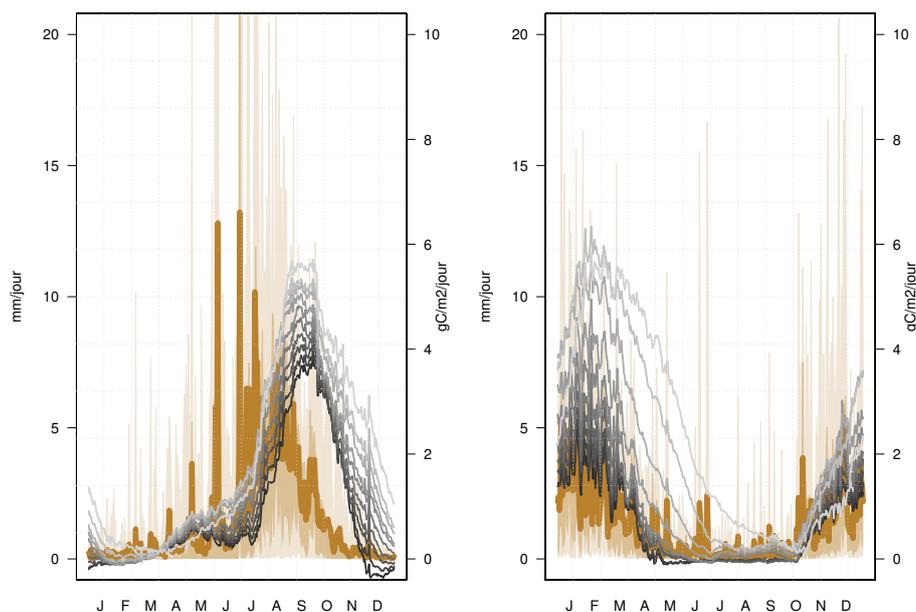
Précipitations annuelles (somme, mm/an)	Température annuelle (moyenne, °C)	Indice d'aridité P/E (-)
490 [452-529]	25.12 [22.71-18.59]	0.22 [0.19-0.24]

TABLE A5 – *Moyennes climatiques sur la surface globale assignée au régime 2, pour l'expérience de référence. Les valeurs sont calculées sur l'ensemble de la surface assignée au régime 2 dans le domaine tropical semi-aride global. La moyenne est indiquée dans chaque case, accompagnée des valeurs des quantiles 1 et 3 entre crochets.*

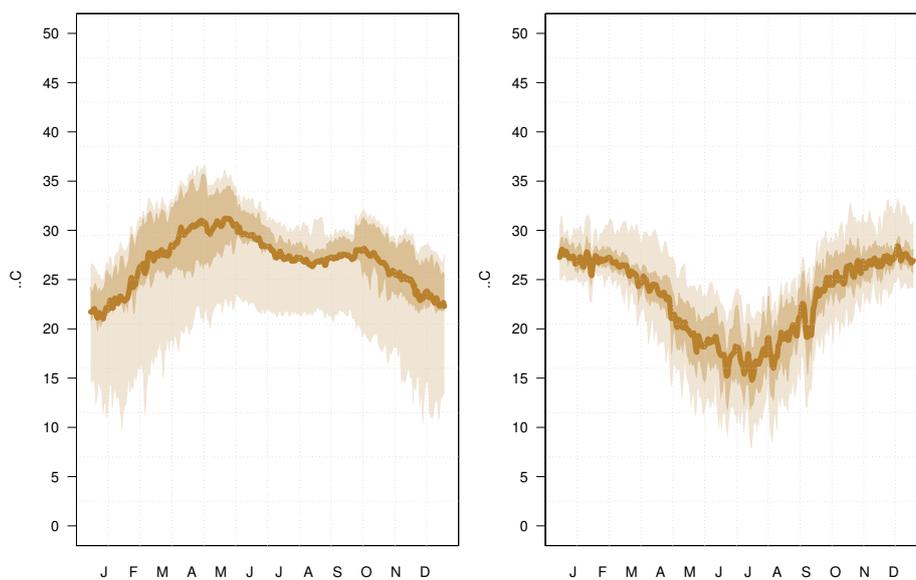
Niveau de productivité arborée

	Productivité totale (kgC/ha/an)	Productivité individuelle (kgC/ha/an)	Biomasse ligneuse totale (kgMat.Sec./ha)
10% arbres	767 [610-891]	7665 [6102-8912]	4438 [1284-7356]
50% arbres	2330 [2003-2686]	4660 [4006-5372]	11376 [6260-15892]
100% arbres	2558 [2200-3023]	2558 [2200-3023]	14716 [11394-15462]

TABLE A6 – *Résultats obtenus pour le régime 2, en moyenne globale, pour l'expérience de référence. Les valeurs sont calculées sur l'ensemble de la surface assignée au régime 2 dans le domaine tropical semi-aride global. La moyenne est indiquée dans chaque case, accompagnée des valeurs des quantiles 1 et 3 entre crochets.*



(a) Cycle annuel moyen de précipitations et de NPP.



(b) Cycle annuel moyen de température de l'air.

FIGURE A12 – **Cycles climatiques saisonniers moyens pour le Régime 2**, dans l'expérience de référence. Précipitations journalières (mm/jour) et température de l'air ($^{\circ}\text{C}$) moyennées sur 15 ans pour chaque point de grille, puis sur l'ensemble des points assignés au régime 2 - courbe colorée en gras. Les aplats de couleur montrent la dispersion entre les points de grille : pourcentiles 25 et 75 pour la nuance la plus foncée, et 5 et 95 pour la plus claire. Les hémisphères sont représentées séparément : Hémisphère Nord à gauche, Hémisphère Sud à droite. Les courbes en nuances de gris sur les graphiques du haut représentent la NPP journalière moyenne en $\text{gC}/\text{m}^2/\text{jour}$ (sur 15 ans et sur l'ensemble des points assignés à ce régime), de la fraction la plus faible (gris clair) à la plus élevée (gris foncé).

Régime 3

Définition : Le développement des arbres est élevé pour les petites densités arborées, jamais nul, mais, pour les densités arborées les plus élevées, il devient moyen.

Surface occupée

Surface (millions ha)	Proportion du domaine tropical semi-aride global (%)
136	14

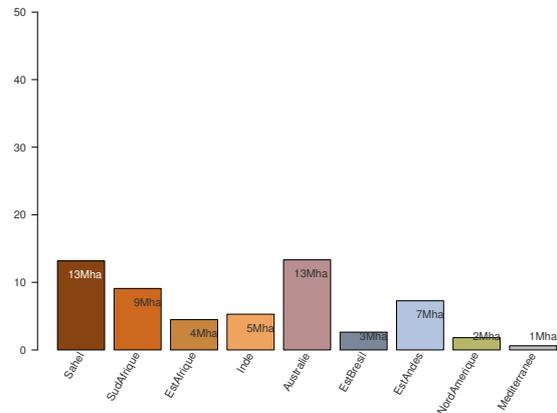


TABLE A7 – *Surface totale assignée au régime 3, pour l'expérience de référence.*

FIGURE A13 – *Surface régionale assignée au régime 3, pour l'expérience de référence.*

Moyennes climatiques

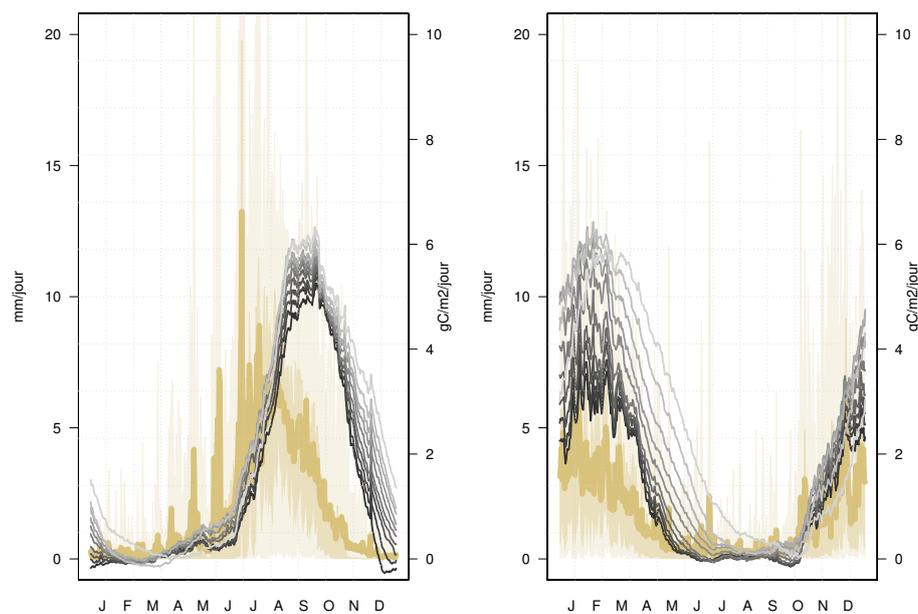
Précipitations annuelles (somme, mm/an)	Température annuelle (moyenne, ° C)	Indice d'aridité P/E (-)
616 [560-665]	24.83 [22.91-27.53]	0.28 [0.25-0.31]

TABLE A8 – *Moyennes climatiques sur la surface globale assignée au régime 3, pour l'expérience de référence. Les valeurs sont calculées sur l'ensemble de la surface assignée au régime 3 dans le domaine tropical semi-aride global. La moyenne est indiquée dans chaque case, accompagnée des valeurs des quantiles 1 et 3 entre crochets.*

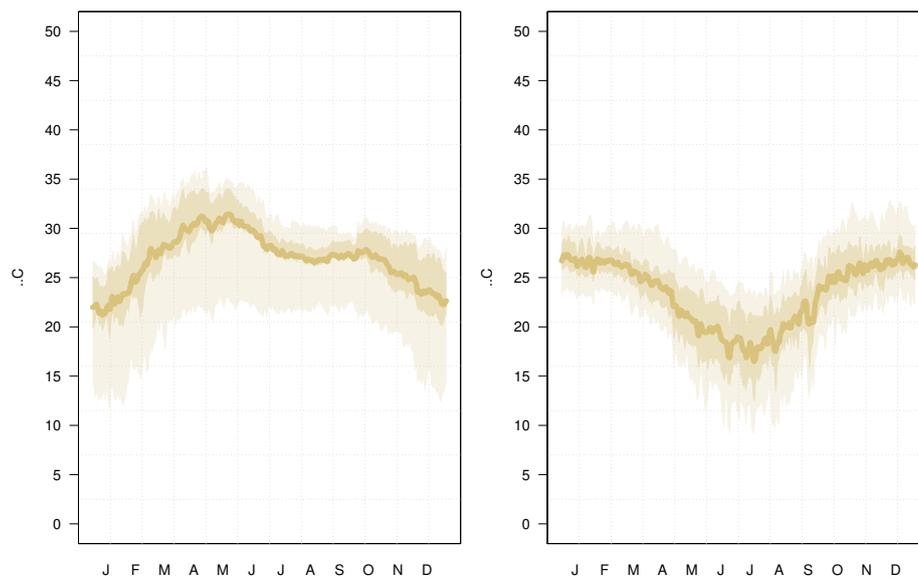
Niveau de productivité arborée

	Productivité totale (kgC/ha/an)	Productivité individuelle (kgC/ha/an)	Biomasse ligneuse totale (kgMat.Sec./ha)
10% arbres	831 [710-936]	8312 [7101-9357]	5453 [1758-9268]
50% arbres	3501 [3132-3856]	7001 [6264-7713]	24631 [9410-37968]
100% arbres	4400 [3845-4981]	4400 [3845-4981]	27635 [17615-36070]

TABLE A9 – *Résultats obtenus pour le régime 3, en moyenne globale, pour l'expérience de référence. Les valeurs sont calculées sur l'ensemble de la surface assignée au régime 3 dans le domaine tropical semi-aride global. La moyenne est indiquée dans chaque case, accompagnée des valeurs des quantiles 1 et 3 entre crochets.*



(a) Cycle annuel moyen de précipitations et de NPP.



(b) Cycle annuel moyen de température de l'air.

FIGURE A14 – **Cycles climatiques saisonniers moyens pour le Régime 3**, dans l'expérience de référence. Précipitations journalières (mm/jour) et température de l'air ($^{\circ}\text{C}$) moyennées sur 15 ans pour chaque point de grille, puis sur l'ensemble des points assignés au régime 3 - courbe colorée en gras. Les aplats de couleur montrent la dispersion entre les points de grille : pourcentiles 25 et 75 pour la nuance la plus foncée, et 5 et 95 pour la plus claire. Les hémisphères sont représentées séparément : Hémisphère Nord à gauche, Hémisphère Sud à droite. Les courbes en nuances de gris sur les graphiques du haut représentent la NPP journalière moyenne en $\text{gC}/\text{m}^2/\text{jour}$ (sur 15 ans et sur l'ensemble des points assignés à ce régime), de la fraction la plus faible (gris clair) à la plus élevée (gris foncé).

Régime 4

Définition : Le développement des arbres est élevé pour toutes les densités arborées, tout en restant négativement influencé par celles-ci.

Surface occupée

Surface (millions ha)	Proportion du domaine tropical semi-aride global (%)
261	28

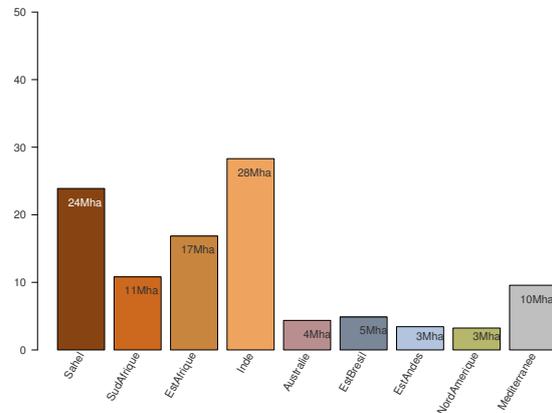


TABLE A10 – *Surface totale assignée au régime 4, pour l'expérience de référence.*

FIGURE A15 – *Surface régionale assignée au régime 4, pour l'expérience de référence.*

Moyennes climatiques

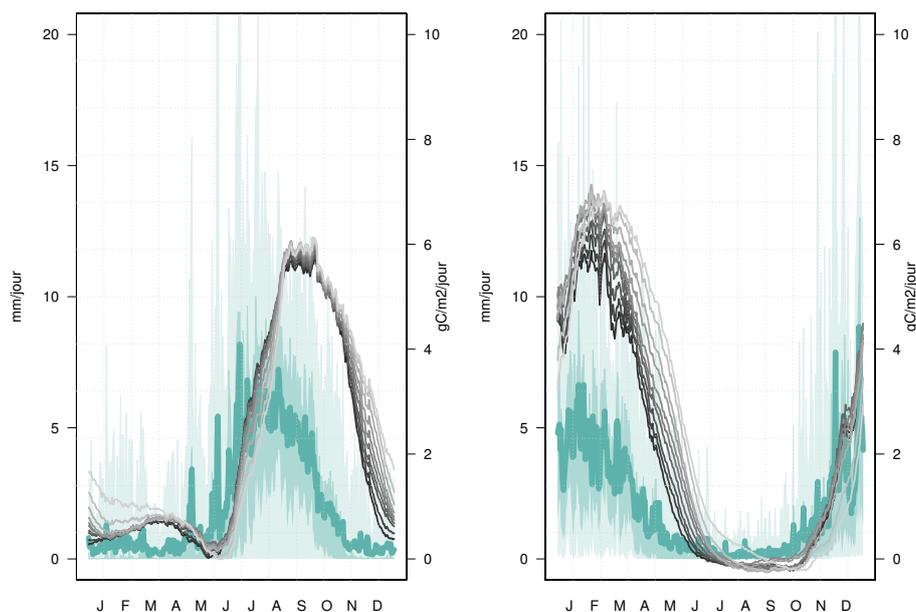
Précipitations annuelles (somme, mm/an)	Température annuelle (moyenne, °C)	Indice d'aridité P/E (-)
711 [650-797]	25.26 [23.15-28.05]	0.39 [0.32-0.42]

TABLE A11 – *Moyennes climatiques sur la surface globale assignée au régime 4, pour l'expérience de référence. Les valeurs sont calculées sur l'ensemble de la surface assignée au régime 4 dans le domaine tropical semi-aride global. La moyenne est indiquée dans chaque case, accompagnée des valeurs des quantiles 1 et 3 entre crochets.*

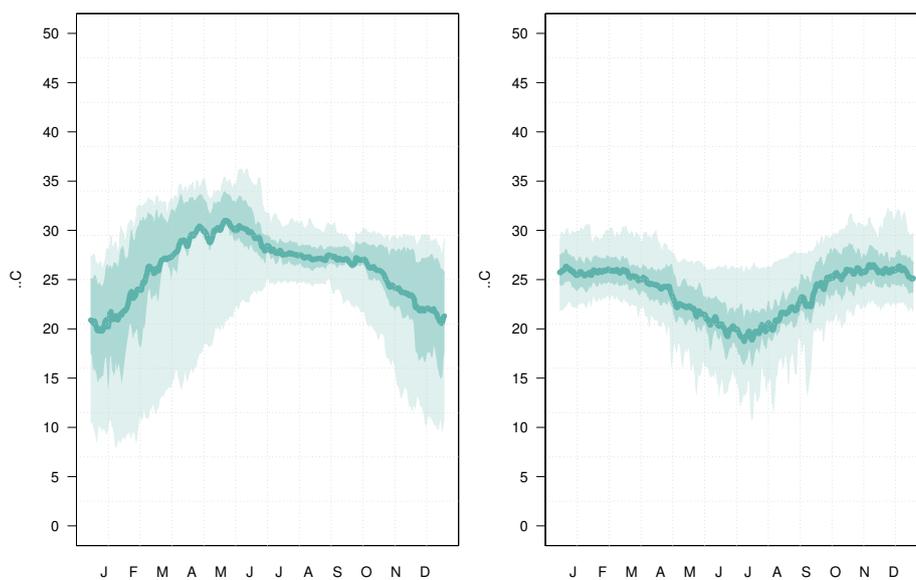
Niveau de productivité arborée

	Productivité totale (kgC/ha/an)	Productivité individuelle (kgC/ha/an)	Biomasse ligneuse totale (kgMat.Sec./ha)
10% arbres	868 [782-940]	8679 [782-9401]	5120 [2687-6518]
50% arbres	4159 [3804-4472]	8317 [7608-8945]	27949 [15204-36284]
100% arbres	7125 [6295-7944]	7125 [6295-7944]	45405 [25544-58297]

TABLE A12 – *Résultats obtenus pour le régime 4, en moyenne globale, pour l'expérience de référence. Les valeurs sont calculées sur l'ensemble de la surface assignée au régime 4 dans le domaine tropical semi-aride global. La moyenne est indiquée dans chaque case, accompagnée des valeurs des quantiles 1 et 3 entre crochets.*



(a) Cycle annuel moyen de précipitations et de NPP.



(b) Cycle annuel moyen de température de l'air.

FIGURE A16 – **Cycles climatiques saisonniers moyens pour le Régime 4**, dans l'expérience de référence. Précipitations journalières (mm/jour) et température de l'air ($^{\circ}\text{C}$) moyennées sur 15 ans pour chaque point de grille, puis sur l'ensemble des points assignés au régime 4 - courbe colorée en gras. Les aplats de couleur montrent la dispersion entre les points de grille : pourcentiles 25 et 75 pour la nuance la plus foncée, et 5 et 95 pour la plus claire. Les hémisphères sont représentées séparément : Hémisphère Nord à gauche, Hémisphère Sud à droite. Les courbes en nuances de gris sur les graphiques du haut représentent la NPP journalière moyenne en gC/m²/jour (sur 15 ans et sur l'ensemble des points assignés à ce régime), de la fraction la plus faible (gris clair) à la plus élevée (gris foncé).

Régime 5

Définition : Le développement des arbres est très élevé pour toutes les densités arborées, et peu influencé par celles-ci.

Surface occupée

Surface (millions ha)	Proportion du domaine tropical semi-aride global (%)
39	4

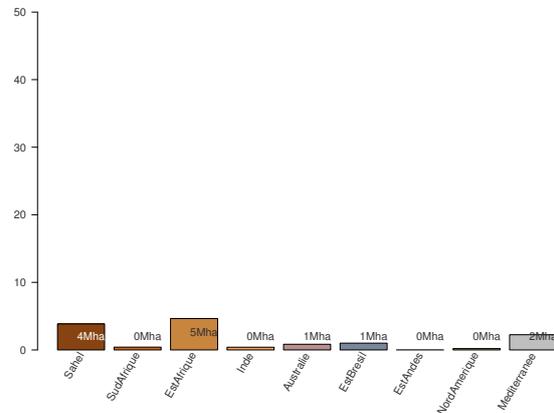


TABLE A13 – *Surface totale assignée au régime 5, pour l'expérience de référence.*

FIGURE A17 – *Surface régionale assignée au régime 5, pour l'expérience de référence.*

Moyennes climatiques

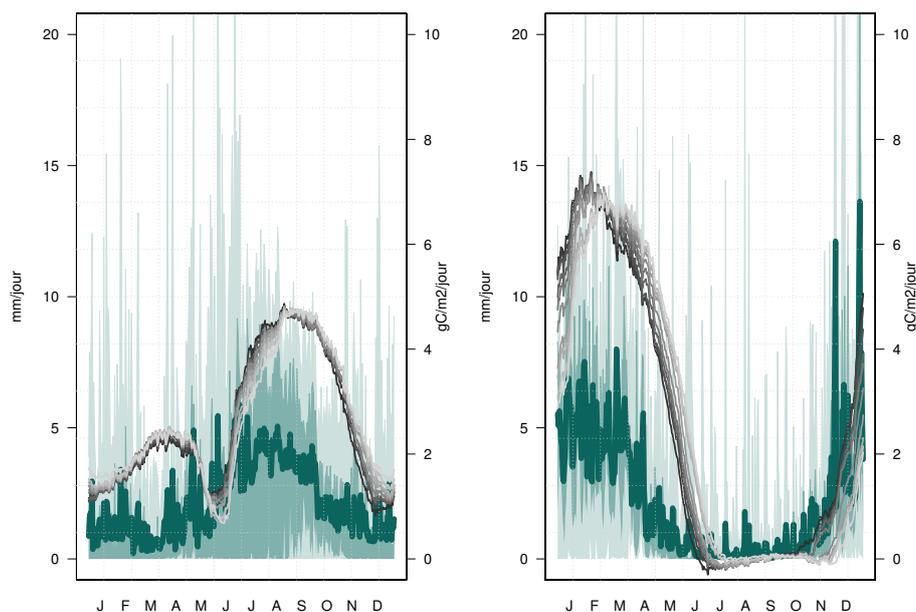
Précipitations annuelles (somme, mm/an)	Température annuelle (moyenne, °C)	Indice d'aridité P/E (-)
791 [656-893]	24.22 [20.04-27.89]	0.50 [0.41-0.52]

TABLE A14 – *Moyennes climatiques sur la surface globale assignée au régime 5, pour l'expérience de référence. Les valeurs sont calculées sur l'ensemble de la surface assignée au régime 5 dans le domaine tropical semi-aride global. La moyenne est indiquée dans chaque case, accompagnée des valeurs des quantiles 1 et 3 entre crochets.*

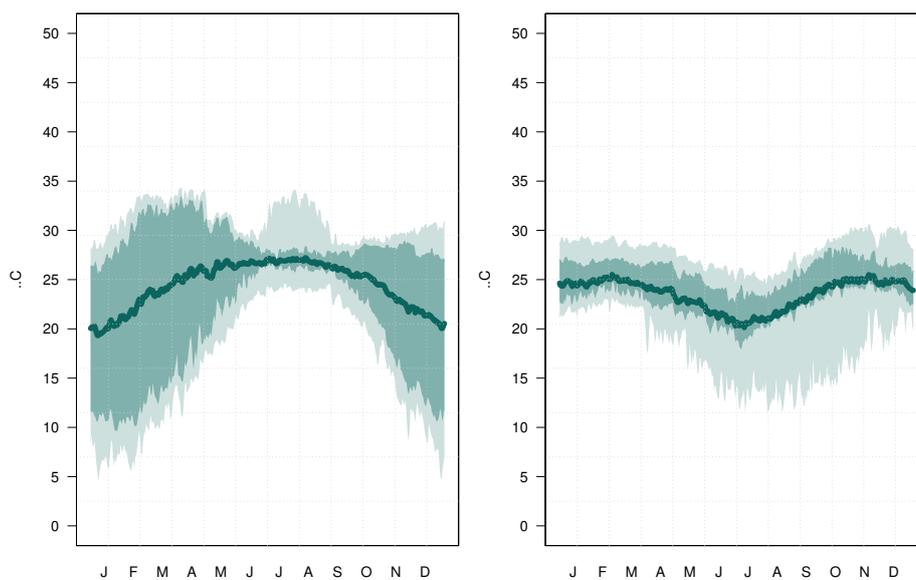
Niveau de productivité arborée

	Productivité totale (kgC/ha/an)	Productivité individuelle (kgC/ha/an)	Biomasse ligneuse totale (kgMat.Sec./ha)
10% arbres	908 [908-996]	9080 [9080-9962]	7514 [4678-9362]
50% arbres	4594 [4594-4888]	9189 [9189-9776]	41373 [27843-52393]
100% arbres	8926 [8926-9382]	8926 [8926-9382]	80361 [54287-100393]

TABLE A15 – *Résultats obtenus pour le régime 5, en moyenne globale, pour l'expérience de référence. Les valeurs sont calculées sur l'ensemble de la surface assignée au régime 5 dans le domaine tropical semi-aride global. La moyenne est indiquée dans chaque case, accompagnée des valeurs des quantiles 1 et 3 entre crochets.*



(a) Cycle annuel moyen de précipitations et de NPP.



(b) Cycle annuel moyen de température de l'air.

FIGURE A18 – **Cycles climatiques saisonniers moyens pour le Régime 5**, dans l'expérience de référence. Précipitations journalières (mm/jour) et température de l'air ($^{\circ}\text{C}$) moyennées sur 15 ans pour chaque point de grille, puis sur l'ensemble des points assignés au régime 5 - courbe colorée en gras. Les aplats de couleur montrent la dispersion entre les points de grille : pourcentiles 25 et 75 pour la nuance la plus foncée, et 5 et 95 pour la plus claire. Les hémisphères sont représentées séparément : Hémisphère Nord à gauche, Hémisphère Sud à droite. Les courbes en nuances de gris sur les graphiques du haut représentent la NPP journalière moyenne en $\text{gC}/\text{m}^2/\text{jour}$ (sur 15 ans et sur l'ensemble des points assignés à ce régime), de la fraction la plus faible (gris clair) à la plus élevée (gris foncé).

Sensibilité relative autour de la fraction arborée optimale, en résultats de l'expérience de référence (CRU)

Sensibilité relative autour de la fraction arborée

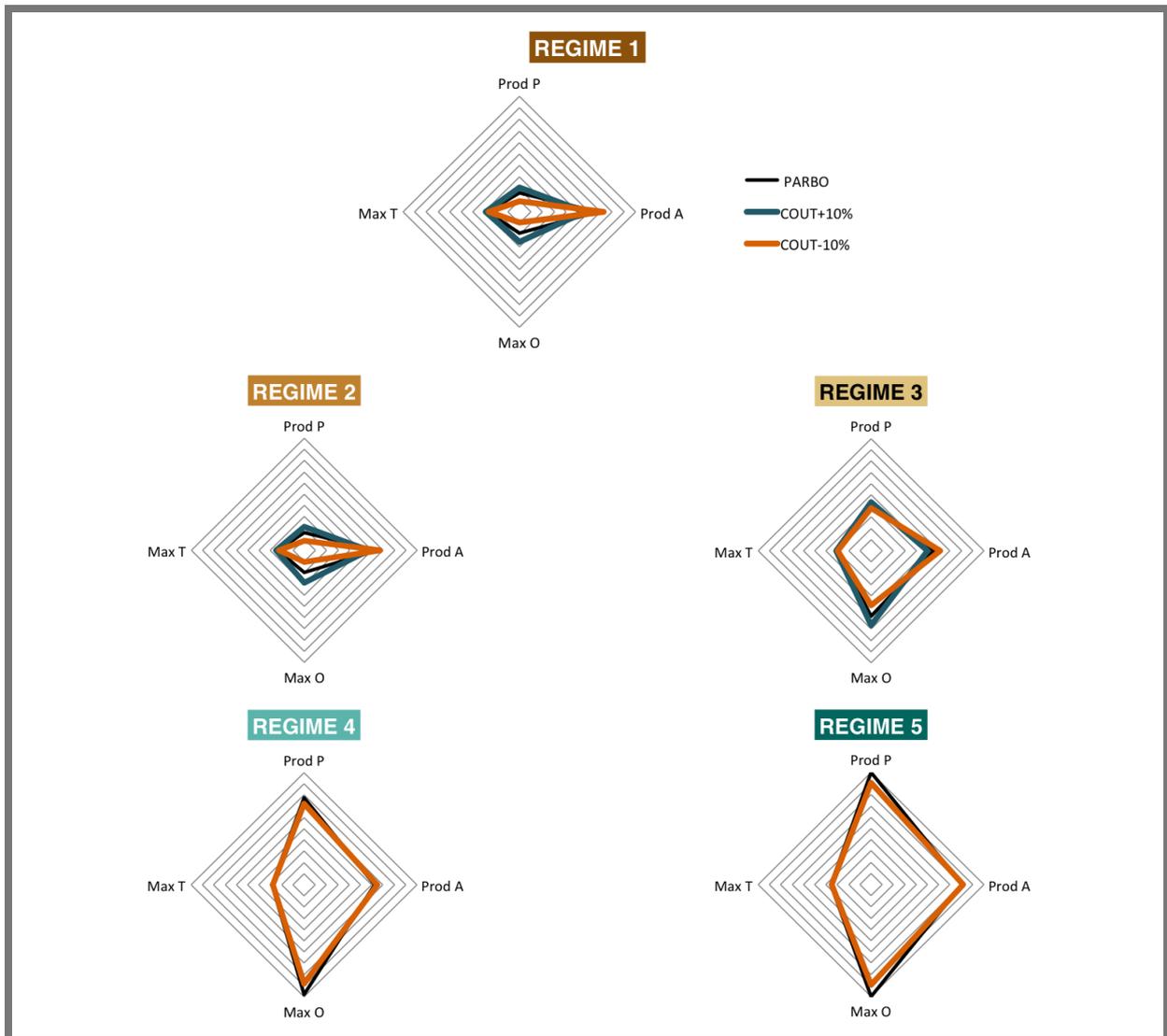


FIGURE A19 – *Pour chaque régime, coût de passer de la fraction arborée optimale à la fraction arborée juste supérieure (en bleu) et juste inférieure (en orangé), pour l'expérience de référence. Les coûts sont absolus, dans l'unité du critère. Les axes ont été dimensionnés de manière à faire ressortir les différences entre régimes, comme dans la figure 3.35. Pour chaque régime, positionnement du potentiel arboré et des valeurs obtenues avec la fraction arborée juste supérieure (en bleu) et juste inférieure (en orangé).*

Planches de résultats multi-modèles

Classification bioclimatique de Koppen

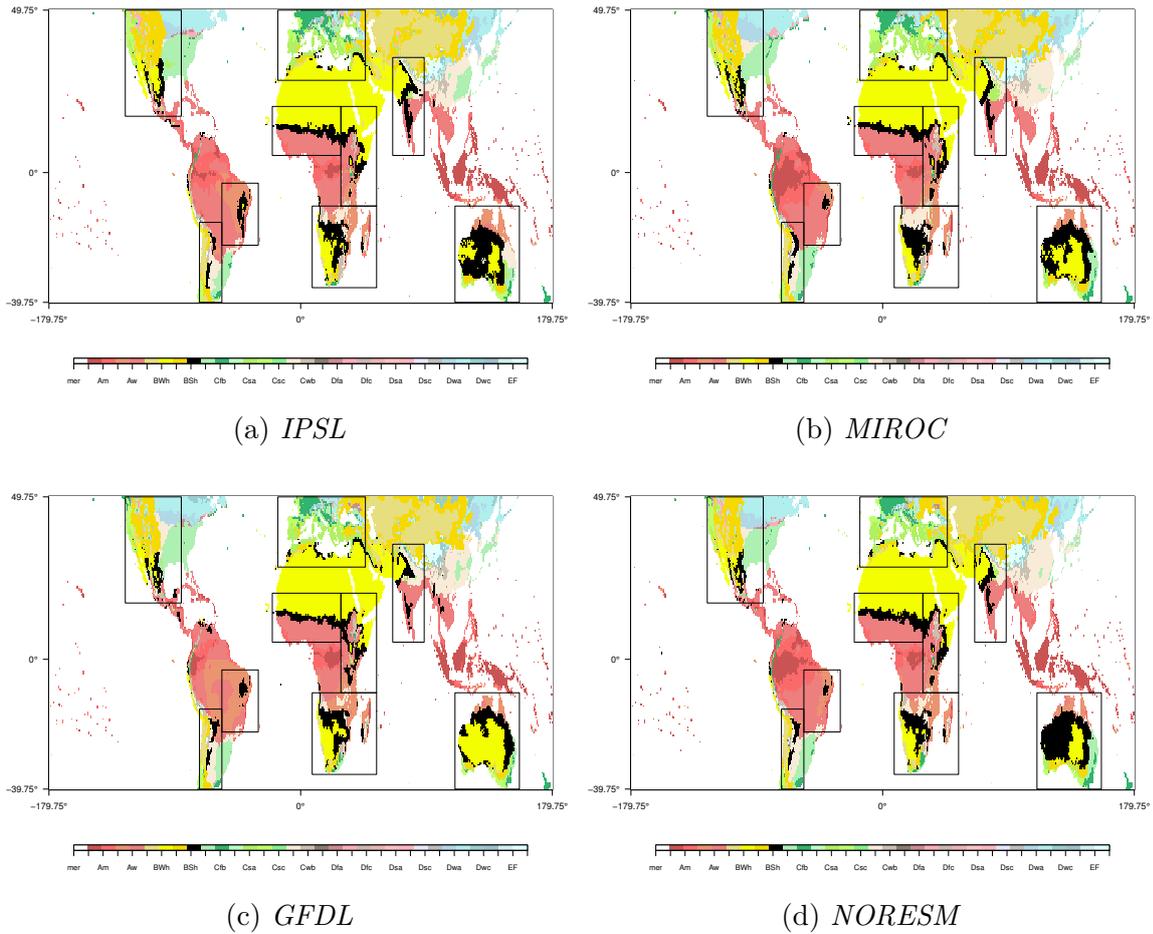


FIGURE A20 – *Classification bioclimatique appliquée aux données ISI-MIP pour la période moyenne 1991-2005*

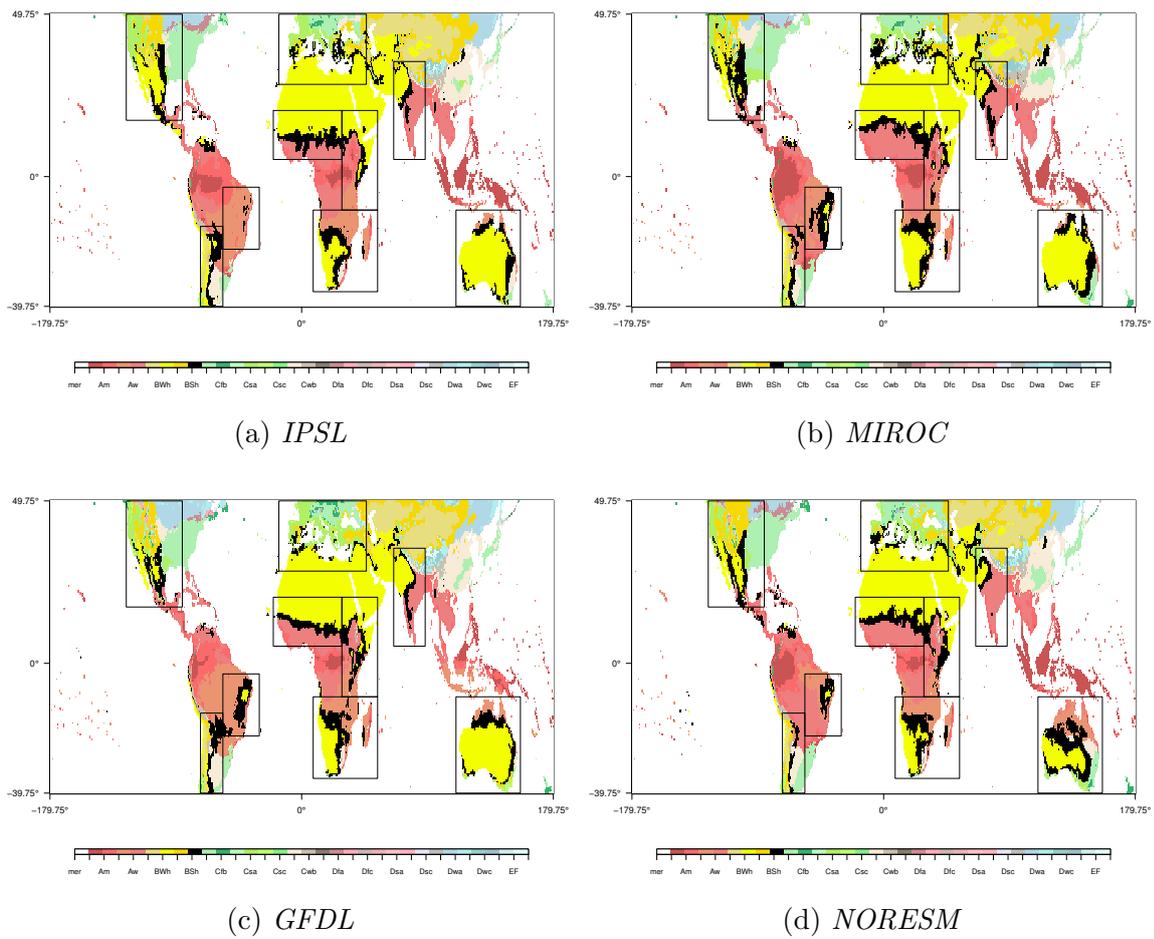


FIGURE A21 – *Classification bioclimatique appliquée aux données ISI-MIP pour la période moyenne 2055-2099 selon le RCP 8.5*

Répartition des régimes de productivité

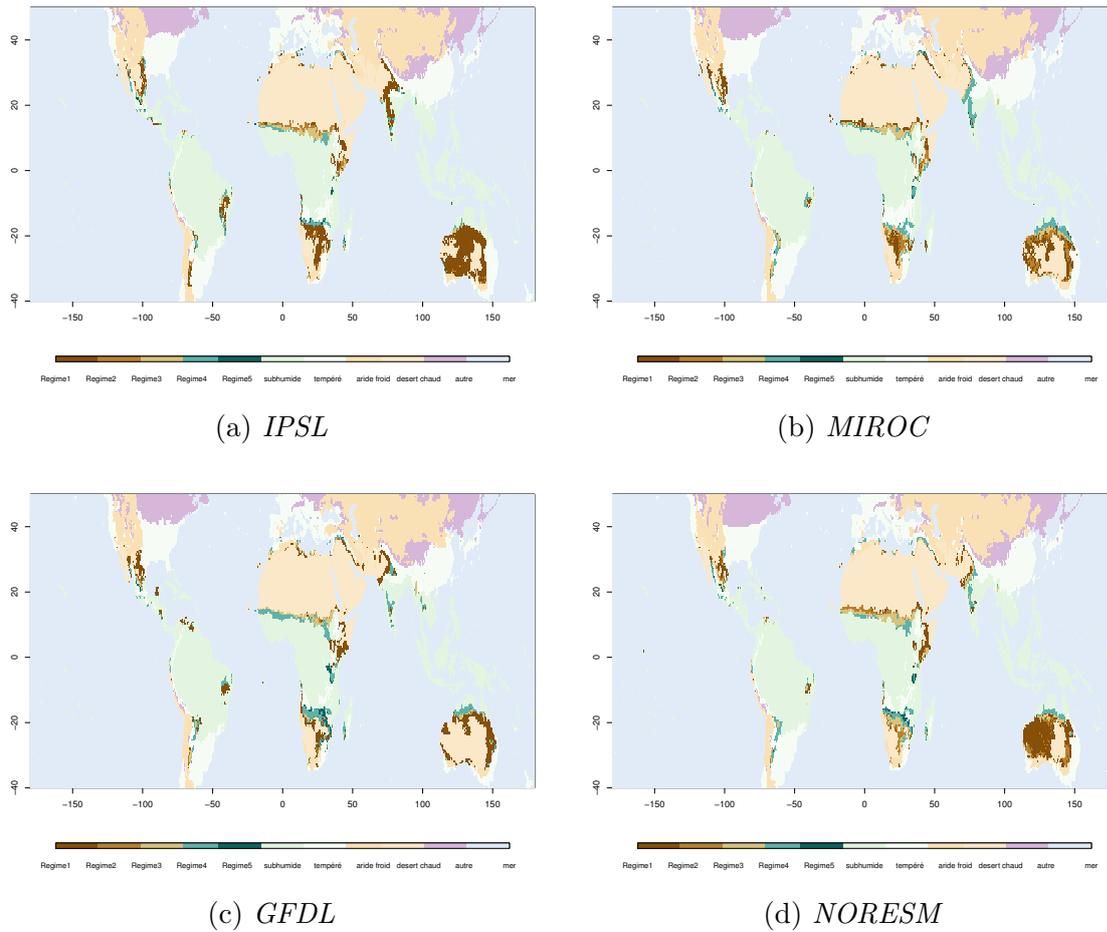


FIGURE A22 – Répartition des régimes de productivité identifiés pour la période moyenne 1991-2005

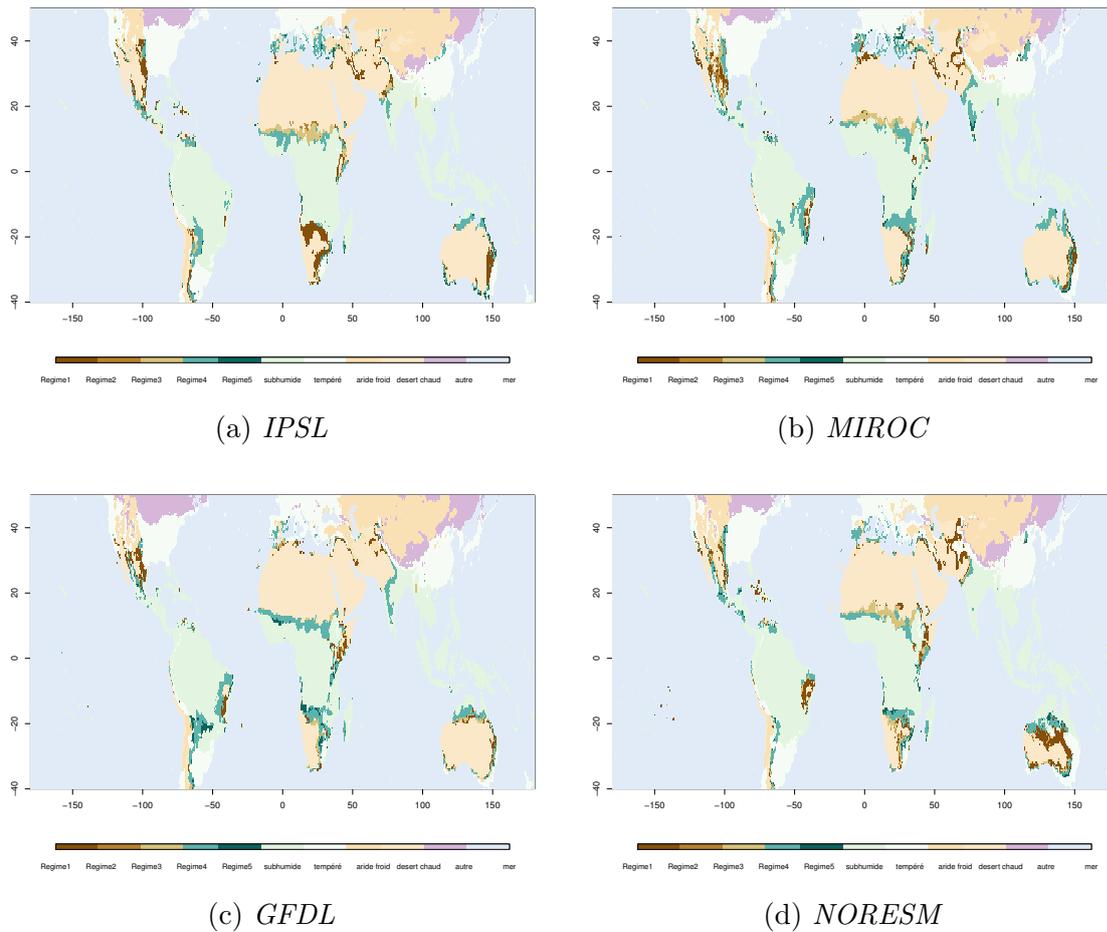


FIGURE A23 – Répartition des régimes de productivité identifiés pour la période moyenne 2085-2099 selon le RCP 8.5

Comparaison des valeurs de P/EP par régime pour les expériences

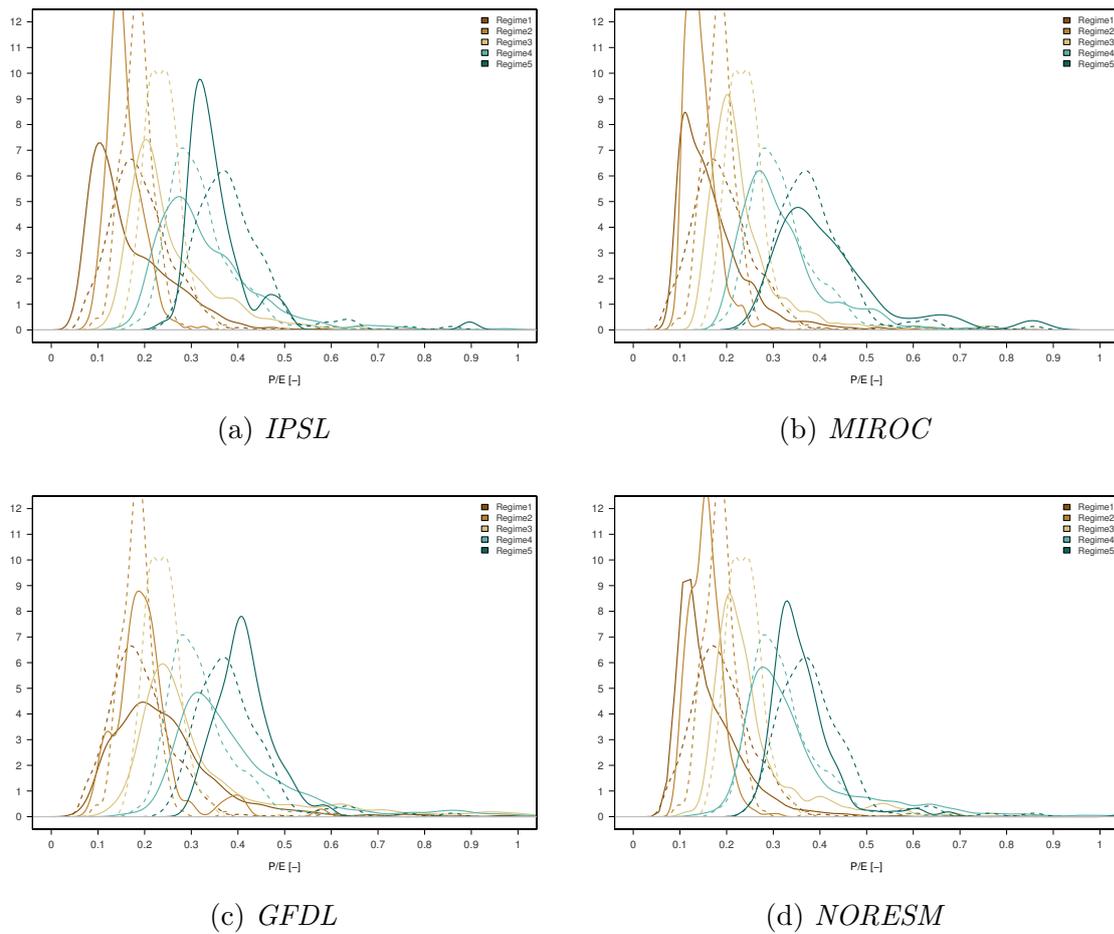
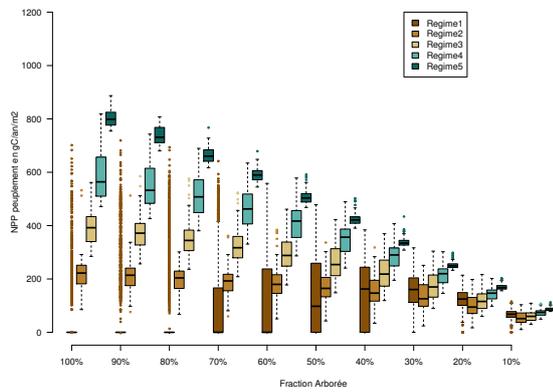
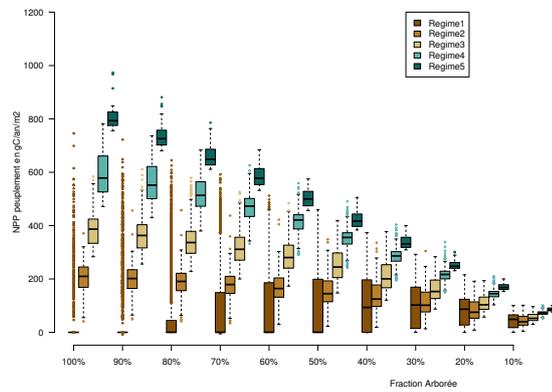
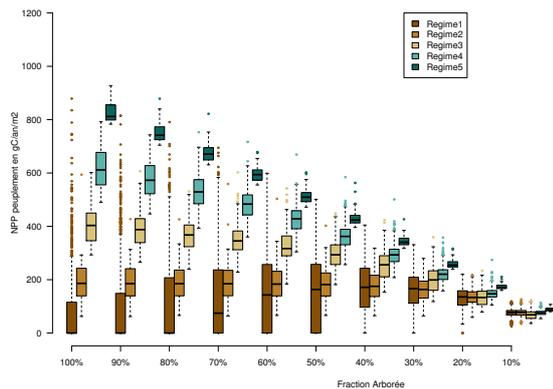
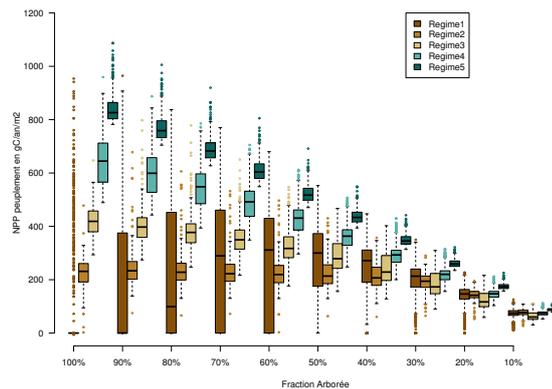
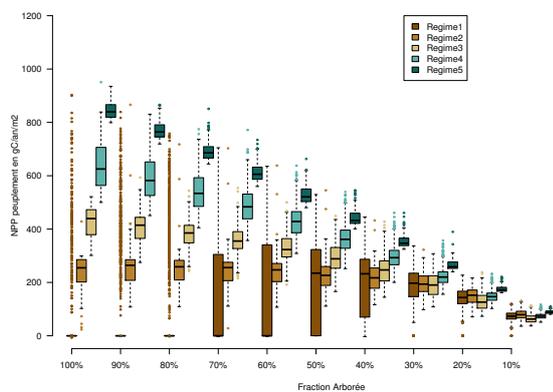
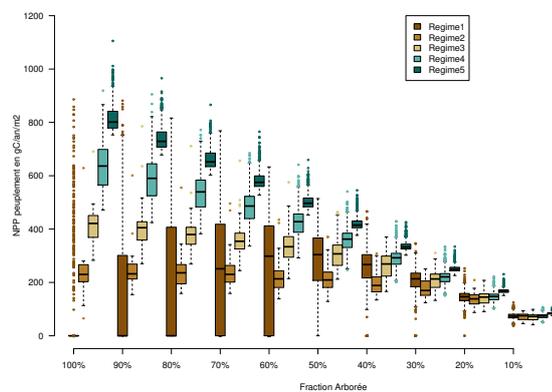


FIGURE A24 – *Distribution des valeurs de P/EP selon les régimes, pour l'expérience de référence (trait pointillé) et les expériences avec les modèles (trait plein), pour la période historique.*

Evolution des niveaux de productivité entre périodes historique et future

(a) *IPSL Historique*(b) *IPSL Futur*(c) *MIROC Historique*(d) *MIROC Futur*(e) *GFDL Historique*(f) *GFDL Futur*

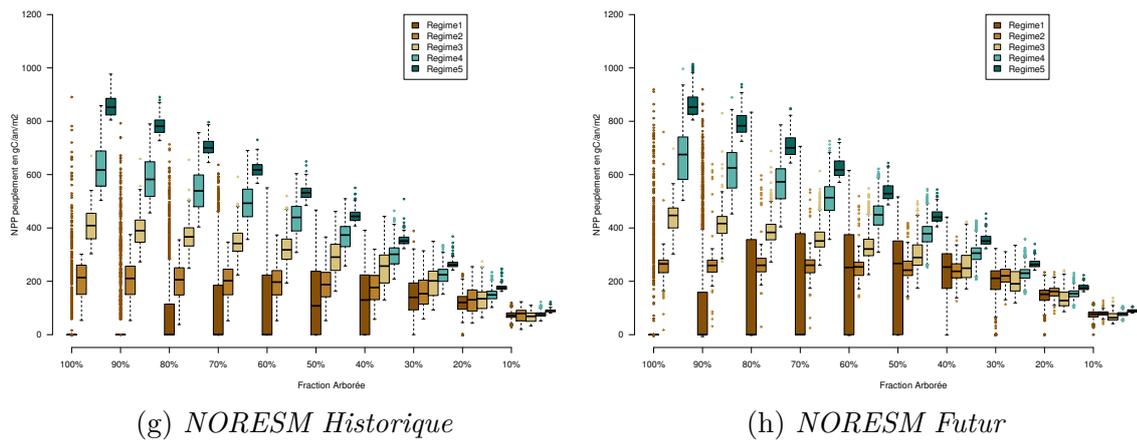
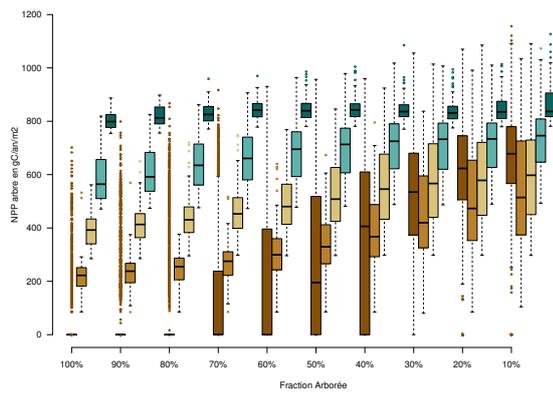
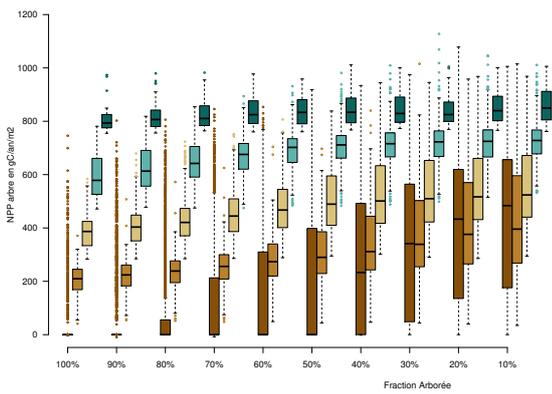


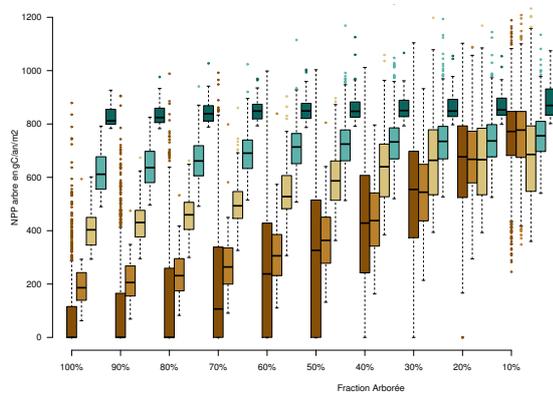
FIGURE A25 – *Valeurs de productivité primaire nette (NPP) totale du peuplement pour les périodes historique (gauche) et future (droite). Les valeurs de NPP sont données en moyenne sur la période de 15 ans. Chaque boîte à moustache représente la distribution sur l'ensemble des points assignés à un régime de productivité.*



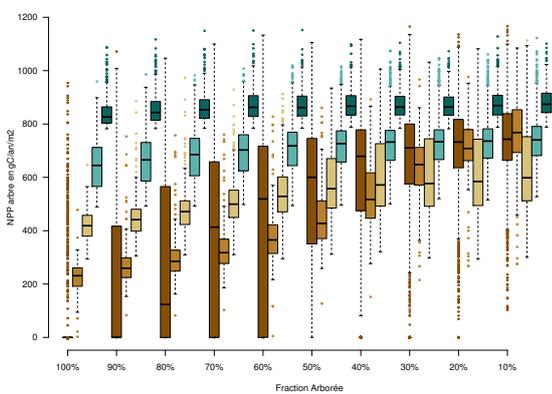
(a) *IPSL Historique*



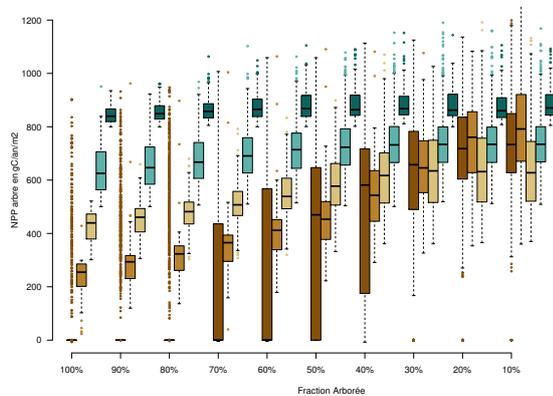
(b) *IPSL Futur*



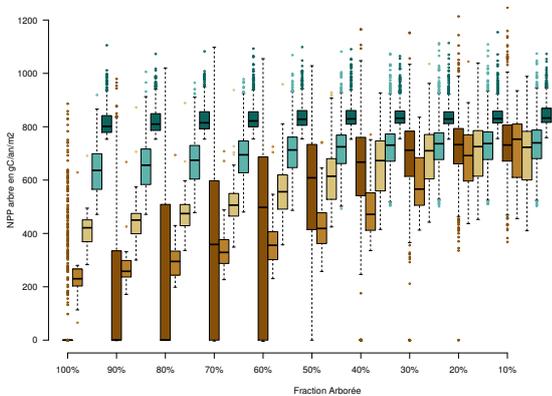
(c) *MIROC Historique*



(d) *MIROC Futur*



(e) *GFDL Historique*



(f) *GFDL Futur*

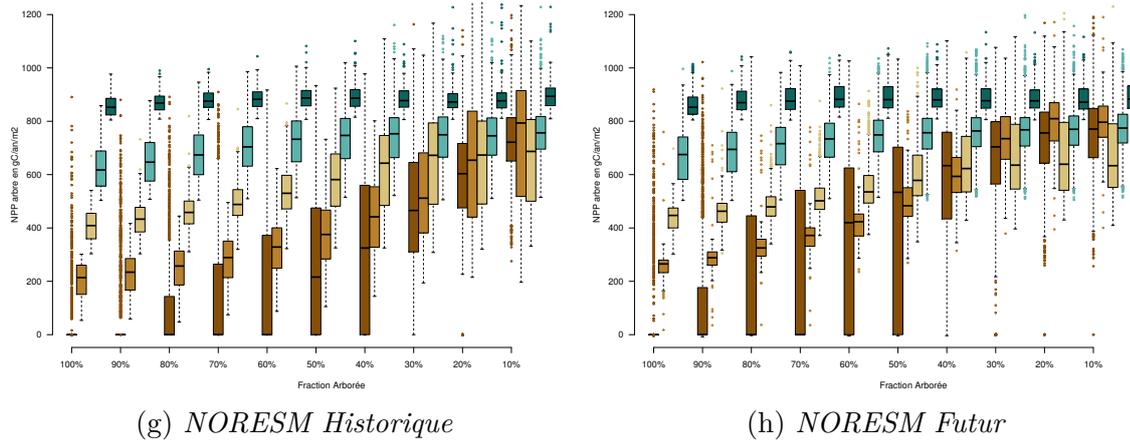


FIGURE A26 – *Valeurs de productivité primaire nette (NPP) individuelle pour les périodes historique (gauche) et future (droite). Les valeurs de NPP sont données en moyenne sur la période de 15 ans. Chaque boîte à moustache représente la distribution sur l'ensemble des points assignés à un régime de productivité.*

Evolution des distributions moyennes de température et précipitations entre les périodes historique et future dans les différents régimes de productivité

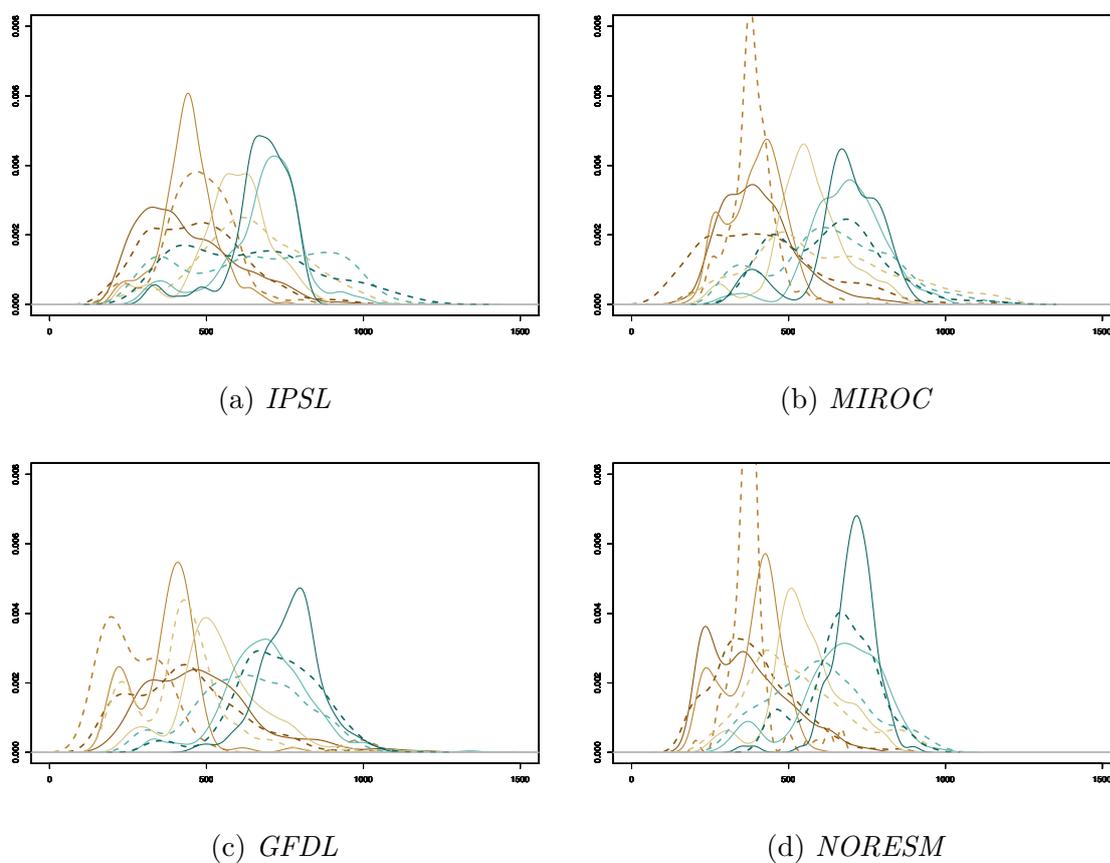


FIGURE A27 – *Distribution des valeurs de précipitations annuelles selon les régimes de productivité pour les périodes historique (trait plein) et future (trait pointillé). Moyenne interannuelles de sommes de précipitations annuelles.*

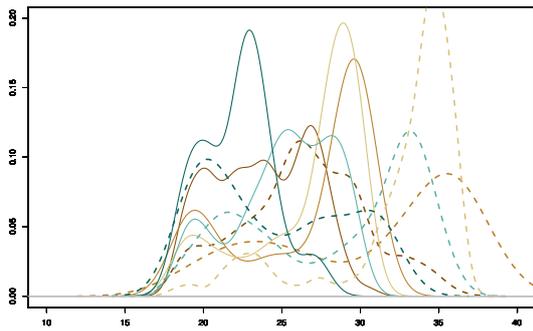
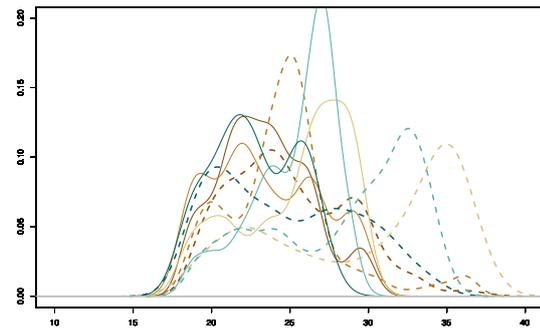
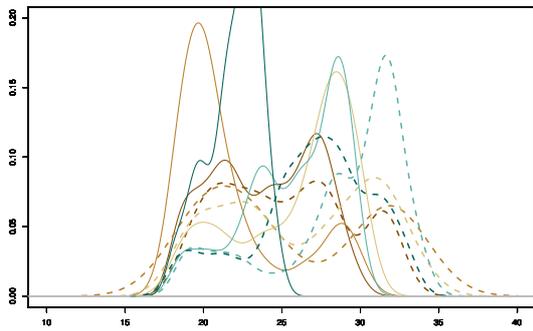
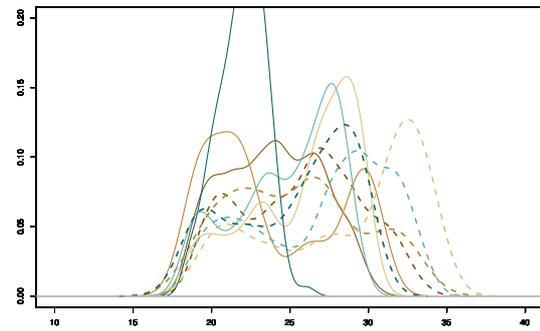
(a) *IPSL*(b) *MIROC*(c) *GFDL*(d) *NORES*

FIGURE A28 – *Distribution des valeurs de température de l'air annuelles selon les régimes de productivité pour les périodes historique (trait plein) et future (trait pointillé). Moyennes interannuelles de température moyenne annuelle.*

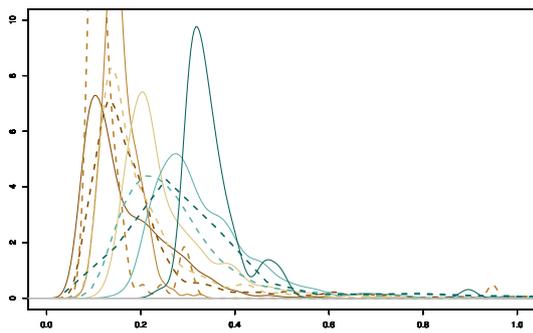
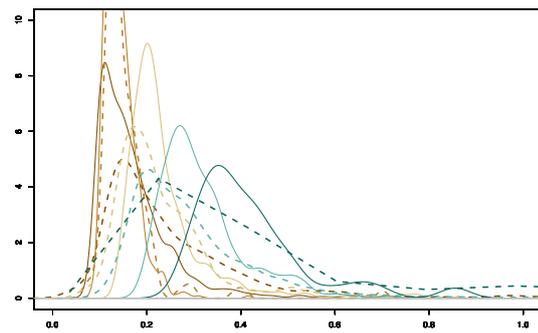
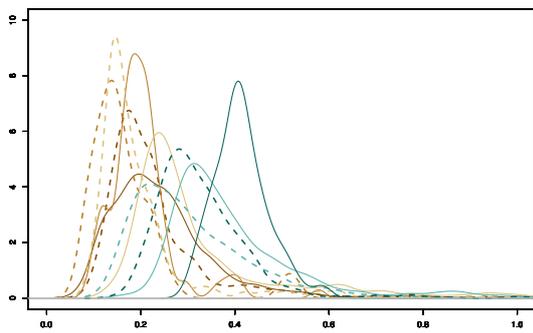
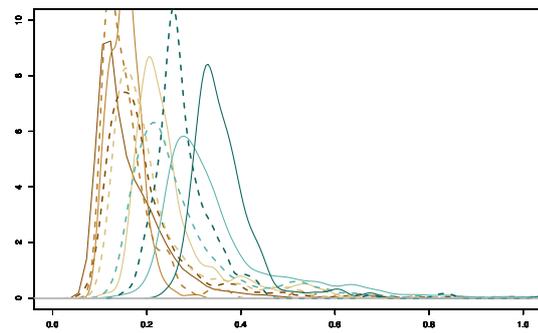
(a) *IPSL*(b) *MIROC*(c) *GFDL*(d) *NORES*

FIGURE A29 – *Distribution des valeurs du rapport P/EP selon les régimes de productivité pour les périodes historique (trait plein) et future (trait pointillé). Moyenne interannuelles des rapports P/EP annuels moyens.*

Evolution des distributions moyennes de NPP entre trois classes climatiques d'aridité croissante

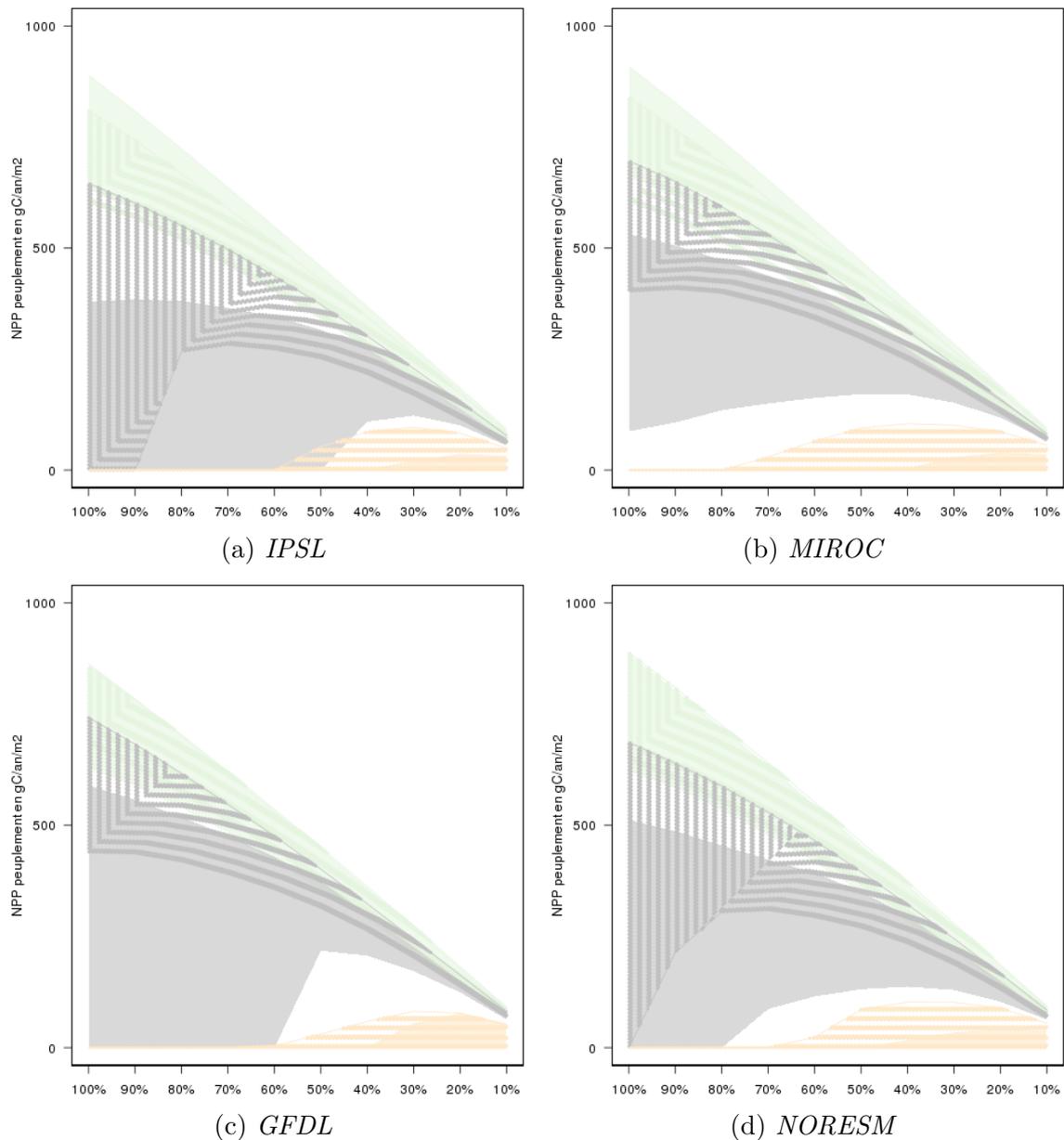


FIGURE A30 – *Intervalle de valeurs de NPP totale (peuplement) pour les périodes historique (plein) et future (pointillé). Enveloppes des premier et troisième quantiles des distributions, sur l'ensemble des points assignés à une classe climatique, des moyennes inter-annuelles de sommes annuelles de productivité primaire nette en gC/m², pour chaque fraction arborée. Vert : classe tropicale subhumide. Gris : classe semi-aride chaude. Jaune : classe très aride chaude. Les abscisses sont orientées des plus petites fractions arborées, à droite, vers les plus grandes, à gauche.*

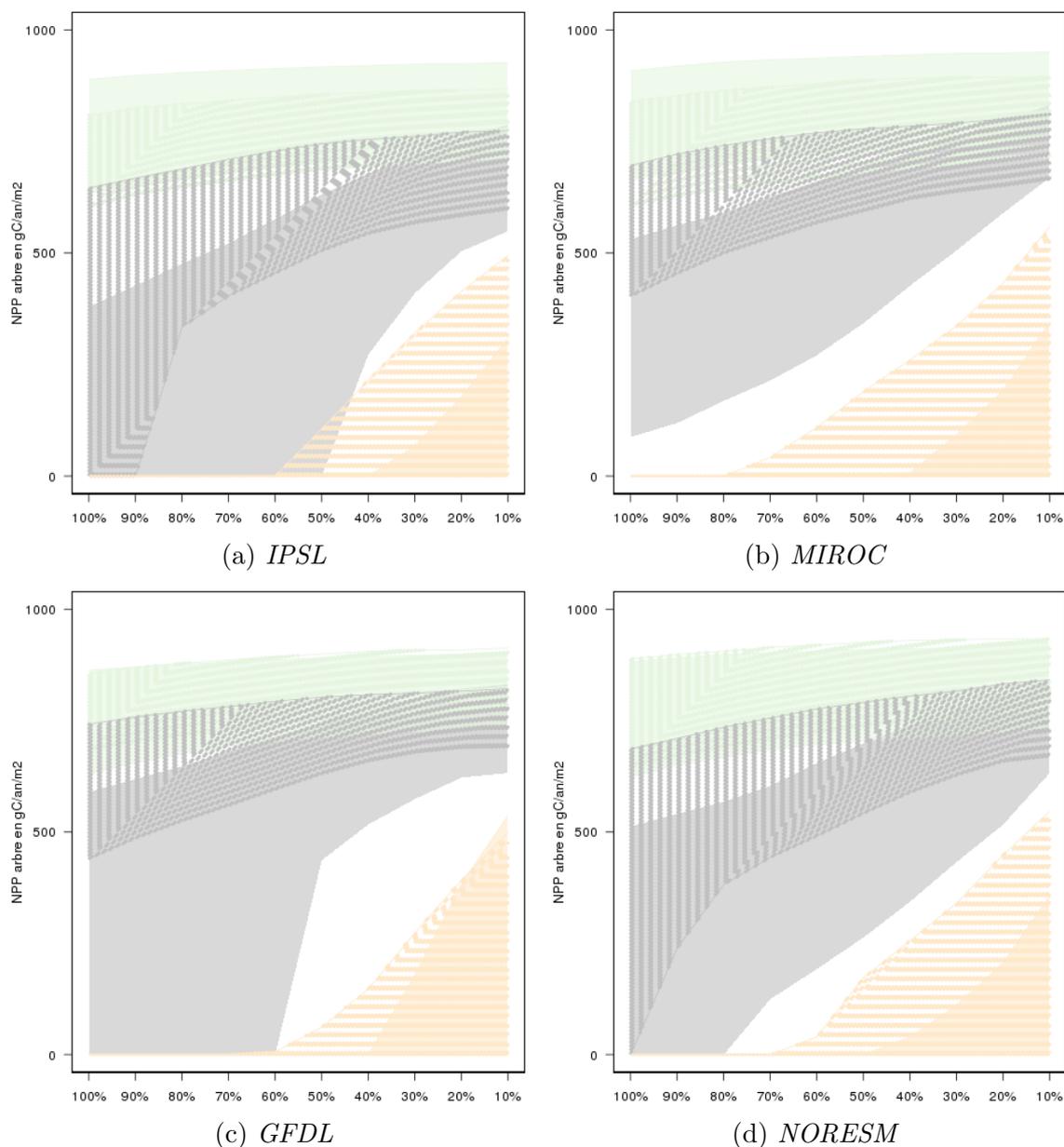


FIGURE A31 – *Intervalles de valeurs de NPP individuelle (arbre) pour les périodes historique (plein) et future (pointillé). Enveloppes des premier et troisième quantiles des distributions, sur l'ensemble des points assignés à une classe climatique, des moyennes inter-annuelles de sommes annuelles de productivité primaire nette en gC/m², pour chaque fraction arborée. Vert : classe tropicale subhumide. Gris : classe semi-aride chaude. Jaune : classe très aride chaude. Les abscisses sont orientées des plus petites fractions arborées, à droite, vers les plus grandes, à gauche.*

Nouvelle assignation aux différents régimes de productivité du domaine tropical semi-aride historique dans la période future

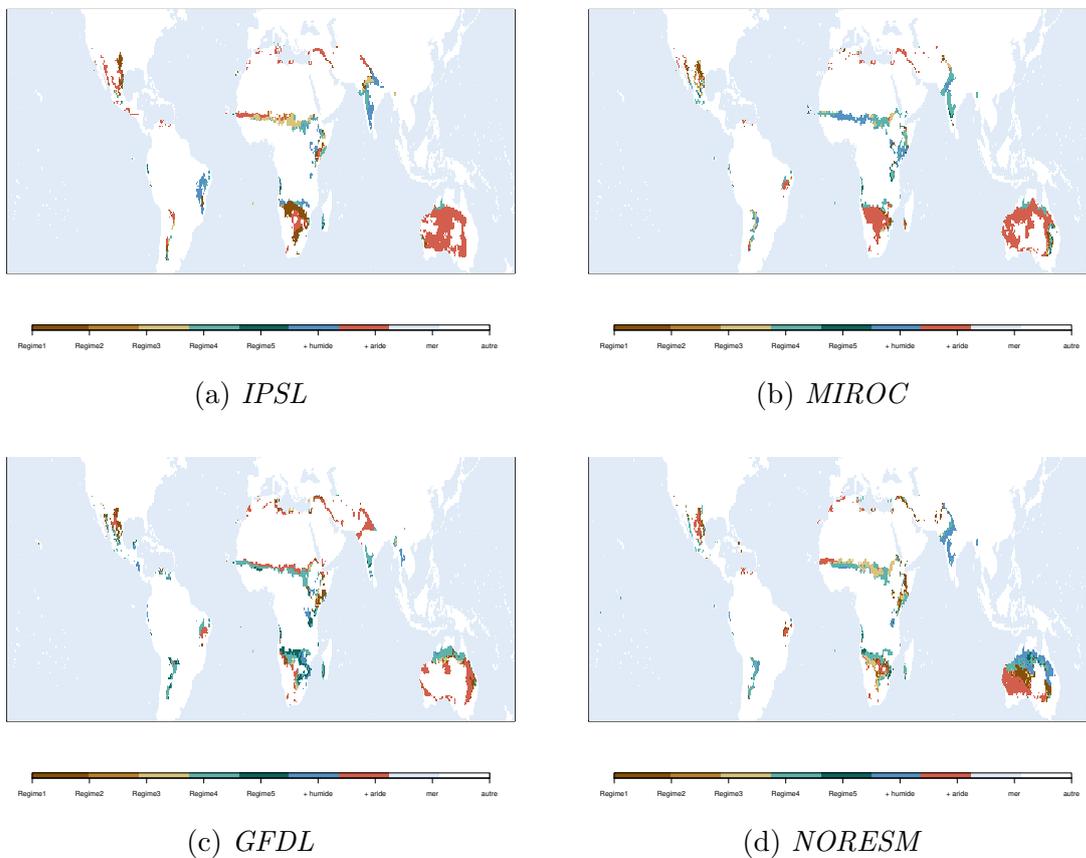


FIGURE A32 – *Distribution des régimes de productivité pour la période future dans les régions du domaine tropical semi-aride historique*

Régimes de productivité des futures régions semi-arides chaudes, non héritées de l'historique

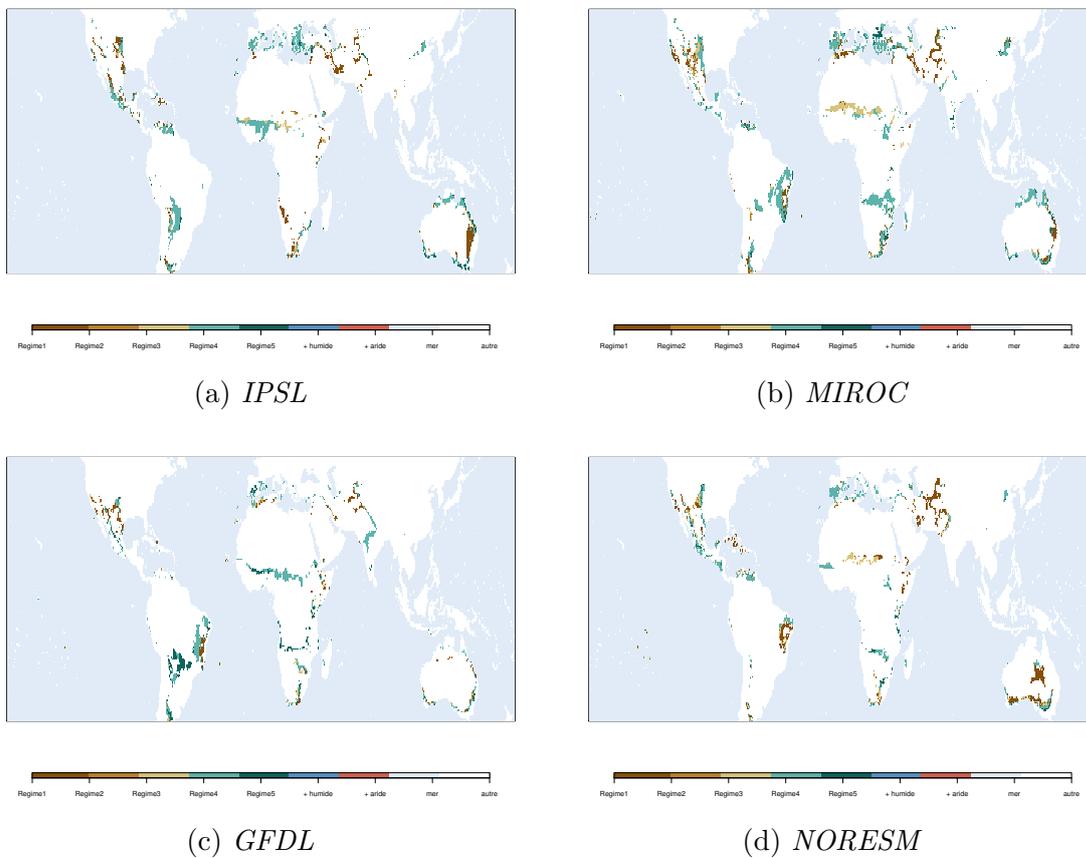


FIGURE A33 – *Distribution des régimes de productivité pour la période future dans les régions non héritées domaine tropical semi-aride historique*

Evolution des intervalles de potentiel arboré entre les périodes historique et future, par régime de productivité

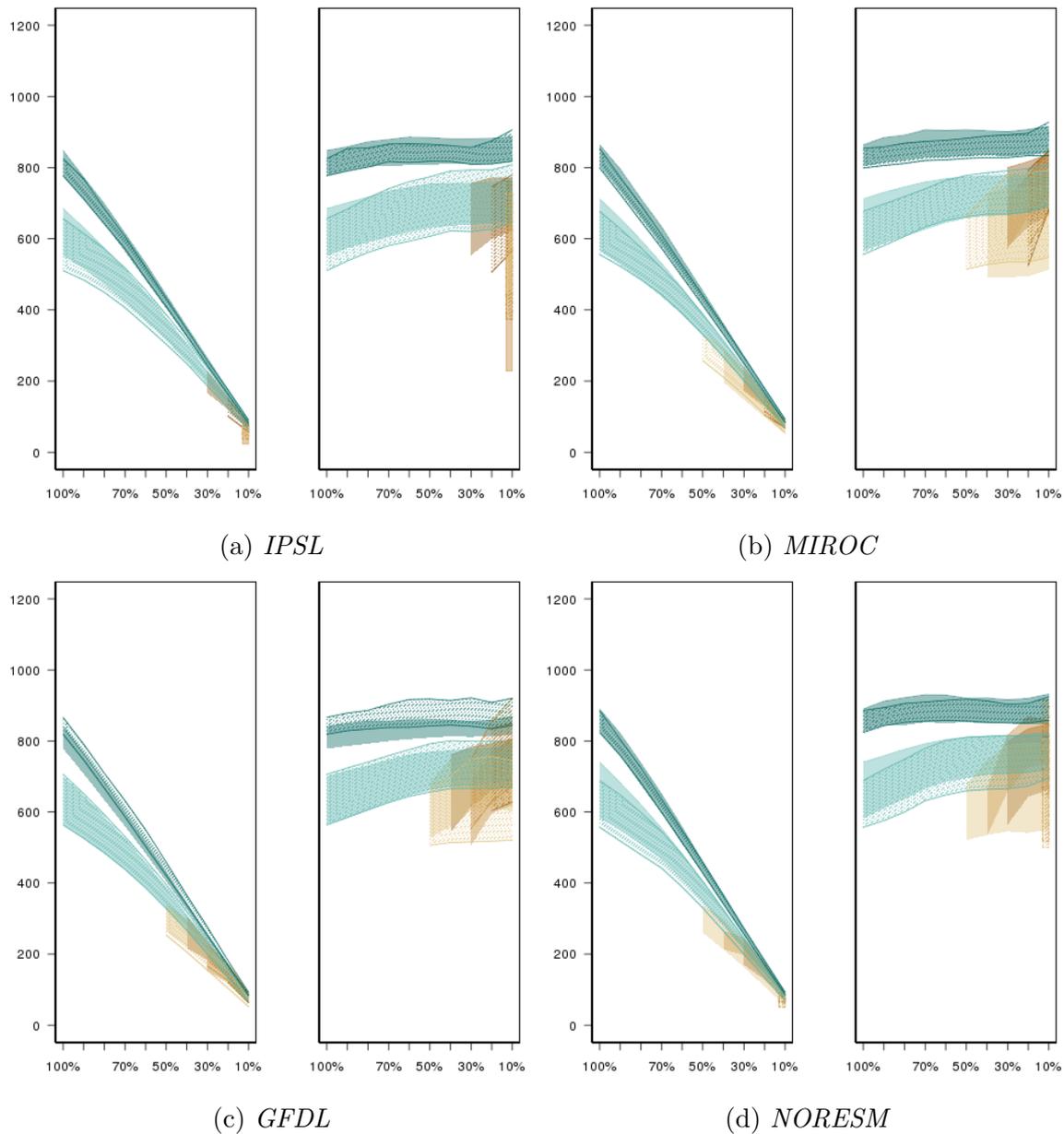


FIGURE A34 – (figures à réimporter, avec l'axe Y) Intervalle (premier et troisième quantiles) de valeurs de NPP pour les fractions arborées remplissant la condition d'acceptabilité portant sur le développement de l'arbre ($NPP_{\text{arbre}} > \text{seuil3}$).

Evolution des intervalles de potentiel arboré entre les périodes historique et future, par régime de productivité, pour les ex-surfaces semi-arides froides

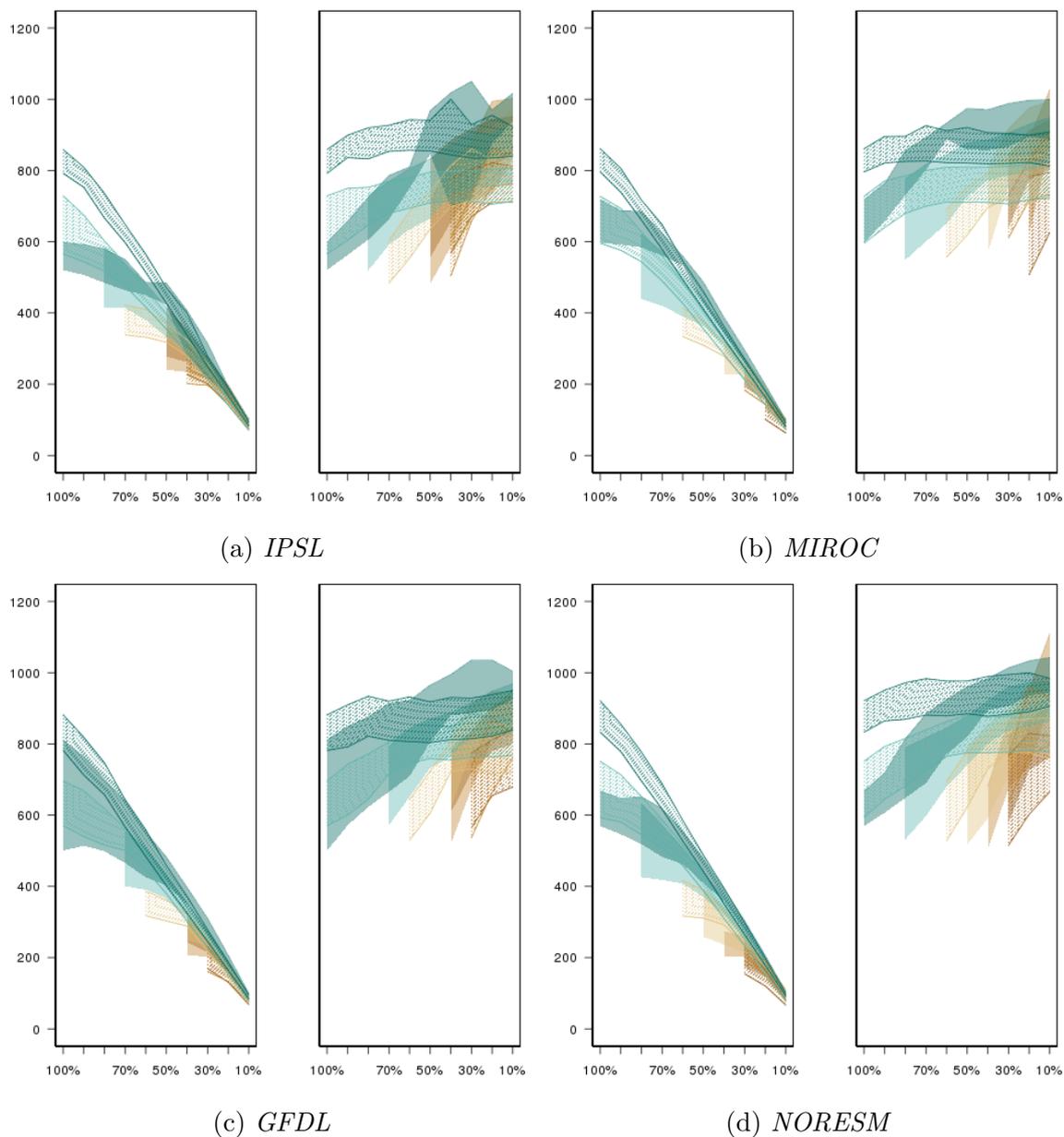


FIGURE A35 – *Ex-surfaces semi-arides froides* : Intervalle (premier et troisième quantiles) de valeurs de NPP pour les fractions arborées remplissant la condition d'acceptabilité portant sur le développement de l'arbre ($NPP_{\text{arbre}} > \text{seuil3}$).



(In)certitudes et adaptation au climat futur : le regard des « acteurs de demain »

Article écrit par un groupe d'étudiants (universités de Paris, Montpellier, Strasbourg, Bruxelles, Brest, La Rochelle) : Yann Quilcaille, Yann Chavaillaz, Sabine Giguet, Aglaé Jézéquel, Amélie Rajaud, Camille Ferron, Amandine Amat, Vivian Dépoues, Adèle Revelard, Marine Lugen, Leslie Tourneville, Adrien Comte, Xavier Mouroux, Marien Ranche, Margot Hovsepian, Roxane Sansilvestri

UN COLLOQUE INTERDISCIPLINAIRE ET PROSPECTIF

Cet article synthétise les discussions du colloque-débat *(In)certitudes et adaptation au climat futur* (17-18 novembre 2014, Meudon, Paris) organisé dans le cadre du projet « Vers des services climatiques pour les industries françaises » (SECIF). Cet événement visait, en réunissant différents acteurs (climatologues, sociologues, industriels, économistes, politiques) travaillant à diverses échelles (du national au local), à clarifier la question des incertitudes climatiques pour en faciliter l'intégration dans les démarches d'adaptation au changement climatique. Il souhaitait également impliquer dans la réflexion les « acteurs de demain », ici des étudiants (les auteurs) en climatologie, géographie, économie, sociologie, etc.

DIFFÉRENTES APPROCHES ET APPROPRIATIONS DE L'INCERTITUDE

Le traitement de l'incertitude (climatique, socio-économique et politique) dans le processus d'adaptation opère différemment selon la problématique et les acteurs concernés. De plus en plus, la fourniture de services climatiques est vue comme une réponse pour faciliter l'appropriation d'une information scientifique de plus en plus complexe et des incertitudes. Toutefois, les informations scientifiques transmises aux acteurs et décideurs seraient trop souvent détachées des contextes territoriaux (problèmes d'échelles, de cadrage par rapport aux logiques institutionnelles, etc.), reflétant ainsi des conceptions différentes de la question des incertitudes : jugée incontournable pour les scientifiques, elle risque de nuire à la crédibilité et à l'appropriation de l'information pour nombre d'acteurs.

COMMUNIQUER POUR CONCILIER SCIENCE ET ACTION POLITIQUE

Si la question de la communication des données climatiques et de leurs incertitudes est donc cruciale, elle reste balbutiante dans la pratique. Selon les auteurs, la voie la plus prometteuse serait de rassembler des équipes-projet interdisciplinaires (acteurs publics, acteurs privés et scientifiques) autour de processus itératifs de partage de points de vue, d'informations et de prise de décisions. Cela permettrait de palier la déconnexion actuelle entre la science climatique et les politiques publiques, et d'ainsi d'accompagner les territoires vers l'adaptation.

Copyright © 2015 Iddri

En tant que fondation reconnue d'utilité publique, l'Iddri encourage, sous réserve de citation (référence bibliographique et/ou URL correspondante), la reproduction et la communication de ses contenus, à des fins personnelles, dans le cadre de recherches ou à des fins pédagogiques. Toute utilisation commerciale (en version imprimée ou électronique) est toutefois interdite.

Sauf mention contraire, les opinions, interprétations et conclusions exprimées sont celles de leurs auteurs, et n'engagent pas nécessairement l'Iddri en tant qu'institution ni les individus ou les organisations consultés dans le cadre de cette étude.

Citation : Quilcaille, Y. *et al.* (2015). (In)certitudes et adaptation au climat futur : le regard des « acteurs de demain », *Studies* N°04/15, Iddri, Paris, France, 34 p.

Auteurs : Yann Quilcaille (LSCE-CIRED, Université de Versailles Saint-Quentin), Yann Chavaillaz (LSCE, Université de Versailles Saint-Quentin), Sabine Giguët (EDDEE, AgroParisTech), Aglaé Jézéquel (ENGREF/AgroParisTech), Amélie Rajaud (LSCE, Université de Versailles Saint-Quentin), Camille Ferron (ENS Cachan), Amandine Amat (AMUP EA 73 09/INSA, Université de Strasbourg), Vivian Dépoues (SciencesPo/UPMC), Leslie Tourneville (SciencesPo), Adrien Comte (UMR AMURE, Université de Bretagne Occidentale), Adèle Révélard (LOCEAN, Université Pierre-et-Marie-Curie), Marine Lugen (CEDD, Université libre de Bruxelles), Xavier Mouroux (Université de La Rochelle), Marien Ranché (Université de La Rochelle), Margot Hovsepian (PREG-CECO, École Polytechnique), Roxane Sansilvestri (ESE, Université de Paris Sud).



Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence nationale de la recherche au titre du programme « Investissements d'avenir » portant la référence ANR-10-LABX-01.
ajouter 3 petites étoiles, puis



Tous nos remerciements vont à : Pascale Braconnot (IPSL/LSCE) et Alexandre Magnan (Iddri) pour l'organisation de ce colloque-débat et pour l'opportunité qu'ils nous ont offerte de faire entendre notre voix ; Jean-Paul Vandenlinden pour l'aide précieuse apportée aux pilotes dans les étapes préliminaires de ce travail ; tous les intervenants présents qui ont permis aux participants d'avoir un débat riche en idées et sans qui cet article n'aurait pas pu prendre forme.



Pour toute question sur cette publication,
merci de contacter :
Yann Quilcaille – yann.quilcaille@ens-cachan.fr

ISSN 2258-7535

(In)certitudes et adaptation au climat futur : le regard des « acteurs de demain »

Article écrit par un groupe d'étudiants (universités de Paris, Montpellier, Strasbourg, Bruxelles, Brest, La Rochelle) : Yann Quilcaille, Yann Chavallaz, Sabine Giguet, Aglaé Jézéquel, Amélie Rajaud, Camille Ferron, Amandine Amat, Vivian Dépoués, Adèle Revelard, Marine Lugen, Leslie Tourneville, Adrien Comte, Xavier Mouroux, Marien Ranche, Margot Hovsepian, Roxane Sansilvestri

RÉSUMÉ/SUMMARY	5
1. CONTEXTE	7
2. MÉTHODOLOGIE	8
2.1. La constitution d'un groupe pluridisciplinaire	8
2.2. Méthode pour l'analyse critique et la synthèse	8
3. SYNTHÈSE DES SESSIONS ET DES DISCUSSIONS	9
3.1. Conférences d'ouverture	10
3.2. Séance plénière n°1 : appréhension des résultats des projections climatiques, incertitudes et certitudes	11
3.3. Séance plénière n°2 : différents acteurs, différentes conceptions de l'incertitude	12
3.4. Séance plénière n°3 : lever les barrières de l'incertitude	13
3.5. Table ronde n°1 : les industries face aux (in)certitudes	14
3.6. Table ronde n°2 : politiques publiques	15
3.7. Table ronde n°3 : intégrer et communiquer l'incertitude dans les services climatiques	16
4. DISCUSSION	17
4.1. Pertinence des incertitudes	17
4.2. Rôles des différents acteurs	21
4.3. Perceptions des aléas du changement climatique et modes de communication appropriés	24
5. CONCLUSION	27
BIBLIOGRAPHIE	28
ANNEXE	29

RÉSUMÉ

Co-écrit par seize « acteurs de demain », cet article interdisciplinaire est à la fois un compte rendu du colloque-débat « (In)certitudes et adaptation au climat futur » (novembre 2014, Meudon) et une tribune permettant aux auteurs de développer certaines questions qui sont apparues en filigrane lors des discussions. Ceci en fait un travail original tant sur la forme – faire communiquer ensemble plusieurs disciplines en donnant la parole à leurs plus jeunes représentants – que sur le fond – puisqu’il va au-delà de la simple restitution des discussions d’un colloque.

Ainsi, cet article relaye les messages clés des différentes interventions (« derrière les incertitudes, il y a beaucoup de certitudes », « différents acteurs, différentes conceptions de l’incertitude », « l’existence d’incertitudes doit inciter à se poser les bonnes questions »), analyse les sessions de débats autour des industries, des politiques publiques et des services climatiques, et creuse en particulier les points suivants : la pertinence de mettre au centre des débats la question des incertitudes, les rôles des différents acteurs et les perceptions liées au changement climatique et à l’adaptation.

La conclusion principale de ce travail est que, dans l’objectif de s’adapter au changement climatique, il est important, voire primordial, de communiquer et d’interagir entre disciplines mais aussi entre professions, quitte à envisager de nouveaux modes d’action collective ou de nouveaux métiers. A cette fin, un processus itératif de transmission des certitudes et des incertitudes est proposé, ainsi que la formation d’un collectif mêlant acteurs publics, privés et scientifiques de tous domaines. La communication pourra s’appuyer sur les perceptions du changement climatique et la réalité de celui-ci pour favoriser l’adaptation.

SUMMARY

Co-written by sixteen “future leaders”, this interdisciplinary paper is both an account of the debate-seminar “(Un)certainties and Adaptation to Future Climate” (November 2014, Meudon), and a forum for authors to develop certain issues that have emerged during the discussions. This makes it an original work both with regards to the form—to make several disciplines communicate together by giving voice to their younger representatives—and to the substance—as it goes beyond a simple report about seminar discussions.

Thus, this article relays key messages of the different interventions (“behind the uncertainties, there are many certainties”, “different stakeholders, different conceptions of uncertainty”, “the existence of uncertainty should prompt asking the good questions”), analyzes the debates around industries, public policy, and climate services, and especially digs further the following points: the relevance to center stage the issue of uncertainty, the roles of the different actors, and perceptions related to climate change and adaptation.

The main conclusion is that, in the context of adapting to climate change, it is important, even essential, to communicate and interact between disciplines but also between professions, and even consider new collective modes of action or new kinds of jobs. To this end, an iterative process of transmission of certainties and uncertainties, as well as the creation of a group combining public and private stakeholders with scientists from all fields. The communication could rely on the perceptions of the climate change and its reality to support the adaptation.

1. CONTEXTE

(coordinateur : Aglaé Jézéquel ; co-auteur : Sabine Giguët)

Le colloque-débat *(In)certitudes et adaptation au climat futur* (17-18 novembre 2014, Meudon, Paris) organisé par le Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement de l'Institut Pierre Simon Laplace (LSCE-IPSL), l'Institut du développement durable et des relations internationales (Iddri) et le GIS Climat-Environnement-Société poursuivait plusieurs objectifs. Tout d'abord, il s'agissait d'améliorer la compréhension des incertitudes climatiques par différents acteurs (climatologues, sociologues, industriels, économistes, politiques) et à diverses échelles (du national au local) pour faciliter leur intégration dans les décisions relatives à l'adaptation au changement climatique. Engager la discussion sur cette thématique à l'interface science/décision permettait aussi de faire un bilan des problèmes concrètement posés par les incertitudes : sont-elles trop nombreuses pour que des décisions cohérentes du point de vue de l'adaptation soient prises ? Quels moyens sont mis en œuvre sur le terrain pour les contourner ? Pour quels bénéfices et au prix de quelles limites ? Enfin, ce colloque était aussi l'occasion d'impliquer dans la réflexion les acteurs de demain, c'est-à-dire les étudiants d'aujourd'hui, préoccupés par la question du changement climatique et qui auront un jour la charge de définir des stratégies d'adaptation et de les mettre en œuvre.

Le besoin de créer un espace d'échange entre la science et la décision est né de la réflexion autour des services climatiques au travers du projet Vers des services climatiques pour les industries françaises (SECIF). Ces services, principalement développés par les climatologues pour aider les

Encadré 1. Qu'est-ce que SECIF ?

Démarré en 2011, le projet Vers des services climatiques pour les industries françaises (SECIF) avait pour objectif de définir les meilleures façons d'utiliser les ressources humaines et matérielles disponibles pour répondre aux multiples questions des industriels sur le changement climatique. Dans cette optique, le projet réunissait différents acteurs : des climatologues (du LSCE et du Centre national de recherches météorologiques) dont le rôle était de fournir les données climatiques et de mieux comprendre les limites de leurs modèles ; des sociologues (de l'Iddri et de l'Institut national des sciences appliquées) dont l'objectif était de comprendre les difficultés liées à la décision en contexte incertain, et des industriels (EDF, GDF-Suez et Véolia-Eau), qui avaient besoin d'outils efficaces pour définir leur stratégie vis-à-vis du changement climatique.

Le but commun de ces acteurs était de définir des services climatiques susceptibles d'améliorer la prise de décision pour l'adaptation et suffisamment clairs sur les données produites et sur les incertitudes inhérentes à ces données.

Ce projet s'est organisé en trois volets majeurs :

- un bilan présentant ce qui avait déjà été fait, des recherches qualitatives sur les problèmes des industriels, et une analyse transversale des besoins ;
- quatre études de cas dédiées aux secteurs industriels de l'eau et de l'énergie : l'impact des vagues de froid sur le secteur de l'énergie en France, la vulnérabilité d'un réseau d'eaux usées aux fluctuations des précipitations en région Drôme-Ardèche ; l'adaptation d'usines de désalinisation et l'impact des énergies renouvelables sur le vent et les précipitations ;
- une analyse climatique comprenant le traitement des incertitudes, la création de nouveaux ensembles de données et l'établissement d'un lien avec les sujets des extrêmes et de la descente d'échelle.

acteurs nécessitant un accès aux données issues des modèles, sont une des réponses avancées pour contourner les incertitudes. La question était donc de savoir si cela suffit et, le cas échéant, comment aller plus loin.

Les deux journées d'échanges (voir programme en annexe) étaient organisées autour de trois messages (« derrière les incertitudes, il y a beaucoup de certitudes », « différents acteurs, différentes conceptions de l'incertitude », « l'existence d'incertitudes doit inciter à se poser les bonnes questions ») et de trois cadres d'action spécifiques (les industries, les politiques publiques, les services climatiques). Les éléments de débat ont été discutés dans le cadre de trois séances plénières et trois tables rondes se sont focalisées sur les cadres de l'action. Une place importante était laissée aux débats avec la salle, remplie par près d'une soixantaine de personnes.

L'une des vocations importantes de ce colloque-débat était d'introduire un regard neuf sur la question des incertitudes en permettant à des étudiants, les « acteurs de demain », de donner leur point de vue sur les questions qui ressortaient des débats, les éléments de connaissance et de discussion les plus saillants, et les controverses majeures. Un groupe de seize étudiants a donc été constitué qui comprenait des Master 2 et des doctorants provenant de divers horizons disciplinaires (climatologie, géographie, économie, sociologie, sciences politiques). Ce groupe avait en charge d'analyser les discussions, de réaliser des synthèses de chaque session et tables rondes, d'y appliquer leur propre regard critique, puis d'en déduire des pistes pour l'amélioration de la prise en compte, dans un avenir proche, des incertitudes dans les démarches d'adaptation au changement climatique. Ce texte est le fruit de cet effort collectif très original. Il présente le cadre méthodologique déployé par ce groupe (section 2) pour synthétiser les débats (section 3) et les discuter (section 4). Trois axes de discussion sont notamment développés dans ce texte : la pertinence de mettre au centre des débats la question des incertitudes, la question des rôles des différents acteurs et la question des perceptions du changement climatique et de l'adaptation.

2. MÉTHODOLOGIE

(coordinateur : Sabine Giguët ; co-auteurs : Vivian Dépoues, Aglaé Jézéquel, Yann Quilcaille)

Afin de répondre à la demande des organisateurs du colloque, quatre étudiants ont été initialement contactés pour se charger, d'une part, de recruter d'autres étudiants pour couvrir l'ensemble de l'événement et, d'autre part, d'élaborer une méthode de travail permettant de réellement croiser leurs regards sur l'ensemble des sessions prévues. Ces deux aspects sont détaillés dans la suite.

2.1. La constitution d'un groupe pluridisciplinaire

Impliqué dès le départ dans l'organisation du colloque-débat, le groupe des quatre pilotes a notamment eu la charge de recruter¹ douze autres étudiants sur la base de trois critères : leur motivation, leur connaissance des enjeux liés au changement climatique et la pluridisciplinarité des profils. L'analyse d'un sujet aussi vaste que celui traité par le colloque nécessitait en effet de mobiliser différentes disciplines. Au terme de ce processus de recrutement, les profils retenus couvraient cinq champs de recherche : la climatologie (4 étudiants), l'économie (4 étudiants), la sociologie (2 étudiants), la géographie (2 étudiants) et les sciences politiques (4 étudiants). Dès lors, un point critique était de réussir à faire se croiser ces regards différents, et donc de passer d'un groupe pluridisciplinaire à une réflexion interdisciplinaire, essentielle pour développer un langage commun (se comprendre) et un cadre de discussion (interagir).

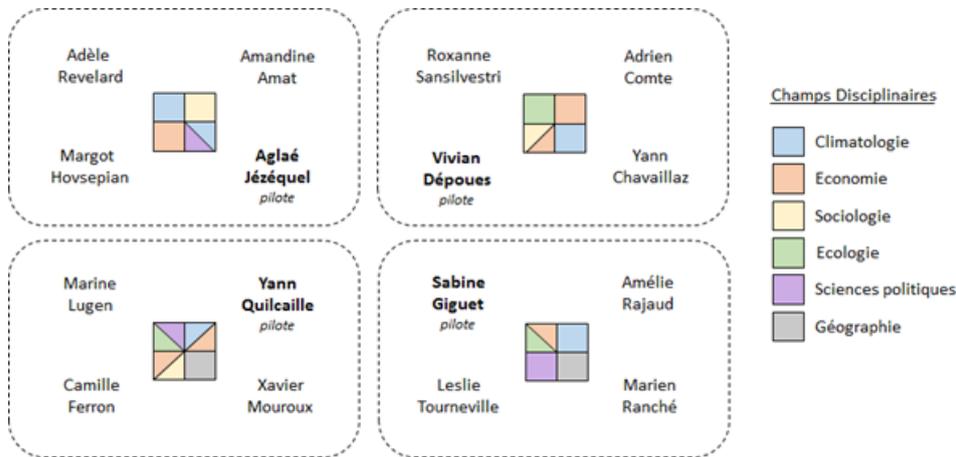
Dans cette optique, les quatre pilotes du groupe ont organisé une réunion avec l'ensemble des étudiants afin de présenter les missions à remplir et la méthode retenue pour l'analyse des sessions, avec Blanchard et Vanderlinden (2012) et Tremblay (1968) pour supports. De plus, grâce à différentes techniques d'animation², cette rencontre a permis à chacun d'apprendre à connaître les autres, de commencer à réfléchir à l'intérêt de sa discipline propre pour traiter de la question « (in)certitude et adaptation » et aux complémentarités avec d'autres disciplines.

Sur cette base, quatre sous-groupes composés de l'un des quatre étudiants-pilotes et de trois autres étudiants – chacun d'une discipline différente – ont été constitués (voir Figure 1).

2.2. Méthode pour l'analyse critique et la synthèse

Puisqu'une analyse de chaque session était le préambule à une réflexion transversale sur le colloque, les quatre étudiants-pilotes avaient défini,

1. Essentiellement au travers des réseaux de chaque étudiant-pilote et ceux des organisateurs de la manifestation, ainsi que de sites de recensement des doctorants et de leur sujet de thèse.
2. Les techniques d'animation utilisées étaient : 1) le jeu de la « patate chaude », permettant de retenir le prénom de chacun ainsi qu'un élément dévoilé lors de la présentation de chaque membre du groupe ; 2) le jeu du « téléachat », cherchant à mettre en avant ce que chaque discipline peut apporter au débat ; 3) le jeu de la « marguerite » (<http://s153269515.onlinehome.fr/idap/marguerite/>), initiant la réflexion autour des thèmes du colloque.

Figure 1. Présentation des étudiants et des quatre sous-groupes interdisciplinaires

en amont de la phase de recrutement, le plan de travail suivant.

a) Chaque sous-groupe était en charge de l'analyse d'une session par jour³. Ce processus impliquait la prise de notes lors de la session, un « débriefing à chaud » en cinq minutes – mené par le pilote – pour recueillir les impressions et les ressentis de chacun, puis un « débriefing à froid », d'une à deux heures, le soir ou le lendemain, à l'aide d'une grille de questions⁴. Cette dernière réunion devait permettre une décantation des sujets abordés et la rédaction des premiers pans d'analyse de la session.

b) Au terme de la dernière table ronde, chaque sous-groupe a identifié un porte-parole, puis les quatre porte-parole se sont réunis avec les organisateurs pour, d'une part, échanger sur leurs principales conclusions et réflexions et, d'autre part, sur cette base, établir un diagnostic d'ensemble. L'objectif de cet exercice était de pouvoir présenter quelques premiers grands éléments de synthèse lors de la séance de clôture de la manifestation.

c) Le soir de la dernière journée, les étudiants-pilotes ont réuni l'ensemble du groupe, et ont convié les organisateurs de la manifestation. L'objectif était que chaque étudiant puisse, lors d'un tour de table, s'exprimer sur les points qui l'avaient marqués, tant sur le fond des discussions que sur des aspects plus organisationnels, afin de tirer un bilan complet du processus étudiant.

d) Si l'écriture d'un document de restitution ayant valeur d'actes du colloque faisait partie du « contrat » passé entre les organisateurs de la

manifestation et le groupe étudiant, rien n'avait été spécifiquement défini en amont quant au contenu précis du document (quels éléments et comment les organiser ?) et à la procédure d'écriture (qui écrit quoi ? qui coordonne ? quel calendrier ?). Une séance de travail a donc été organisée, le lendemain de la manifestation, pour débattre de ces éléments et établir une feuille de route. Devant l'engouement de chacun des participants à contribuer à l'écriture de ce texte, il a été décidé avec les organisateurs de la manifestation de suivre une structure de type Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) : mobiliser des coordinateurs pour l'ensemble du texte, des coordinateurs de section, puis des contributeurs chargés d'alimenter, avec les coordinateurs, le contenu des idées et leur formalisation.

3. SYNTHÈSE DES SESSIONS ET DES DISCUSSIONS

(coordinateur : Yann Chavaillaz)

Le colloque-débat a été structuré (voir Annexe) de manière à pouvoir aborder la problématique des incertitudes inhérentes au changement climatique sous diverses facettes. La séance d'ouverture avait pour vocation de poser un cadre aux discussions des deux journées, et ce sur divers éléments génériques :

- un état de l'art des connaissances scientifiques sur les différentes sources d'incertitudes ;
- un aperçu des diverses approches utilisées par les groupes de travail n°1 et n°2 du GIEC dans le cadre de son cinquième rapport d'évaluation publié en 2014 ;
- une première réflexion sur les barrières imposées par l'incertitude lors du processus d'aide à la décision ;

3. Seule la conférence d'ouverture a été analysée par deux sous-groupes, en raison de sa durée.

4. Ces questions abordaient le contenu des présentations et débats, leur forme et les critiques ou recommandations que le sous-groupe en tirait.

- une présentation de la manière dont les climatologues abordent la question des services climatiques.

Trois séances plénières et trois tables rondes ont ensuite constitué le corps des deux journées, en impliquant, comme énoncé dans l'introduction, diverses sphères de la décision et de l'action autour de trois messages fondamentaux :

- malgré le nombre important d'incertitudes, celles-ci ne doivent pas masquer le fait que l'on a aussi, et surtout, beaucoup de certitudes dans le domaine du changement climatique ;
- tout un panel d'acteurs est impliqué dans le processus de réflexion et donc plusieurs conceptions de l'incertitude coexistent ;
- la présence d'incertitudes doit nous obliger à nous poser les bonnes questions.

Les tables rondes ont plus particulièrement permis de mettre en perspective les points soulevés lors des séances plénières autour de questions relatives à la prise en compte des incertitudes dans les décisions prises au niveau industriel, politique et opérationnel.

Cette section résume les principaux éléments ayant émergé des présentations et des discussions qui s'en sont suivis, puis permet à notre groupe de futurs acteurs de poser un regard critique sur ces points de débat (texte en italique). Elle est divisée en sept sous-sections représentant chacune une session du colloque.

3.1. Conférences d'ouverture

(auteur principal : Yann Chavillaz ; co-auteur : Amandine Amat)

Dans un premier temps, deux intervenants⁵ nous ont proposé un panorama des différentes incertitudes inhérentes aux travaux de modélisation climatique et de la manière dont elles sont présentées dans les rapports les plus récents des deux premiers groupes de travail du GIEC. Sylvie Joussaume, directrice du GIS-Climat-Environnement-Société, a rappelé les différents éléments abordés lors d'une précédente rencontre organisée sur ce thème en juin 2012. Il existe une grande diversité d'incertitudes sur le futur climatique (processus et impacts), qui se combinent à d'autres incertitudes d'origines non climatiques : socio-économiques, politiques, cognitives, etc. Certaines d'entre elles prennent même davantage d'importance que

celles qui sont strictement liées au climat, comme par exemple, celles qui sont relatives à la modélisation du fonctionnement propre des écosystèmes. Hervé Le Treut, directeur de l'IPSL, s'est concentré ensuite sur les incertitudes climatiques en elles-mêmes pour montrer qu'elles revêtent des formes bien plus diverses que les simples adverbes relatifs à la probabilité des différents résultats utilisés par le GIEC (« likely », « more likely than not », etc.). Elles sont parfois interprétées de manière différente d'un acteur à l'autre, ce qui introduit une part subjective dans le choix de ces adverbes. Elles sont donc difficiles à catégoriser d'une seule et unique façon. Différentes pistes avaient été proposées en juin 2012 pour améliorer la prise de décision en matière d'adaptation qui intègre l'existence d'incertitudes. Sylvie Joussaume a notamment évoqué le « Robust Decision Making », démarche consistant à considérer l'adaptation comme une stratégie itérative : les décisions prises à un moment donné doivent nécessairement être révisées et réorientées au fil du temps.

Adoptant un regard axé sur les sciences humaines, Alexandre Magnan, chercheur de l'Iddri, a tout d'abord rappelé qu'il est important de penser que s'adapter au changement climatique reste un impératif et non une option secondaire par rapport à l'enjeu d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre (GES). Si l'atténuation vise à « éviter l'ingérable », l'adaptation cherche à « gérer l'inévitable ». Dans un tel contexte, l'incertitude ne doit pas être un alibi pour une non-action face à des incertitudes qui sont d'ailleurs, pour partie, irréductibles. Une raison majeure à cela est qu'en parallèle des incertitudes, il existe beaucoup de certitudes, notamment sur les facteurs anthropiques qui expliquent le risque et pourquoi le changement climatique menace les sociétés. Par exemple, la vision « ingénieriste » de la société mène à des réponses qui peuvent être bénéfiques à court terme, mais préjudiciables à plus long terme, au sens qu'elles augmentent notre vulnérabilité. On parle alors de « mal-adaptation ». Au niveau même des politiques publiques, l'existence d'incertitudes n'est pas un frein à l'adaptation, la faible récurrence d'événements climatiques marquants ayant un poids plus important sur le manque de prise de décision. Sylvain Mondon, chargé de mission à l'Observatoire national des effets du réchauffement climatique (ONERC), a montré que la canicule de l'été 2003 avait permis aux acteurs nationaux de s'approprier la problématique du changement climatique. Les décisions « sans-regret » et réversibles le plus souvent mises en place permettent de contourner l'incertitude et la remplacent par celle liée à leur mise en œuvre. Enfin, Sylvain Mondon a rappelé que l'incertitude, d'origine climatique ou pas, est

5. Dans la suite du texte, les intervenants désignent toutes les personnes ayant fait une présentation formelle lors d'au moins une des deux journées.

un paramètre classique des politiques publiques et qu'elles ne sont donc pas nouvelles.

Les services climatiques ont, quant à eux, pour but de rendre intelligibles et utilisables les résultats des observations et des simulations climatiques par des acteurs qui, dès lors, pourraient s'en servir pour élaborer des mesures d'adaptation et d'atténuation. En conséquence, selon Robert Vautard, directeur de recherche au LSCE-IPSL, la création d'emplois, l'interdisciplinarité, la communication et la gestion des données constituent des enjeux significatifs. Leur développement dépasse la création de portails de données et doit nécessairement intégrer la clarification de la demande, les modalités d'offre d'accompagnement et de support à l'utilisation de ces données.

Les interventions portant sur la manière dont les incertitudes ont été traitées et perçues dans les discours scientifiques dépeignent un paysage encore flou et désordonné. Une réelle volonté de simplification et d'objectivation des discours était perceptible sans forcément que le but ait été atteint : l'utilisation de termes standards pour qualifier le niveau de certitude des résultats du GIEC ne sera pas forcément plus parlant aux non-spécialistes qu'une probabilité d'occurrence. Un participant⁶ a même fait remarquer que ce type de présentation normée entraîne une perte d'information importante et malheureusement domageable. Est-ce nécessaire de communiquer les incertitudes de cette façon sachant que pour les non-climatologues, leur signification reste très approximative ? Le lien entre cet effort et l'élaboration et la mise en œuvre de démarches d'adaptation n'est pas toujours immédiat. Il est également surprenant de constater que, jusqu'ici, les efforts consentis pour répondre à tous ces problèmes ont été le résultat d'un processus itératif de réponse à la critique en vase clos, uniquement entre spécialistes du changement climatique.

Un intervenant a également pointé l'existence d'une focalisation sur les événements extrêmes et sur les régions où la vulnérabilité est très perceptible. Qu'en est-il des changements moins visibles et plus graduels du changement climatique ? Certains d'entre nous jugent d'ailleurs discutable la notion de gestion pour qualifier le mode d'action propice à l'adaptation (i.e. gérer l'inévitable). Ce qui suggère que cette notion implique une certaine forme d'anticipation des problèmes et pas seulement des formes de réaction à des problèmes qui viennent de survenir. Bien entendu, cette approche est très discutable : nous « gérons » les catastrophes, mais quoi qu'il en soit, les changements graduels restent plus difficiles à appréhender que les événements extrêmes.

6. Dans la suite du texte, les participants désignent l'audience.

Dans le cadre des politiques publiques, l'articulation des échelles de la planification stratégique (niveau national, par exemple) et de la mise en œuvre concrète (niveau local, par exemple) a émergé comme une clé du débat. Plusieurs participants ont suggéré de se focaliser davantage sur les possibilités de « faire de l'adaptation sans le dire » (i.e. d'embarquer l'adaptation) pour adapter nos systèmes en répondant aux préoccupations plus prégnantes de la plupart des gens (i.e. d'inclure des politiques d'adaptation dans celles qui sont jugées importantes pour la majorité des gens).

Plus brièvement, l'approche actuelle de l'incertitude par la communauté scientifique semble en décalage avec la position de plusieurs autres personnes de l'assistance, comme des non-scientifiques ou des acteurs de terrain. C'est donc une réelle fonction de communication permettant de mettre les conclusions scientifiques à la portée de divers interlocuteurs qui reste à créer. N'est-ce pas justement le rôle des services climatiques ?

3.2. Séance plénière n° 1 : appréhension des résultats des projections climatiques, incertitudes et certitudes

(auteur principal : Camille Ferron ; co-auteurs : Marine Lugen, Yann Quilcaille, Xavier Mouroux)

En l'absence de l'une des intervenantes, Virginie Duvat (université de La Rochelle), la première séance plénière s'est concentrée sur le point de vue de climatologues. Elle a abordé l'un des thèmes clés du colloque, à savoir la tension entre incertitudes et certitudes. Des trois interventions, trois faits majeurs sont retenus.

- (i) La complexité est inhérente au climat et aux modèles climatiques. Le climat est influencé par une multitude de processus (les nuages, les relations océan/atmosphère, etc.). Cette complexité resurgit dans les modèles, qui sont les outils privilégiés des experts en climatologie pour comprendre le fonctionnement du climat passé et actuel, et pour tenter d'anticiper le climat futur. L'incertitude peut être réduite au sein de ces modèles, mais il ne faut pas attendre qu'elle soit éradiquée pour agir. Pour Pascale Braconnot, il faudrait bannir l'emploi du mot « incertitude » qui masque différentes réalités et qui tend à nuire au débat et à servir de prétexte à l'inaction.
- (ii) La communication de l'information climatique est primordiale. Il est intéressant et important de mettre à disposition des acteurs de la société civile (décideurs, entreprises, etc.) l'information issue de la recherche sur le climat.

Il se pose toutefois la triple question de la difficulté du vocabulaire, du niveau d'information et de la communication. La complexité inhérente au travail de la recherche ne doit pas transparaître dans la communication. Un autre écueil correspond à la connaissance ou à la compréhension de la vulnérabilité de l'acteur et de ses questions. Recourir à des « traducteurs » permet de faire un lien entre les scientifiques et les utilisateurs de l'information. Dans cette optique, se pose également la question de la commercialisation des modèles climatiques sous la forme de services climatiques. Cette question pourrait appeler à mener des raisonnements ultérieurs sur le prix éventuel de ces services, voire sur le bien-fondé de leur donner un prix.

- (iii) Des difficultés sont rencontrées lors de l'utilisation pratique des données issues de modèles climatiques. Certaines difficultés et limites pèsent dans l'applicabilité des données climatiques. Les plus importantes tiennent à la différence d'échelle entre des modèles climatiques globaux et de long terme, et des situations locales et de court à moyen termes. En conséquence de quoi le traitement de l'incertitude doit être adapté au contexte à la fois géographique et des temporalités de gestion (variables selon les acteurs) qui souhaite un recours à l'information climatique.

Cette première séance plénière a mis en avant des approches complémentaires de l'incertitude : certains acteurs estiment que la réduction des incertitudes n'a pas d'importance, tandis que d'autres insistent sur les avancées des modèles en termes de réduction de l'incertitude, même si les seconds admettent également qu'il ne faut pas attendre davantage pour agir.

La plus grande limite de cette séance a été le manque de cohérence entre le discours et les faits : si les climatologues qui sont intervenus ont fait un effort de communication, celui-ci est toutefois resté sur un registre trop technique pour le groupe d'étudiants, potentiellement représentatif de l'audience en ce qu'il ne comprenait pas que des climatologues. Notamment, la dimension sociale des questions d'adaptation, de vulnérabilité et de services climatiques a été absente des discours et des échanges. Le cas pratique présenté (le recours à un modèle climatique pour un problème local de gestion de l'eau) a permis d'insister sur le besoin de faire converger la façon de se poser les questions avec les capacités des modèles climatiques plutôt que de chercher à résoudre directement les problèmes des utilisateurs.

Enfin, on peut regretter que l'idée d'une construction conjointe des questionnements entre scientifiques et acteurs de terrain, largement évoquée lors

des questions aux intervenants, ait été peu mise en valeur dans les présentations en elles-mêmes. De même, le rôle et la place des « traducteurs » auraient pu être davantage discutés car à ce stade du débat, ce que recouvre la notion de « traducteur » restait flou.

3.3. Séance plénière n° 2 : différents acteurs, différentes conceptions de l'incertitude

(auteur principal : Leslie Tourneville ; co-auteurs : Sabine Giguët, Amélie Rajaud)

La seconde séance plénière a décliné les approches d'un prospectiviste, d'un acteur public national et d'un acteur public local sur les modalités de création et d'utilisation de scénarios prospectifs dans la prise de décisions en matière d'adaptation.

Sébastien Treyer, directeur des programmes à l'Idri, a insisté sur la distinction entre prospective et analyse de risques. Tandis que l'analyse de risques vise généralement à établir un diagnostic scientifique et des probabilités d'incidence d'un événement en relation avec son niveau d'impacts, la démarche prospective s'inscrit dans une démarche de concertation. Nécessitant de rassembler divers acteurs, elle vise à faire émerger des futurs possibles en conjuguant les trois champs épistémologiques du déterminisme, du hasard et de la liberté des acteurs. Autre différence notable, la démarche prospective cherche surtout à construire un discours systématique qui ne soit pas limité par les questions des probabilités, et donc des incertitudes. L'objectif de la prospective est d'ouvrir des forums de discussion sur l'avenir, intégrant une dimension non seulement technique mais également socio-économique et de gouvernance. À ce titre, Sébastien Treyer a plaidé pour la prise de parole des scientifiques au sein de ces forums et pour l'intégration de la démarche prospective au sein de leur propre discipline. Il regrette également que la prospective ne soit que trop peu utilisée dans les analyses de risques.

Dans un deuxième temps, Sylvain Mondon de l'ONERC a explicité pourquoi, dans le cadre du Plan national d'adaptation au changement climatique, le choix a été fait de ne pas communiquer autour de cette notion d'incertitude. En effet, les plans d'adaptation nationaux ont pour objectifs la sensibilisation, la mobilisation et l'action des acteurs, ce qui explique le point de vue du ministère selon lequel la communication doit privilégier les informations robustes, simplifier le message sans le dénaturer et limiter les ambiguïtés, tout en évitant l'illusion de l'absence de complexité. L'arbitrage politique en termes de réponse aux aléas climatiques, ponctuels comme graduels, doit reposer

sur une analyse plus systémique du problème climatique : il devrait donc intégrer les divers facteurs d'influence des vulnérabilités d'un territoire, les coûts (économiques, mais aussi sociaux et environnementaux) des mesures possibles, et l'examen des transferts potentiels de vulnérabilité d'une population sur une autre, d'un secteur à un autre, d'un territoire à un autre. L'essentiel de l'action publique consiste aujourd'hui à faire face, non pas aux incertitudes sur l'avenir météorologique, mais aux vulnérabilités au climat actuel : objectif qui n'est pas encore largement atteint.

Finalement, Thomas Pelte, chargé de mission à l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, a montré que les acteurs politiques locaux appréhendent mal les changements climatiques de long terme et la réflexion sur les « futurs possibles » en raison du caractère désincarné du sujet, contrairement aux « aléas vécus » des retours fréquents d'événements extrêmes sur leur territoire. Or, pour lui, seule la répétition d'événements extrêmes peut éventuellement induire l'idée auprès des acteurs publics qu'il faille penser l'aménagement du territoire en termes de rupture et de long terme. De même que Sylvain Mondon, Thomas Pelte montre au travers de son expérience de terrain qu'une fois l'état des connaissances établi sur ce que l'on sait et ce que l'on ne sait pas, l'accent est mis sur la vulnérabilité des territoires et le panel de mesures d'adaptation possibles. Toutefois, des stratégies dites du « sans-regret », souvent mises en avant à des fins communicationnelles, sont fréquemment implémentées sans pourtant que ce terme soit explicité ni qu'il y ait concordance des différents acteurs sur sa signification en termes d'actions concrètes. Cela renvoie à l'idée du risque d'éventuelle « mal-adaptation » derrière des actions prises au nom du « bon sens ».

Ces interventions ont montré une fracture nette entre les tenants de l'analyse prospective en tant que discours fondamentalement multi-acteurs et pluridisciplinaire et les tenants de l'analyse des vulnérabilités et de gestion des risques. Les présentations n'ont pas permis de savoir si les acteurs publics locaux ou nationaux se servaient de l'outil de la prospective : nul exemple n'a été donné des initiatives locales de création de ponts entre ces deux univers de pensée, ou de l'utilité potentielle d'une complémentarité des approches.

Cette apparence d'étanchéité entre ces deux démarches est liée à la question de l'importance accordée aux résultats des études des chercheurs des sciences humaines dans la réflexion des acteurs politiques sur l'évolution de leur territoire d'action. Sébastien Treyer a ainsi défendu l'idée que les chercheurs en sciences sociales devraient investir la sphère politique, sans avoir besoin de traducteurs.

La question du rôle que doit tenir le scientifique en matière de communication est réapparu à diverses reprises durant tout le colloque au travers des remarques du public, amenant à une autre question elle aussi centrale au regard des débats de ces journées : celle des multiples rôles publics qu'il est demandé au chercheur d'endosser en fonction des contextes de débat ou de prise de décision. Sa position sociale de « savant » fait du chercheur à la fois le garant d'un processus rigoureux de discussion politique, l'expert amené à donner et hiérarchiser des recommandations d'ordre stratégique et, pour les chercheurs en sciences sociales, le principal connaisseur de l'aspect socio-économique de l'adaptation.

Si une concordance des points de vue semblait se dégager entre les trois intervenants sur la nécessité de communiquer sur des informations robustes sans donner l'illusion de la certitude, cette tension incertitudes/certitudes reste toutefois très délicate à mettre en pratique de l'avis de chacun des intervenants. L'exemple de la mise en avant de politiques de « sans-regret » illustre le paradoxe de vouloir répondre simultanément à deux exigences a priori contradictoires : promouvoir efficacement et simplement l'action publique, d'une part, et rendre intelligibles les nuances des problèmes rencontrés, voire l'absence de connaissances sur les aléas, d'autre part. La présentation d'exemples de modalités de communication différentes suivant les publics aurait été pertinente à cet égard.

3.4. Séance plénière n° 3 : lever les barrières de l'incertitude

(auteur principal : Adrien Comte ; co-auteurs : Yann Chavillaz, Vivian Dépoues, Roxane Sansilvestri)

Cette dernière séance évoquait les barrières liées à l'incertitude au travers du point de vue d'acteurs de terrain tentant de mettre en œuvre des mesures d'adaptation dans différents secteurs. Didier Taverne, expert en urbanisme, a défendu l'idée que l'incertitude sur le changement climatique ne joue pas un rôle dominant dans l'élaboration et la mise en œuvre des plans d'urbanisme. Ceux-ci sont plutôt influencés par les perspectives d'avenir du territoire en termes économique et social. À ce jour, le changement climatique n'est pas pris en compte dans la plupart de ces plans, et ce pour plusieurs raisons : les villes sont réticentes à exposer leur vulnérabilité, les services techniques ne sont pas compétents pour traiter de pluridisciplinarité et les élus ont des difficultés à engager leur responsabilité.

Ensuite, Nicolas Rossin de l'Agence française de développement (AFD) a affirmé que l'incertitude est souvent contournée dans les projets de

développement en se focalisant sur les variations du climat actuel et sur les aspects de sans-regret et de robustesse de l'adaptation. Il a rappelé que cela tient au fait que la mission de départ d'agences comme l'AFD est et reste le développement, donc la démarche consiste à intégrer la composante adaptation dans l'objectif de développement, et non pas l'inverse. Et ce d'autant que la plupart du temps, les informations climatiques font défaut dans les dossiers de présentation des projets.

Hubert Carré, du Comité national des pêches, a estimé que les acteurs de ce secteur, en particulier les pêcheurs eux-mêmes, ont toujours vécu avec l'incertitude climatique, du moins météorologique. Par une approche empirique de transmission intergénérationnelle, ils ont toujours su y faire face. Ici, le vécu du secteur est que l'approche scientifique et mathématique s'oppose à la démarche empirique, et est donc déconnectée de la réalité du quotidien. Les problématiques dominantes dans l'activité de la pêche sont les quotas, les restrictions de pêche et la pollution, non le changement climatique.

Enfin, Frédéric Levraux, représentant de la Chambre d'agriculture Poitou-Charentes, a insisté sur le fait que pour les acteurs des territoires, l'incertitude relève surtout d'un manque de compréhension de la variabilité et du changement climatique. À partir de là, il est important de travailler avec les responsables pour créer des référentiels d'action collectifs, de pousser à réfléchir à long terme, mais aussi d'améliorer les projections décennales pour mieux coller aux pas de temps de la décision sur les territoires. Frédéric Levraux a également exprimé le fait que l'agriculture a sa place dans la réflexion sur les services climatiques, notamment sur le volet expression de la demande.

Deux types de raisonnement se sont distingués : un contournement de l'incertitude (selon les trois premiers intervenants) et une prise en compte de l'incertitude en exprimant l'existence d'un réel besoin de services climatiques. Une prise de conscience des acteurs a généralement été observée aux travers des présentations, tout en relativisant l'importance de l'incertitude climatique. La levée des barrières liées à l'incertitude est importante, mais ne suffirait pas à éliminer la problématique plus générale de l'incertitude (sur les trajectoires socioéconomiques, par exemple) à laquelle les politiques d'adaptation sont confrontées par nature. De manière générale, les recommandations faites se sont orientées vers l'implication des personnes concernées dans le processus de décision. Il apparaît que des conflits d'intérêt entre les acteurs de terrain, les décideurs et les scientifiques existent et pourraient freiner la conception et la mise en place de stratégies d'adaptation. Ces prises de position pourraient s'estomper pour laisser place à une distribution cohérente de l'information

et à une co-construction de stratégies d'adaptation. Il semble facile de sensibiliser les acteurs aux événements extrêmes, mais la prise en compte de tendances plus graduelles (l'élévation du niveau de la mer, par exemple) se fait beaucoup plus difficilement. Enfin, seul le représentant de la Chambre d'agriculture a mis en évidence la nécessité et l'utilisation des services climatiques, ce qui pourrait s'expliquer par la dépendance directe de ce secteur aux conditions climatiques.

3.5. Table ronde n° 1 : les industries face aux (in)certitudes

(auteur principal : Amélie Rajaud ; co-auteurs : Sabine Giguet, Marien Ranché et Leslie Tourneville)

Pour discuter de la question des industries face aux incertitudes et à l'anticipation du risque climatique, les trois participants – Michel Kolacinski (Climpact-Metnext), Hubert Kieken (Stratégies durables conseil), Claude Derognat (Aria Technologies) – intervenaient chacun en qualité de consultant dans une start-up fournissant des services météorologiques et climatiques pour des entreprises industrielles et commerciales. Les invités issus directement du secteur industriel n'avaient pas pu être présents.

Les mots-clés du colloque, incertitude et adaptation, ont été peu utilisés au cours de l'échange, et la discussion s'est établie principalement autour de deux défis pour les consultants : transformer les données climatiques complexes issues du GIEC en une information pertinente pour leurs clients industriels, et dépasser le caractère confidentiel des informations relatives à la vulnérabilité au changement climatique spécifique à chaque entreprise cliente.

D'après le retour d'expérience des trois intervenants, les industriels ne souhaitent pas recevoir une information climatique entourée d'incertitudes, mais plutôt un « avis d'expert ». Fournir un service climatique implique donc pour les consultants d'assumer la responsabilité de ne transmettre au client que l'information la plus pertinente pour sa prise de décision. Tous trois ont fait le constat que les résultats du GIEC sont, en l'état, très éloignés des intérêts des industriels, très complexes à retravailler dans le sens de demandes industrielles spécifiques. De plus, ils ont constaté que la tâche devenait de plus en plus difficile avec la complexification croissante des rapports du GIEC. Ainsi, pour transmettre une information au même niveau de pertinence à leurs clients, les consultants font face à un traitement de l'incertitude dans les données climatiques de plus en plus ardu. En outre, l'activité de fourniture de services climatiques est encore

embryonnaire aujourd'hui, et une de ses principales problématiques est d'identifier les questions auxquelles il est possible de répondre grâce aux données climatiques.

Par ailleurs, les intervenants ont rapporté que leur activité de conseil était principalement centrée autour des services météorologiques ou de tendances à court terme (saison), les services climatiques en lien avec le changement de climat étant, quant à eux, peu demandés. Les rares contrats portant sur ces derniers sont obtenus après une première collaboration sur des services météorologiques. Une explication tient dans le décalage entre la perspective à long terme (quelques dizaines d'années) du changement climatique et l'horizon stratégique des industriels de court à moyen terme (quelques années au mieux). En outre, les entreprises estiment pouvoir supporter les risques potentiels, en tout cas jusqu'à preuve du contraire. Cela est toutefois à nuancer par une problématique soulignée par l'ensemble des intervenants : la vulnérabilité de l'entreprise est un sujet sensible, souvent confidentiel, difficile à aborder avec les industriels. Or, d'après les intervenants, la caractérisation de la vulnérabilité spécifique de chaque entreprise constitue un préalable nécessaire au développement d'une stratégie d'adaptation. Dans ce contexte, comment, déclencher le processus d'adaptation au changement climatique ? Une situation de crise, par exemple la survenue d'un événement climatique extrême, ou une incitation des politiques publiques, pourraient servir de déclencheur auprès de quelques industriels, entraînant à leur suite d'autres entreprises. Les intervenants ont souligné le rôle central des pouvoirs publics, qui explique en partie que les principaux industriels commençant à s'intéresser à ces questions sont d'anciennes entreprises publiques (EDF, GDF, SNCF). Mais ces cas d'école ne permettent pas de se faire une idée précise de ce qu'un « industriel » peut réellement attendre ou entreprendre sur la question de l'adaptation au climat futur.

La réserve des industriels à communiquer sur leur vulnérabilité a trouvé un écho dans la réserve des intervenants à exposer concrètement les besoins et les facteurs de vulnérabilité de leurs clients. Cette discrétion, légitime, a mis un frein à un débat qui aurait pu être constructeur d'idées et de recommandations dans le cadre de ce colloque, par exemple sur la question des besoins des industries en matière de connaissances sur le changement climatique et sur celle du niveau d'incertitude de l'information climatique à leur transmettre. Par ailleurs, la question du coût économique du risque et de celui des mesures d'adaptation et d'atténuation, pourtant posée dès l'introduction par Anne-Cécile Bras, journaliste à Radio France international et qui animait cette

table ronde, n'a jamais été abordée au cours de la session. Enfin, la question de l'adaptation dans un contexte d'opportunités nouvelles, ou de mesures « gagnant-gagnant », posée par la salle, a été rapidement écartée.

3.6. Table ronde n° 2 : politiques publiques

(auteur principal : Adèle Revelard)

Le déroulement de cette table ronde a montré une forte disparité dans les points de vue de Thierry Hubert (ministère de l'Environnement, du Développement durable et de l'Écologie), Céline Phillips (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), Amélie Roche (Centre d'études et d'expertise sur les risques, la mobilité et aménagement) et Ghislain Dubois (TEC-Conseils) quant aux difficultés engendrées par l'incertitude. Pour certains, les incertitudes sont très difficiles à gérer car, dans un contexte de dialogue avec les politiques publiques, elles deviennent un moyen de mettre en doute les connaissances scientifiques et de freiner l'action. Pour d'autres, l'incertitude n'est pas un problème et permet au contraire de prendre des décisions adéquates. Mais cela nécessite tout de même une certaine stratégie de communication.

Cette stratégie consiste à instaurer un dialogue, durant lequel il faut expliquer, argumenter, et ne pas forcément tout montrer. Il s'agit avant tout de se mettre à la place de son interlocuteur et de lui présenter uniquement les données qui lui sont utiles. L'incertitude n'est alors pas considérée comme une méconnaissance, mais au contraire comme un élément de connaissance. Le problème est plutôt dans l'interprétation et la perception de chacun des problèmes induits par le fait de n'être pas certain. Ici réside toute la difficulté du dialogue : pour sensibiliser son interlocuteur et l'inciter à agir, il faut lui parler sous l'angle des valeurs qui l'intéressent, parler son langage, tout en portant un message constructif, par exemple en parlant du rapport coût-bénéfice.

Pour que le processus d'adaptation soit réellement itératif, les politiques publiques se doivent d'être flexibles, c'est-à-dire qu'elles doivent se mettre en position d'avoir une gestion évolutive reposant sur un suivi, une évaluation et une procédure d'ajustement des mesures politiques. L'un des freins à cette flexibilité vient du fait que les responsables politiques sont dans l'action à une échelle de temps trop courte par rapport au processus d'adaptation à mettre en place.

Cette table ronde sur les politiques publiques, si elle a rassemblé des représentants de l'État, n'a pas

impliqué d'élus. Le débat a donc cruellement manqué d'une analyse concernant les difficultés rencontrées au quotidien par nos élus dans l'élaboration des plans territoriaux et nationaux. Surtout que, d'après Frédéric Levrault (Chambres d'agriculture de France), ces plans ne donnent que de grandes orientations et restent assez vagues. Ils manquent d'explications concrètes quant à la stratégie à adopter par les acteurs pour atteindre les objectifs visés. Quelles sont les raisons pouvant expliquer que les politiques restent aussi évasives dans ces projets ?

Plusieurs participants ont fait remarquer que la principale incertitude qui imposait des barrières n'était pas climatique, mais relevait de la question de la responsabilité territoriale. En effet, le gouvernement a chargé les collectivités territoriales de mettre en place des plans d'adaptation, mais celles-ci manquent de moyens pour accomplir cette tâche correctement. Dès lors, les élus se réfugient souvent dans l'attentisme. L'un des problèmes soulevés vient également du fait que la société civile a un rapport à l'expertise qui est désuet par rapport au problème du changement climatique. Trop de responsabilité est donnée à l'expert, qui établit un rapport scientifique rigoureux et souvent trop difficile à comprendre pour la cible à laquelle il s'adresse, car celle-ci est la plupart du temps non initiée à la démarche scientifique. Les incertitudes scientifiques sont alors utilisées comme alibi pour remettre en cause le rapport d'expert.

Plusieurs questions cruciales émanent donc de ce débat. Une première série renvoie au champ des politiques publiques : qui doit avoir la responsabilité de la mise en œuvre du processus d'adaptation au changement climatique ? Quels rapports d'échelles institutionnelles sont à considérer ? Un autre pan concerne la place du scientifique dans la chaîne de la décision et peut se résumer par la question suivante : le scientifique doit-il être seulement en amont ou bien s'impliquer davantage dans les étapes qui utilisent les données qu'il produit ?

3.7. Table ronde n° 3 : intégrer et communiquer l'incertitude dans les services climatiques

(auteur principal : Camille Ferron ; co-auteurs : Marine Lugen, Yann Quilcaille)

L'émergence d'une sensibilité collective aux questions climatiques, liée pour partie à l'agenda des négociations internationales sur le climat, ainsi que l'augmentation et la diversification de la demande de données a conduit au développement des services climatiques ces dernières années. Les cinq intervenants de cette table ronde (Florence Rudolf, sociologue ; Harilaos Loukos,

Climapact-Metnext ; Serge Planton, Météo France ; Ghislain Dubois, TEC-Conseils et Jean-Paul Vanderlinden, Université de Versailles et Saint-Quentin-en-Yvelines) ont défendu plusieurs conceptions des services climatiques : comme objet de recherche, comme service commercial ou comme mise à disposition de données pour un large public.

Ils se sont rejoints sur la nécessité de faire un pont entre données climatiques techniques et utilisateurs non-scientifiques potentiels. Cependant, ils ont divergé sur les modalités de cette communication. Certains ont insisté sur la mise en place d'intermédiaires, de « traducteurs » type consultants, et sur la formation des acteurs à l'utilisation des données climatiques. D'autres ont mis en avant le rôle d'intermédiaire joué par les sciences sociales dans le cadre d'une approche territorialisée – par exemple en menant des enquêtes de terrain afin de mettre en évidence la perception de la vulnérabilité par les acteurs dans un contexte précis. D'autres encore ont évoqué la construction conjointe des processus entre scientifiques et acteurs de terrain, entre offre et demande.

Cela traduit trois visions qui s'opposent. D'un côté, une vision marchande des services climatiques, portée par les consultants qui insistent sur le nécessaire accompagnement des utilisateurs et distinguent « services climatiques » et « services d'adaptation ». De l'autre, une vision valorisant la démocratie participative et la co-construction à la fois de l'offre (comment on formalise les données des scientifiques) et de la demande (comment on l'aide à s'exprimer). Et finalement, une vision « open data » selon laquelle les services climatiques se limitent à la mise à disposition de données.

La responsabilité des chercheurs et des journalistes en termes de communication a également été évoquée. Enfin, cette table ronde a soulevé la question de la diffusion des services climatiques au grand public, alors qu'actuellement, ils sont surtout ciblés vers des utilisateurs « éclairés » comme, par exemple, des entreprises de gestion de l'eau ou productrices d'électricité. À ce sujet, il a été rappelé par les intervenants que le grand public ne constitue pas une catégorie unifiée. Puis un intervenant a mis en garde contre l'instrumentalisation des services climatiques par des acteurs privés afin d'augmenter leur part de marché.

Le premier élément de critique est que les aspects économiques des services climatiques n'ont pas été abordés. Contrairement à ce qu'aurait pu laisser entendre l'intitulé de la table ronde, le débat a moins été centré sur l'incertitude que sur la place et le rôle du chercheur et des différents acteurs dans la diffusion de services climatiques, notamment

dans le contexte actuel de diminution des dépenses publiques.

Une autre question cruciale que soulève l'analyse critique du débat est celle du dialogue entre des acteurs (consultants, chercheurs producteurs de données, chercheurs en sciences sociales, utilisateurs de services climatiques, etc.) qui ont des intérêts et des « valeurs » différents, voire parfois opposés.

Au final, la diversité des intervenants a offert une multitude de points de vue qui semblent à la fois compréhensibles, mais peu conciliables. Leur diversité d'expertise, mais également la diversité des formations des étudiants observateurs, ont provoqué différentes réactions, critiques et interrogations. Trois points essentiels ressortent très souvent dans nos réflexions et sont développés plus en détail dans la section 4.

4. DISCUSSION

(coordinateur : Yann Quilcaille)

Les thèmes récurrents ayant suscité des interrogations et discussions dans notre groupe concerne la pertinence des incertitudes, le rôle des différents acteurs et la perception des aléas climatiques et de leur communication. Ces différents points sont développés respectivement dans les sections 4.1, 4.2 et 4.3 ci-dessous en gardant comme fil conducteur l'adaptation au climat futur.

4.1. Pertinence des incertitudes

(auteur principal : Amélie Rajaud ; co-auteurs : Yann Chavaillaz, Marine Lugen, Yann Quilcaille)

Un premier constat fort de notre groupe au terme des deux journées est que le mot-clé de cette manifestation, l'incertitude, a été écarté d'entrée de jeu dans plusieurs interventions. Ceci pose la question de sa pertinence par rapport au sujet de l'adaptation au changement climatique.

Ainsi, de nombreux intervenants remettent en cause la pertinence même de poser la question de l'incertitude pour aborder la question de l'adaptation au changement climatique. Ils le justifient en explicitant que les acteurs avec lesquels ils interagissent ne recourent pas, pour la très grande majorité, à la notion d'incertitude. Le sujet est en effet abordé avec gêne dans certains exposés, où l'on sent qu'un effort a été fourni pour « coller » à la thématique. Il ressort de ces interventions une certaine artificialité à essayer d'identifier, de caractériser et de positionner la question des incertitudes climatiques par rapport à leurs domaines d'activité respectifs.

4.1.1. Question des incertitudes climatiques au cours d'un processus de transmission de l'information vers l'adaptation

L'incertitude portant sur l'information climatique fut la plus discutée lors du colloque, ce qui explique qu'elle occupe une grande part de cette section. Pour comprendre en quoi la pertinence des incertitudes climatiques peut être mise en question, nous nous plaçons dans le cadre d'un processus de transmission de l'information produite par les scientifiques, travaillant sur les processus et les modélisations climatiques, à des non-climatologues (autres scientifiques, acteurs publics ou privés, etc.) en vue de l'élaboration de stratégies d'adaptation et de leur mise en œuvre. On parlera dans la suite de ce document de « processus vers l'adaptation ». Deux postulats sont implicitement acceptés lors du colloque, dans la majorité tant des présentations que des débats avec la salle. Premièrement, aborder la question de l'incertitude est pertinent, au moins au stade de la production de la donnée scientifique (par nature incertaine). Deuxièmement, cette incertitude doit finir par être dépassée, au plus tard lors de la prise de décision pour l'action. Partant de ce constat, la question de la pertinence des incertitudes renvoie à quatre autres questions, plus concrètes : (i) poser la question de l'incertitude demeure-t-il pertinent au cours du processus vers l'adaptation ? (ii) Quand et pourquoi cesse-t-il d'être utile d'aborder cette question, à quel moment du processus vers l'adaptation ? (iii) Qui porte la responsabilité de trancher et de proposer une information simplifiée ? Et (iv) comment lever les barrières inhérentes à l'incertitude ?

- › (i) Poser la question de l'incertitude demeure-t-il pertinent au cours du processus vers l'adaptation ?

Dans le cas où les intervenants se positionnent par rapport à la transmission d'une information climatique, donc en amont de la prise de décision, l'incertitude est considérée soit comme une composante essentielle de l'information à transmettre, soit comme un obstacle à une communication efficace. Dans les deux cas, il est pertinent de poser la question de l'incertitude, de la qualifier et de la quantifier, quel que soit le sens de la réponse (« il faut communiquer sur l'incertitude ou « il faut s'en affranchir »).

Lorsque les intervenants se placent du point de vue de la prise de décision, alors la question est de savoir à quelle étape du processus de décision la dimension « incertitude » de l'information utilisée doit être présentée. Divers intervenants considèrent qu'au stade de la prise de décision finale, poser la question de l'incertitude n'est plus

pertinent, et que c'est sur la base d'une information simplifiée que l'action doit être construite (exemple du secteur industriel). D'autres, en revanche, défendent l'idée que les décideurs finaux doivent avoir accès à l'information complète, avec sa dimension d'incertitude, et qu'il leur appartient de trancher dans cette incertitude à la lumière de leur problématique (exemple de l'aménagement littoral).

Poser la question de la pertinence de l'incertitude apparaît donc crucial et incontournable dans le cadre d'une démarche réflexive sur le processus allant de la production de données scientifiques sur le changement climatique à l'élaboration et la mise en œuvre de stratégies d'adaptation, ce qui constituait bien l'un des objets du colloque. En revanche, sur le plan pratique, lorsque l'on s'intéresse à la manière dont l'information climatique doit être portée, par qui, comment et en fonction de quels destinataires, il nous apparaît qu'aborder la dimension d'incertitude n'est pas toujours pertinent. Le caractère artificiel que nous avons ressenti dans la manière de certains intervenants d'aborder la question des incertitudes, dans le cadre de ce colloque-débat, peut ainsi être expliqué par leur positionnement à titre d'acteurs dans le « processus vers l'adaptation ». Dans le cadre de leur activité, ils se situent en aval du processus et préfèrent utiliser une information déjà simplifiée pour élaborer des stratégies d'adaptation. Il n'est plus utile, à ce stade, d'aborder la question de l'incertitude qui ne se pose plus dans le cadre de leur activité.

Dans les deux cas, on suppose un processus linéaire de gouvernance partant d'une information scientifique présentée à la fois dans ses dimensions de certitude et d'incertitude, puis passant par une appropriation de cette information par des acteurs « éclairés ». Ces derniers n'ont donc plus qu'à prendre les décisions adéquates. Une autre vision a cependant aussi émergé au cours de plusieurs sessions de ce colloque : plutôt que linéaire, le processus vers l'adaptation se doit d'être itératif. Selon ce point de vue, les questions associées au traitement de l'incertitude se posent dans des termes différents que dans une vision linéaire. En particulier, les informations scientifiques utilisées pourront être transmises aux décideurs avec un niveau croissant de complexité d'une itération à la suivante, permettant une assimilation progressive de l'information.

► (ii) Quand et pourquoi poser la question de l'incertitude cesse-t-il d'être pertinent ?

Dans le cas où l'incertitude est jugée pertinente tout au long du processus vers l'adaptation, les intervenants parlent de « décision en contexte d'incertitude ». Ils étaient représentés lors de ce

colloque par des agents des pouvoirs publics et des porteurs de projets territoriaux. L'information transmise contient tout ou une partie de son incertitude et ce jusqu'aux décideurs finaux.

Dans le cas où l'incertitude cesse d'être pertinente avant l'étape finale de prise de décision, les intervenants rapportent ne pas utiliser le terme d'incertitude dans leur activité et la considèrent comme non pertinente lorsqu'il s'agit de prendre une décision. Cette attitude est adoptée aussi bien par les intervenants issus des pouvoirs publics que par des consultants en entreprise.

Enfin, dans le cadre d'un processus non linéaire vers l'adaptation, l'incertitude devrait inclure un niveau de complexité et d'incertitude progressivement plus élevé : les différentes facettes de l'incertitude peuvent être introduites au fur et à mesure en fonction du raffinement des questions ou enjeux traités. Cette idée d'un processus itératif, proposée lors d'interventions de la salle, semblait bien accueillie. Néanmoins, comme il a été souligné par un bon nombre d'intervenants, sa mise en œuvre sur le terrain nécessiterait un remaniement des politiques publiques : celles-ci sont trop rigides en l'état pour permettre de mettre en place des actions limitées mais remodelées de manière récurrente et à court terme.

► (iii) Qui porte la responsabilité de lever les barrières inhérentes à l'incertitude ?

Dès l'étape de la transmission de l'information produite par les chercheurs, la responsabilité de proposer un traitement de l'incertitude scientifique, impliquant nécessairement une simplification, est considérable. Comment communiquer aux acteurs non scientifiques une information à la fois robuste et utile ? Comment simplifier l'information sans la corrompre ? Et quel degré de simplification sera suffisant pour que l'information reste pertinente du point de vue de la prise de décision ?

D'une part, le niveau de rigueur accompagnant la transmission de l'information sur la donnée climatique porte le risque, s'il est trop élevé, de nuire à la compréhension de cette information par le public non spécialiste (des tableaux de chiffres ou des cartes trop complexes, par exemple). L'information risque alors de n'être ni audible, ni appropriée, tout cela au détriment de l'importance d'engager l'action concrète.

Au contraire, si ce niveau de rigueur est trop faible, le risque est que l'information, trop simplifiée, soit mal comprise : le public est alors mal informé, voire désinformé, ce qui peut conduire à la prise de décisions inappropriées, voire contre-productives. Par exemple, si l'on se place du point de vue d'un outre-mer français, un discours du type « le changement climatique va augmenter

le nombre de cyclones très intenses », sans que ne soient évoquées en parallèle les incertitudes scientifiques sur cette relation changement climatique/cyclones, peut conduire à une fortification des côtes à l'aide d'ouvrages lourds de défense du littoral. Or, une telle option appliquée de manière systématique à l'ensemble d'un linéaire côtier, sans considération de la nature des enjeux à protéger, peut engager le territoire sur une trajectoire onéreuse (le coût de l'entretien des digues, par exemple) et contreproductive du point de vue de l'érosion côtière (les digues empêchent le sable de revenir par temps calme), donc une trajectoire de «maladaptation». Les scientifiques sont de ce fait particulièrement sensibles au risque de transmission d'une information déformée, car ils sont investis, au moins implicitement, de la responsabilité de la production et de la transmission d'une information fiable. Quelques exemples en France et à travers le monde montrent même qu'ils peuvent être contraints d'assumer judiciairement les conséquences d'effets néfastes de décisions fondées sur une information simplifiée et alors jugée « non fiable ».

La répartition des rôles entre les différents acteurs est approfondie dans la section 4.2. On distingue néanmoins dès à présent deux attributions possibles de la responsabilité de lever les barrières inhérentes à l'incertitude de l'information climatique.

D'abord, dans le cas où la prise de décision est construite sur une information dépourvue d'incertitude, celle-ci est tranchée avant transmission aux décideurs, donc en quittant la sphère scientifique. De sorte que ce sont les scientifiques eux-mêmes, ou bien des relais intermédiaires, qui portent la responsabilité de trancher dans l'incertitude et de proposer une information simplifiée. Ceci pose directement la question de la responsabilité de l'expert, qui est souvent le scientifique.

Ensuite, dans le cas où la prise de décision se fait sur la base d'une information complète (degrés de certitude et d'incertitude), alors cette responsabilité est partagée collectivement. Cela suppose cependant que les acteurs non seulement aient reçu une information compréhensible par eux, mais également qu'ils disposent des compétences nécessaires pour appréhender cette information (son degré de fiabilité), ce point nous amenant au suivant sur la question de la communication.

» (iv) Comment lever ces barrières ?

Quelle que soit la posture adoptée, l'incertitude doit finir par disparaître de l'information finale, simplifiée. Les intervenants rapportent trois manières d'intégrer l'incertitude dans la décision finale.

a) Si le risque le plus élevé est jugé insupportable, alors la décision est construite en acceptant le risque maximal comme information. C'est l'attitude adoptée pour la gestion des centrales nucléaires face au risque de réchauffement : tout risque d'explosion, même très improbable, est jugé insupportable. L'information de base, comportant une marge d'erreur (incertitude), est donc assimilée aux valeurs correspondant à la limite de risque maximal de la marge d'erreur.

b) Si l'adaptation face au risque le plus élevé est jugée irréalisable, alors un niveau de risque intermédiaire est choisi comme information de référence pour la prise de décision. C'est l'attitude adoptée dans certains exemples de l'adaptation au risque d'élévation du niveau de la mer sur un territoire côtier : les premières mesures d'adaptation sont prises sur la base d'une élévation du niveau de la mer situé dans la moyenne de la fourchette de valeurs issue des projections climatiques, plutôt que sur celle du niveau maximal envisagé.

c) Enfin, dans le cadre d'un processus itératif vers l'adaptation, les décisionnaires reçoivent initialement une information simplifiée, comportant peu ou pas d'incertitude, de manière à permettre d'initier les premières actions. À l'occasion des itérations suivantes, l'information est progressivement complétée, et intègre un niveau croissant d'incertitude, de manière à affiner les actions envisagées. Le niveau de complexité du message fait l'objet d'un dialogue constant entre les détenteurs de l'information complète (les scientifiques) et les utilisateurs (décideurs et acteurs du territoire).

Bien que n'étant pas la plus pratiquée dans les faits, certains participants ont rapporté des exemples de mise en œuvre sur le terrain de l'approche non linéaire (c). À notre avis, elle est la plus convaincante du point de vue de sa faisabilité pratique et de sa capacité à permettre de lever les barrières classiques liées à l'incertitude. L'idée d'un processus itératif vers l'adaptation nous paraît en outre la seule démarche susceptible de conduire à la mise en œuvre effective de stratégies d'adaptation. Nous proposons dans la section 4.2 des modalités à envisager pour entretenir un tel processus multi-acteurs.

Jusqu'ici, nous avons abordé la question de l'incertitude sous un angle méthodologique très théorique. Des obstacles concrets ont toutefois été discutés au cours de ce colloque et demandent à élargir ce schéma théorique :

- difficulté de produire une information à la fois juste et pertinente, graal de la coopération entre scientifiques et acteurs de terrain pour l'adaptation au changement climatique ;

- passer à l'action, quelles que soient, parfois, la qualité et l'ergonomie de l'information communiquée ;
- conjuguer les informations issues de différentes sources, scientifiques et empiriques.

4.1.2. Multiplication des données scientifiques et rôle des services climatiques pour gérer les incertitudes

La question de la pertinence de la prise en compte de l'incertitude dans le processus vers l'adaptation nous a conduits à discuter de la manière de traiter cette incertitude, pour proposer une information simplifiée : quand, comment, pourquoi et par qui doit-elle être tranchée ? Si nous pouvons proposer des réponses théoriques à ces questions, un obstacle majeur a néanmoins été souligné par beaucoup d'intervenants au cours de ce colloque : l'extrême complexité de la tâche ! D'une part, il est difficile pour une catégorie donnée d'acteurs de se conformer aux exigences d'une autre catégorie : pour le scientifique, simplifier la donnée rigoureuse qu'il a produite en une information ergonomique est difficile. Tout comme il est difficile pour l'acteur non-spécialiste d'utiliser correctement les données scientifiques complexes. D'autre part, les données climatiques gagnent rapidement en quantité et en complexité, de sorte que leur traitement requiert un effectif et un niveau d'expertise sans cesse croissants.

Il est important ici de distinguer donnée et information. Les variables climatiques brutes ont souvent peu de sens pour les non climatologues. Elles ne peuvent pas être utilisées en l'état dans la prise de décision. Ce ne sont donc pas directement les données qu'il est pertinent de transmettre. L'information, en revanche, est le résultat d'un traitement de la donnée et de sa traduction en indicateurs d'état ou d'impact. Ceux-ci privilégient la pertinence au regard d'une problématique plus ou moins concrète (élévation du niveau de la mer ou évolution des rendements agricoles, par exemple). Cette information, porteuse de sens, pourra être utilisée dans la prise de décision. Comme la donnée originale, l'information finale n'est pas exempte d'incertitude. Citons ici Daniel Borstin, qui résume cette idée : « nous avons glissé d'un monde riche de sens mais pauvre en données vers un monde riche en données mais pauvre en sens » (cité par Roger Malina lors de la conférence Data Dramatization du Google Cultural Institute, 12 septembre 2014).

Construire une information pertinente à partir d'un ensemble de données scientifiques constitue donc une étape nécessaire du processus vers l'adaptation. L'information climatique est ainsi incorporée dans une analyse de risque, pour une

problématique donnée. Elle est résumée à un (ou plusieurs) indicateur(s) de l'état du climat pouvant être transformé, en le combinant à d'autres informations, en un indicateur de risque portant sur le fonctionnement du système considéré (activité industrielle ou sécurité d'une population, par exemple). Cette opération est désignée par nombre d'intervenants comme dépassant les compétences des seuls scientifiques ou acteurs publics et décideurs : il semble s'agir d'un domaine de compétence spécifique, celui des services climatiques.

4.1.3. L'incertitude cruciale a cessé d'être l'incertitude climatique

Le deuxième obstacle pratique à la réussite de ce processus vers l'adaptation est que, dans les faits, la transmission d'information n'implique pas nécessairement l'action. Ce n'est pas nécessairement parce que l'on *connaît* mieux, que l'on *agit* mieux.

Comme le rappelle Jacqueline McGlade, directrice scientifique du Programme des Nations unies pour l'environnement, l'incertitude ne tient plus seulement aux questions scientifiques, mais aussi et surtout à la volonté des acteurs d'agir ou pas : « les incertitudes ont basculé du champ de la science dans celui de la politique » (propos cités par Arthur Nelsen dans le journal *The Guardian*, 19 novembre 2014). Selon elle, comme pour la plupart des intervenants, l'information qui émane des scénarios (la connaissance des impacts du changement climatique) et les exigences associées sont suffisantes pour lancer à la fois des mesures d'atténuation et d'adaptation. Nous avons déjà atteint certaines limites de la planète, enregistré des conflits liés à la raréfaction des ressources et nous connaissons déjà en grande partie les impacts négatifs du climat sur les écosystèmes, la biodiversité, et le fonctionnement de nos sociétés. Malgré tout, les efforts en termes de lutte contre le changement climatique restent maigres, ce qui démontre qu'un haut niveau de connaissance et de certitudes (c'est le cas sur le thème du changement climatique) ne constitue pas par un gage de prise de décision et d'action.

Dès lors, comme aller vers l'action ? Le premier obstacle que nous avons discuté réside dans la transmission d'une information, non seulement appréhendable par les différents acteurs, mais également pertinente au regard d'une problématique donnée. Cet obstacle pourrait être surpassé, en professionnalisant des services climatiques par exemple. Le second obstacle, celui de la motivation des acteurs à agir, pourrait être dépassé par une approche itérative et multi-acteur (nous discutons plus longuement cette démarche dans la section 4.2).

4.1.4. Incertitude socio-économique

Pour terminer cette discussion sur la pertinence des incertitudes, la question de celles ayant des origines non-climatiques doit être abordée : incertitude politique, évoquée ci-dessus, et incertitude socio-économique. Cette dernière intervient dans la construction des scénarios sur lesquels sont fondés les projections climatiques et dans les scénarios d'adaptation qui sont construits à partir des résultats de ces projections climatiques. Cette dernière idée souligne autant la question du rôle des différents acteurs (évoquée plus haut) que l'importance de l'incertitude socio-économique (placée au même rang que l'incertitude climatique). A long terme, la question du « choix de société » sera certainement décisive ?

Les projections sur le climat futur et ses impacts sont cruciales pour la prise de décision politique dans un contexte de lutte contre le changement climatique. Les scénarios climatiques peuvent aider les acteurs à identifier les facteurs conditionnant leur vulnérabilité au changement climatique, et à identifier les actions d'adaptation susceptibles de répondre le mieux aux évolutions possibles du climat. L'incertitude scientifique n'est toutefois pas la forme d'incertitude la plus conséquente quand il s'agit de se projeter sur le long terme pour imaginer et mettre en place des mesures d'adaptation. Il est en effet au moins aussi délicat d'appréhender le champ des incertitudes socio-économiques, qui pèsent pourtant grandement sur l'existence, la forme et le résultat des stratégies d'adaptation (Van Gameren *et al.*, 2014 ; Moser et Ekstrom, 2010). Le climat n'est pas le seul facteur de changement à prendre en compte lorsque l'on veut traiter de la question de l'adaptation au changement climatique. La plupart des autres processus (globalisation, priorités économiques, préférences culturelles, progrès technologiques, etc.) ne sont pas ou peu prévisibles, alors qu'il s'agit de facteurs agissant sur la vulnérabilité des sociétés (Adger *et al.*, 2009).

4.2. Rôles des différents acteurs

(auteur principal : Amandine Amat, co-auteurs : Amélie Rajaud, Marine Lugen, Yann Chavaillaz, Vivian Dépoues, Margot Hovsepian, Camille Ferron, Adrien Comte, Yann Quilcaille)

Il est apparu durant le colloque et lors de la discussion concernant la pertinence de la diffusion des incertitudes, que d'autres acteurs, des « traducteurs », pourraient participer au processus d'adaptation. Les compétences et motivations des scientifiques (climatologues, sociologues, économistes, etc.) et décideurs locaux (politiques,

entrepreneurs) sont divergentes, ce qui influence leurs positions vis-à-vis du changement climatique (Voinov *et al.*, 2014). L'hypothèse dominante qui a été discutée est que les informations scientifiques qui sont transmises aux décideurs sont détachées des contextes territoriaux. Par là, on implique les processus historiques et institutionnels ainsi que les facteurs socio-économiques, qui forgent les valeurs et les capacités d'adaptation et semblent causer cet écart. Il en résulte que le destinataire de l'information ne se sent pas ou peu concerné par les projections climatiques qui lui sont offertes, car elles sont trop distancées de ses propres réalités. Les informations climatiques transmises aux décideurs seraient, semble-t-il, portées par les motivations uniques des producteurs de données (les experts). Cet aspect du problème est notamment illustré par la diffusion systématique des degrés d'incertitudes qui encadrent les projections climatiques. Or, la diffusion d'incertitudes qui est jugée incontournable pour la rigueur scientifique, peut porter préjudice à la compréhension de ces informations et à leur validité pour les décideurs, leurs considérations vis-à-vis de ces incertitudes allant de intéressante à superflue. Ces décideurs peuvent justifier leur inaction par une méfiance envers ces données délocalisées qui de plus, sont soumises à des incertitudes.

Le changement climatique est *a fortiori* une problématique environnementale globale et complexe qui requiert la participation de diverses disciplines. Les acteurs ayant des intérêts différents les uns par rapport aux autres ont donc des attentes différentes. Le manque de connexion entre les sciences et l'élaboration de politiques publiques ou d'actions en général est largement reconnu. Pour le combler, il nécessite de réinviter une relation entre sciences et politique par le biais de prises de décision concertées (Voinov *et al.*, 2014 ; Latour 1999). Pour ce faire, il est primordial de redéfinir les rôles de chacun dans le processus de transmission des données climatiques et dans l'accompagnement à l'adaptation au changement climatique.

4.2.1. Quelle est la place des scientifiques dans le processus de diffusion des données climatiques et des incertitudes qui les accompagnent ?

Lors de ces deux journées de discussion, les intervenants ainsi que la salle ont largement discuté du rôle des experts dans la publicisation du phénomène du changement climatique, de ses évolutions et des incertitudes qui l'accompagnent. Les débats ont interrogé la place de chaque discipline dans la transmission, à la société civile, d'informations sur les évolutions du climat. Il a été partagé par l'ensemble des experts présents que ces

informations climatiques ont un double intérêt : celui de sensibiliser, mais aussi d'inciter les décideurs et investisseurs locaux à passer à l'action afin de s'adapter au climat actuel et anticiper les risques à venir. Une telle mission d'information et d'accompagnement demande l'engagement d'une pluralité d'experts, pas uniquement climatologues. La tâche est complexe et relève de compétences non seulement scientifiques et techniques, mais aussi socio-politiques et communicationnelles, car les données qui sont élaborées par les climatologues ne peuvent être transmises brutes et sans mise en forme aux décideurs locaux et/ou aux entreprises. L'enjeu est donc de constituer de nouveaux collectifs formés à la transmission et à l'accompagnement de ces informations. Ces collectifs pourraient être composés de scientifiques et d'acteurs de la société civile, capables, en mêlant leurs compétences et connaissances, de s'adresser efficacement à divers publics puis éventuellement d'accompagner des territoires vers l'adaptation au changement climatique. Ces collectifs pourraient apporter des éléments utiles au dépassement des problèmes inhérents aux incertitudes. Or, deux questions principales s'imposent en préalable à la constitution d'un tel collectif : qui, ou plutôt « combien sommes-nous ? » et « comment pouvons-nous travailler ensemble ? » (Latour, 1999).

4.2.2. Qui et combien sommes-nous dans ce collectif ?

Qui sont les scientifiques⁷ autres que les climatologues qui entrent dans le processus de transmission des données climatiques ? Quelles pourraient être leurs places et rôles respectifs ? Comment peuvent-ils s'emparer de la question des incertitudes ? Dans l'intérêt de co-construire l'adaptation au changement climatique, ces mêmes questions se posent également pour d'autres acteurs (bureaux de conseil, journalistes, décideurs locaux, etc.). De plus, bien que nous travaillons ici sur le mode de la délimitation des rôles des différents acteurs, nous

7. Ici nous évoquons seulement des disciplines qui ont été représentées lors du colloque et dont les différents intervenants ont discuté. Mais il est évident que d'autres disciplines et métiers ont intérêt à participer au travail de transmission et d'utilisation des informations climatiques pour l'adaptation au changement climatique. Nous pensons notamment aux géographes, aux sciences de l'ingénieur, aux architectes, aux urbanistes et aux techniciens territoriaux qui disposent d'autres modes d'intellectualisation, de traduction et d'utilisation des données climatiques. Ils possèdent d'autres langages et outils pour travailler sur l'adaptation au changement climatique. Les sciences de l'ingénieur et celles de l'aménagement, par exemple, peuvent jouer des rôles complémentaires dans ce processus, principalement dans l'adaptation spatiale et technique des territoires vulnérables.

pensons que ce collectif ne peut pas fonctionner par distinctions mais par complémentarités et interactions entre les disciplines et domaines d'action. Enfin, en quoi cela nous informe de l'organisation de services climatiques ?

› (i) Quelle place pour les climatologues ?

Les climatologues sont à la source des connaissances sur l'évolution du système climatique et, à ce titre, sont les producteurs de la donnée de base. Ils se focalisent sur la modélisation (simulation numérique) pour comprendre les processus liés au « forçage » du système climatique : c'est-à-dire les réponses du climat à différentes échelles de temps et d'espace. C'est avec la modélisation que les climatologues comprennent et expliquent le climat et testent des hypothèses. Nous avons observé au cours des différentes interventions que les climatologues disposent d'un discours très centré sur la construction de leurs données et sur leur méthode de travail. Ils s'engagent dans un discours de justification et présentent leurs résultats comme une chaîne de preuves. Ils ont à présenter l'évolution du climat en prenant en compte des incertitudes. Ils ont une responsabilité, celle de transmettre des données précises et compréhensibles, malgré l'existence d'incertitudes.

La principale difficulté du climatologue réside alors dans la contrainte d'avoir à traduire les données complexes afin de les transmettre à une communauté pluridisciplinaire, dont les différents experts ne disposent pas des mêmes langages et outillages. C'est une difficulté majeure, en témoignent les réactions des décideurs politiques et des acteurs de terrain vis-à-vis du manque de précision géographique des données climatiques. Les projections globales et régionales ne satisfont pas les acteurs de terrain (décideurs locaux et entreprises, par exemple) qui ne comprennent pas comment s'en servir pour leur besoins qui nécessitent *a priori* de disposer d'informations plus localisées. Dès lors, la demande de traduction qui est formulée par les acteurs locaux revient à en demander un peu plus au scénario de projection. Par exemple, cela revient à traduire et relocaliser les résultats des projections climatiques pour qu'ils offrent des mises en situation plus concrètes et tangibles pour l'interlocuteur (effets sur les activités industrielles, conséquences sur le microclimat local et répercussions sur le tourisme par exemple). Le scénario doit donc non seulement offrir des simulations des modifications du climat, mais aussi permettre aux acteurs de visualiser plus précisément de quelles façons ils pourraient être concernés par ces changements. L'enjeu de ces scénarios affinés est qu'ils interpellent les acteurs sur leurs éventuelles vulnérabilités voire opportunités face au changement

climatique. Ce processus devrait permettre d'une part, une meilleure compréhension par les acteurs locaux à la fois des enjeux climatiques sur leur territoire et de l'existence d'incertitudes et, d'autre part, une formulation plus claire de leurs besoins en matière d'informations climatiques.

Selon nous, ce n'est pas directement aux climatologues de faire ce travail de traduction. Ils ne doivent pas être seuls à porter la responsabilité de la transmission des données. Partant de cela, qui peut les relayer, les accompagner et comment ?

› (ii) *Quelle place pour les économistes ?*

Le rapport du GIEC est structuré en trois parties, portées par trois groupes de travail, le premier sur le climat et son évolution, le second sur les impacts de cette évolution sur les territoires et les formes possibles d'adaptation, et le dernier sur les mesures d'atténuation à mettre en œuvre. Pour l'ensemble de ces travaux, les économistes interviennent à la fois en amont du travail de simulation des climatologues (pour la construction des scénarios socio-économiques conduisant à différents niveaux d'émission de GES), et en aval des résultats obtenus par les climatologues, pour l'analyse économique des effets de ces projections climatiques. En effet, leur travail consiste dans un premier temps à modéliser les activités socio-économiques et leurs impacts en termes d'émission de GES, puis, dans un second temps, à analyser les effets de la mise en place de différentes mesures sur l'économie (par exemple une taxe carbone). Ils dégagent ainsi un champ des possibles en terme d'émissions selon les cibles climatiques et les mesures envisagées. Au-delà de son implication dans les travaux de modélisation, la science économique peut aussi intervenir dans la prise de décision. Certains modèles, comme le « Robust Decision-Making under uncertainty » par exemple, intègrent d'ailleurs les incertitudes climatiques. À ce titre, l'économie joue un rôle important dans l'effort de communication sur les impacts, en traduisant l'information dans un langage économique plus « parlant » pour de nombreux acteurs de terrain. En effectuant ce travail de traduction économique, les économistes offrent aux décideurs et investisseurs locaux un accès à une autre forme de connaissance sur le changement climatique et permettent ainsi de faire le lien entre données climatiques et acteurs en montrant, par exemple, le coût du changement climatique et de l'inaction. Toutefois, si l'économie constitue une variable importante dans l'engagement de décideurs pour l'adaptation, elle n'est bien entendu pas l'unique source de prise de décision. Un risque serait d'ailleurs de cibler des stratégies d'adaptation qui apparaîtraient bénéfiques du point de vue d'un calcul coût/bénéfice, mais qui ne cibleraient pas

les points spécifiques de vulnérabilité du territoire ou du secteur au changement climatique. Cela peut conduire à de la maladaptation et engendrer de nouveaux coûts par la suite. À cet égard, une approche pluridisciplinaire de la vulnérabilité d'un territoire et des modalités d'adaptation s'impose.

› (iii) *Quelle place pour les sciences humaines et sociales ?*

Sur ce point, le sociologue peut avoir un rôle complémentaire des expertises précédentes. Il peut assumer le rôle d'intermédiaire entre les acteurs de terrain (décideurs et acteurs privés) et les experts du climat (climatologues, économistes). Le sociologue dispose d'outils d'investigation, du type de l'enquête par entretien, qui lui permettent d'échanger avec les acteurs de terrain sur leurs positions et dispositions face au changement climatique. Ces échanges semi-directifs peuvent faire émerger chez les acteurs des attentes vis-à-vis des scientifiques et des données scientifiques sur le changement climatique et ses impacts, mais également une prise de conscience de certaines vulnérabilités. Le sociologue peut alors jouer le rôle de révélateur puis, éventuellement, de relais entre experts d'un côté et acteurs de terrain-utilisateurs de l'autre. Car sur de nombreux territoires où les effets du changement climatique ne sont pas directement ressentis par les acteurs, la demande en informations climatiques et en accompagnement pour s'y adapter est très faible pour ne pas dire inexistante. Il s'ensuit que lorsque les acteurs prennent conscience de certaines vulnérabilités ou au contraire d'opportunités potentielles liées aux effets du changement climatique, ils ne perçoivent pas toujours clairement de quelles façons ils peuvent réagir et s'adapter à ces conséquences. Le caractère inédit de ce phénomène global induit en effet des moyens d'action et de réaction qui ne sont pas forcément connus ni expérimentés par les décideurs politiques locaux et les acteurs privés. Une fois les vulnérabilités potentielles et avérées identifiées par un territoire, la difficulté réside dans les choix et les projets à engager pour les réduire et nombre d'acteurs locaux se sentent démunis face à de tels enjeux.

› (iv) *Quelle place pour les experts en communication ?*

Une dernière catégorie d'experts intermédiaires entre la donnée climatique brute et la sphère de la décision et de l'action est celle des spécialistes en communication. Ils occupent eux aussi une place importante, quoique plus difficile à délimiter que celle des scientifiques, au sein de ce collectif pour l'adaptation. En effet, les acteurs publics (collectivités territoriales, par exemple), privés (les entreprises) ou encore des organisations non

gouvernementales sont autant d'utilisateurs aux profils, préoccupations et, par conséquent, demandes potentielles en services climatiques très variés. Dès lors, en parallèle de la construction scientifique de scénarios d'adaptation rigoureux, il est nécessaire d'entamer une démarche de consultation multi-acteurs (scientifiques inclus) pour traduire les scénarios en des termes favorables à l'appropriation des données et, à terme, au passage à l'action. Comme l'ont illustrées certaines communications de ce colloque à partir d'exemples territoriaux précis, un forum pluridisciplinaire et/ou multi-acteurs permet l'émergence d'un panel de scénarios socio-économiques et de stratégies possibles pour l'adaptation. Un tel forum est d'ailleurs nécessaire pour que des informations circulent auprès de nombreux acteurs locaux et les scénarios ainsi co-construits gagnent en pertinence au regard des réalités de terrain. C'est un lieu d'articulation des compétences, et chacune des disciplines scientifiques mentionnées plus haut y ont leur rôle à jouer. Dans cette logique fédératrice, les experts en communication ont également une place. Issus de différents métiers (journalisme, design de la communication, etc.), ils peuvent mettre en forme l'information scientifique et la cibler en fonction de différents publics. Car, pour finir, les diverses traductions (économiques, sociologiques, commerciales, etc.) qui conduisent à la nécessaire relocalisation des données climatiques, ne doivent pas avoir pour effet de simplifier et de dévaloriser le travail des climatologues. Les projections climatologiques sont des informations complexes (dans le sens de leur densité) qui reflètent le comportement même du système climatique et qui ne doivent pas perdre en qualité et en scientificité suite à des simplifications successives et réductionnistes.-

4.3. Perceptions des aléas du changement climatique et modes de communication appropriés

(coordinateur : Yann Quilcaille ; co-auteurs : Amélie Rajaud, Yann Chavaillaz, Marine Lugen, Leslie Tourneville, Sabine Giguët)

De ce colloque ressort un point essentiel : pour susciter l'adaptation au changement climatique, il est nécessaire de concevoir où sont les risques, les vulnérabilités, les enjeux et les opportunités. Plus précisément, il s'agit de percevoir, plus que de voir. Ces perceptions jouent un rôle prépondérant sur la communication. Durant le colloque, les perceptions par différents acteurs du changement climatique et de l'adaptation ont d'ailleurs été plusieurs fois abordées. Cette sous-section traite de deux aspects de la perception :

- les perceptions du changement climatique sous ces différentes facettes et les incertitudes y étant associées ;
- les compréhensions du concept d'adaptation et leurs implications.

4.3.1. Les différentes perceptions de la tangibilité du changement climatique au travers de ses impacts immédiats ou graduels

Il a été mentionné à plusieurs reprises par les intervenants et les participants que le changement climatique était davantage perçu au travers d'événements extrêmes qu'au travers de modifications plus lentes mais pourtant tout aussi problématiques. Il est vrai que les événements extrêmes ont des conséquences immédiates et lourdes sur la société, et tendent alors à donner des images concrètes d'un futur possible.

D'un autre côté, le changement climatique, en tant que changement graduel, est évoqué à une échelle vaste (la planète) et longue (le siècle), ce qui tend à en faire relativiser ses impacts, ou à les repousser en d'autres temps et d'autres lieux. Pour l'étudier et l'analyser, des simulations sont utilisées mais elles s'avèrent difficilement compréhensibles car fréquemment très abstraites. Pourtant, les risques liés au changement climatique graduel sont bien présents. C'est déjà le cas par exemple avec l'avancée des déserts (Chen *et al.*, 2011 ; Loarie *et al.*, 2009). Le changement graduel, scientifiquement avéré, est donc encore peu, voire pas perceptible : il est difficile de convaincre de sa réalité, si ce n'est au travers de ses impacts existants.

Alors que la perception du changement climatique est déjà à ce point vacillante, les incertitudes scientifiques issues des simulations le rendent encore moins réel dans les esprits. Le fait que les projections climatiques se présentent accompagnées d'une marge d'incertitude légitime un doute qui paralyse l'action. A ceci s'ajoute l'incertitude sur l'imputation des événements extrêmes au changement climatique : tangibles, ceux-ci ont cependant un pouvoir persuasif qui contribue à dissiper le doute sur la réalité du changement climatique. En outre, l'événement extrême pourrait être aisément utilisé pour persuader le grand public de la réalité du changement climatique (Spence *et al.*, 2011).

La perception des certitudes et des incertitudes semble donc être au cœur du travail des services climatiques ou des métiers de médiation évoqués précédemment. Il paraît possible d'utiliser les perceptions des impacts existants, liés à des événements extrêmes ou des changements graduels, pour communiquer sur le sujet et favoriser l'adaptation.

4.3.2. Importance de la forme du message : impacts socio-économiques locaux du changement climatique

Une hausse de 2 °C de la température moyenne de surface de la Terre ou une augmentation de un mètre du niveau moyen des océans sont des faits relativement peu explicites pour de nombreux citoyens. Les impacts purement climatiques, comme une température moyenne de surface de la Terre, ne « parlent » pas au grand public et aux acteurs, car personne n'expérimente cette augmentation de température qui intervient, par définition, sur des échelles planétaire et annuelle. De même que pour le changement graduel ou les événements extrêmes, ce qui touche à notre mode de vie quotidien peut être perçu plus facilement. Néanmoins, lorsque le message court « + 2 °C » est exprimé sous la forme développée d'une évolution dans le temps et dans l'espace des températures, celui-ci risque d'être noyé dans les détails, sans même évoquer les incertitudes associées à ce chiffre.

Or la communication autour du changement climatique est souvent abordée sous le seul angle des sciences du climat, avec un accent mis sur les températures. Ceci a comme effet pervers de faire perdre de vue le reste du problème. Celui-ci est donc perçu comme étant une modification du climat seul, sans grandes conséquences pour la société. Les impacts socio-économiques du changement climatique – tels qu'une réduction de l'offre de denrées agricoles d'un certain pourcentage ou une surface de terres devenant inhabitable – tendent à être plus explicites, justement car ils touchent de plus près au quotidien des acteurs. La société civile semble plus réceptive à un discours sur les impacts socio-économiques, bien qu'ils soient davantage méconnus. Ces éléments sont pourtant liés au changement climatique et sont particulièrement pertinents lorsqu'il s'agit d'adaptation.

Au final, le manque de connaissances ou les perceptions faussées sur le changement climatique se mêlent aux incertitudes qui pèsent sur le sujet, formant une zone de flou autour de celui-ci. Le concrétiser, lui donner une substance qui parle aux non-initiés, permettrait de donner moins d'ampleur à ce qui transparaît comme incertitudes. Pour faire évoluer les perceptions du changement climatique, il semble donc qu'il faudrait délivrer un message davantage centré sur les déterminants socio-économiques du changement climatique, ainsi que sur ses impacts territoriaux, eux aussi socio-économiques. De manière générale, la dimension socio-économique du changement climatique est à adapter en fonction de l'objectif poursuivi et ne doit pas être mise de côté.

4.3.3. Les indicateurs du changement climatique comme témoins de sa perception et fondements de l'adaptation

La perception du changement climatique dépend aussi de la question posée. Un point, régulièrement soulevé durant ce colloque, porte sur la construction d'indicateurs permettant de signaler et d'anticiper les risques associés au changement climatique. Ces indicateurs ont pour vocation d'aider la prise de décision. Toutefois, s'ils sont mal construits, des erreurs de jugement et par conséquent d'action peuvent se produire. Ceci sans compter que des décisions importantes peuvent se prendre sans système formel d'indicateurs à l'appui.

La définition d'indicateurs du changement climatique revêt une importance particulière pour la qualité du diagnostic. Or, les indicateurs peuvent être définis de différentes manières. Par exemple, une vague de froid peut être caractérisée par une température moyenne journalière inférieure à un seuil sur une certaine durée ou par une température minimale journalière inférieure à un seuil sur un temps donné. Une question posée par un industriel ou un décideur peut alors devenir floue en raison d'indicateurs mal définis. Cette confusion conduit à une incertitude dans le diagnostic qui s'avère souvent plus grande que l'incertitude purement scientifique, comme montré par les travaux d'un membre du groupe (Aglé Jézéquel).

Ainsi, l'élaboration de la demande ou de la question posée à un service climatique devrait être une œuvre commune, réalisée ensemble par les différents acteurs. Par exemple, ce serait le cas avec la construction d'indicateurs visant à élaborer des politiques d'adaptation. Un travail sur les perceptions du changement climatique par les acteurs demandeurs de ces indicateurs semble être nécessaire au préalable.

4.3.4. Perceptions de la gravité du changement climatique au regard des mesures d'adaptation

D'une part, la perception du changement climatique dans une région à un moment donné dépend intuitivement de l'intensité des changements et de la vulnérabilité de la région (Brody *et al.*, 2008), tous deux dépendant du temps. Ainsi, la perception du changement climatique par les populations dépendrait de la région et de l'époque. D'autre part, le changement climatique est perçu comme d'autant plus grave que son intensité évolue rapidement. Ainsi, on s'attend à ce que l'accélération ou le ralentissement du changement climatique influe les questions d'adaptation. Une accélération semble se dégager des modèles climatiques pour les scénarios les plus pessimistes. Un membre du

groupe (Yann Chavaillaz) montre d'ailleurs par ses travaux que la perception du changement climatique par les différents acteurs devrait augmenter encore plus rapidement avec cette accélération.

Une accélération du changement climatique expose cependant les acteurs au risque de ne réaliser que trop tard l'ampleur de la situation, que ce soit face aux événements extrêmes ou aux changements graduels plus rapides. En d'autres termes, le changement climatique peut être perçu comme un risque réel seulement quand son évolution s'accélère, et du fait de l'inertie de ce changement et de la société, les conséquences en sont alors décuplées. L'effet paradoxalement bénéfique de l'accélération du changement climatique est qu'en intensifiant les manifestations tangibles de celui-ci, elle en diminue la méconnaissance ou la négligence dans les esprits et contraint à en tenir compte. Bien entendu, la gravité de ses effets s'en trouve accrue et l'urgence de la situation parallèlement aggravée. La communication doit donc permettre aux acteurs de prendre conscience que la temporalité de l'adaptation ne peut pas attendre qu'ils perçoivent l'ampleur du changement climatique : il est nécessaire d'anticiper.

En ce qui concerne l'adaptation à un changement graduel dans une région, les habitants tendent à s'adapter d'eux-mêmes, consciemment ou non, dans le meilleur des cas. Dans le pire des cas, certains meurent, d'autres migrent. C'est ce qui apparaît dans les actualités des dernières années pour certaines productions agricoles, des pêcheries, voire des zones d'habitation. Toutefois, quand une région devient trop vulnérable, cette situation évolue en une crise et ses tentatives de résolution, si elles ont lieu, peuvent s'avérer coûteuse pour la société.

En cas d'adaptation aux événements particulièrement violents, telle la tempête *Xynthia* de 2010, le changement climatique est souvent pointé du doigt, les débats sur l'atténuation et l'adaptation connaissent un regain d'énergie et quelques mesures de prévention sont mises en place rapidement. Ces dernières tendent à faire régner un sentiment de sécurité, contribuant à chasser des esprits les inquiétudes relatives au changement climatique. Or, les communautés déjà touchées sont susceptibles d'être touchées à nouveau, avec plus de gravité que précédemment. Les mesures prises dans l'urgence devraient également prendre en compte les effets projetés du changement climatique. Les résultats de travaux précédents (Seneviratne *et al.*, 2012) indiquent qu'une accélération de celui-ci implique probablement un impact sur la fréquence et l'intensité de ces événements.

Pour toutes ces raisons, une communication adaptée revêt une importance cruciale pour éviter les conséquences néfastes du changement

climatique. L'enjeu est de favoriser dès à présent l'adaptation au changement graduel et la gestion adéquate des risques météorologiques actuels, en lien avec les évolutions futures du climat. En effet, la gravité des menaces liées au changement climatique ne prendra toute son ampleur que lorsqu'elles ne pourront plus être évitées. Il est *a priori* possible d'améliorer le sentiment de sécurité des populations en même temps que la conscience de l'existence du changement climatique. Sur ce point, la notion d'incertitude sur l'ampleur du changement climatique semble être un message mineur face à l'importance de faire comprendre l'ampleur en elle-même, ce qui rejoint les conclusions de la partie 4.1.

4.3.5. Perceptions par les acteurs des conditions de construction d'un débat sur les risques, les opportunités et les limites de l'adaptation

La perception des risques associés au changement climatique, ainsi que la réponse à y apporter en termes d'adaptation, est inhérente à la culture des individus et des communautés locales, et peut alors constituer des limites à l'adaptation (Adger *et al.*, 2009). Par ailleurs, à l'échelle d'une communauté locale, les enjeux les plus pressants sont souvent pensés à court ou moyen terme. En revanche, comme indiqué dans la partie 4.3.1, les effets du changement climatique sont souvent perçus comme étant éloignés dans l'espace et dans le temps, et l'incertitude associée aux projections de ces effets en diminue encore le poids face aux enjeux sociaux et économiques considérés plus immédiats. Le changement climatique semble alors négligeable comparé à ces enjeux. L'exemple des stations de sports d'hiver illustre cette opposition. Aujourd'hui, en contexte de réchauffement, le recours à l'enneigement artificiel permet de ne pas raccourcir la saison d'ouverture des stations de moyenne montagne. Cette stratégie répond aux enjeux socio-économiques locaux et immédiats mais, seule, elle est inadaptée face à la poursuite d'un réchauffement qui conduit inéluctablement vers un « avenir sans neige ». Cette option demeure toutefois pertinente au regard des enjeux – y compris socio-économiques – de long terme si elle s'inscrit dans un plan plus général de reconversion de ces stations touristiques, par exemple en intégrant des mesures de développement des activités estivales. Négliger ces impacts de long terme exposerait les communautés locales à des risques écologiques et socio-économiques plus importants encore. La prise de conscience de ces enjeux de long terme par les populations locales, et leur mise en balance avec les enjeux de court terme, est cruciale.

Il peut apparaître souhaitable, et réalisable *a priori*, de procéder à l'évaluation à l'échelle régionale des menaces et opportunités liées au changement climatique, et de répertorier les modes d'adaptation de la communauté. Comme décrit dans la partie 4.2, un échange multi-acteurs organisé par les acteurs publics de l'échelle territoriale considérée, potentiellement prospectif, réunissant des scientifiques des sciences naturelles et sociales ainsi que des acteurs de la société civile, devrait alors être mené en tenant compte de la compréhension du changement climatique, des valeurs et des intérêts de chacun. Cet échange pourrait être construit à différentes échelles territoriales – de l'échelle locale à l'échelle interétatique – pour permettre une expression optimale des avantages comparatifs locaux. Un processus itératif d'adaptation avec « un niveau de complexité et d'incertitude progressivement plus élevé » avait été proposé en partie 4.1. Il apparaît ici que cette progression dans le niveau de détail de l'information est contrainte par les enjeux des acteurs en présence, mais aussi par leurs connaissances sur le sujet et surtout leurs perceptions. Ces échanges devraient alors être menés après une étude des perceptions des risques dus au changement climatique et de la compréhension du concept d'adaptation pour chacun des acteurs, afin de corriger les manques de connaissances, écarter les perceptions induisant en erreur et ajuster les réponses des services climatiques ou des médiateurs évoqués durant le colloque.

5. CONCLUSION

Ce travail interdisciplinaire, fruit d'une collaboration originale entre seize « acteurs de demain », permet de dégager un certain nombre de conclusions.

La question de savoir comment traiter l'incertitude, d'origines climatique, socio-économique et politique, dans le processus d'adaptation au climat futur méritait bien d'être posée. Elle n'en reste pas moins une question sans réponse simple, qui se formule différemment selon la problématique et les acteurs concernés. Devant le défi de traiter une information scientifique de plus en plus complexe, et comportant toujours des incertitudes, la fourniture de services climatiques en développement semble aujourd'hui une réponse appropriée et nécessaire. Ces services doivent alors apporter une information appréhendable par les acteurs, ce qui signifie qu'elle doit être ciblée et pertinente. Toutefois, l'attention portée au traitement de l'information climatique ne doit pas faire oublier le rôle crucial des paramètres socio-économiques. L'incertitude socio-économique pèse en effet au

moins autant que l'incertitude climatique sur l'élaboration des stratégies d'adaptation et sur le passage à l'action.

Pour communiquer au mieux sur les (in)certitudes liées au changement climatique, un processus itératif a été proposé dans cette discussion. Les différents cas de ce processus ont été abordés, en cherchant à déterminer dans quelles limites les informations pouvaient être transmises ou non. Des approches non linéaires de communication sur les (in)certitudes semblent intéressantes pour soutenir l'adaptation. Cependant, ces méthodes se heurtent souvent à la rigidité des politiques publiques.

Aussi, en parallèle, la formation d'un collectif interdisciplinaire a été proposée. Composé de scientifiques et d'acteurs publics et privés, mêlant compétences et connaissances, ce collectif permettrait d'augmenter l'efficacité de la communication et éventuellement d'accompagner les territoires vers l'adaptation. Les rôles des climatologues, économistes et sociologues ont été évoqués, ainsi que ceux d'autres acteurs tels que les experts en communication. L'intérêt d'ajuster la communication au public et d'adapter les travaux scientifiques – climatologie, économie, sociologie, etc. – aux caractéristiques locales s'est révélé être de la plus haute importance.

En effet, souligné à plusieurs reprises lors du colloque et des discussions qui s'en sont suivies, la communication – et son adaptation au public visé – est apparue comme étant un point essentiel de l'action à mener. Des perceptions faussées ou des manques de connaissances nuisent à la mise en œuvre de mesures d'adaptation au changement climatique. Étudier les perceptions des acteurs pour ajuster son discours est donc nécessaire, que ce soit pour corriger des manques de connaissances ou écarter des perceptions trompeuses, mais aussi pour que chaque acteur soit en mesure de faire entendre son point de vue et de comprendre celui des autres.

Aujourd'hui, le temps d'analyser sans agir est dépassé. Nous avons suffisamment de certitudes pour identifier et mettre en œuvre des stratégies d'adaptation au changement climatique. Il est certain que si rien n'est fait, nous allons faire face à des situations de crise et à des catastrophes. Nous sommes tous vulnérables au changement climatique. Certes pas tous au même niveau et pas tous avec les mêmes moyens, mais le monde de demain risque d'en être bouleversé, et pour réduire l'ampleur de ce drame, il est nécessaire de s'adapter. A cet effet, des collectifs intégrant de nouveaux métiers relevant des sciences et de la communication doivent être créés pour permettre à chacun de connaître ce à quoi il s'expose et comment s'en prémunir. ■

BIBLIOGRAPHIE

- Adger, W. N., Dessai, S., Goulden, M., Hulme, M., Lorenzoni, I., Nelson, D.R., Naess, L.O., Wolf, J., and Wreford, A. (2009). Are there social limits to adaptation to climate change? *Climatic Change*, vol. 93, p.335-354.
- Blanchard, A. & Vanderlinden, J. P. (2012). Interdisciplinarité et outils réflexifs : vers une approche globale des trames vertes urbaines. Conclusion. Vertigo-la revue électronique en sciences de l'environnement (Hors-série 12).
- Brody, S.D., Zahran, S., Vedlitz, A., and Grover, H. (2008). Examining the relationship between physical vulnerability and public perceptions of global climate change in the United States. *Environment and behavior*, vol. 40, p.72-95.
- Chen, I.-C., Hill, J. K., Ohlemüller, R., Roy, D. B. and Thomas, C. D. (2011). Rapid range shifts of species associated with high levels of climate change. *Science*, vol. 333, no. 6045, p.1024-1026.
- Dessai, S., Hulme, M., Lempert, R. and Pielke, Jr. R. (2009). *Climate Prediction : a limit to adaptation ?* in *Adapting to Climate Change: Thresholds, Values, Governance*, ed. Neil Adger *et al.*, Cambridge University Press.
- IPCC, 2012 : *Summary for Policymakers. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 3-21.
- Jacqueline McGlane, cited by Arthur Nelsen, "CO₂ emissions must be zero by 2070 to prevent climate disaster, UN says", *The Guardian*, 19 novembre 2014.
- Latour, B., (1999). *Politiques de la nature. Comment faire entrer les sciences en démocratie ?* La Découverte, Paris.
- Loarie, S.R., Duffy, P.B., Hamilton, H., Asner G.P., Field, C.B. and Ackerly, D.D. (2009). The velocity of climate change. *Nature*, vol. 462, p.1052-1055.
- Lorenz, S., Dessai, S, Paavola, J. and Forster, P. M. (2013). *The communication of physical science uncertainty in European National Adaptation Strategies in Climatic Change*.
- Moser, S.C. and Ekstrom, J.A. (2010). A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. *PNAS*, vol. 107, no. 51.
- Spence, A., Poortinga W., Butler, C. and N.F. Pigeon (2011). Perceptions of climate change and willingness to save energy related to fit the experience. *Nature Climate Change*, Vol. 1, p 46-49.
- Tremblay, M. A. (1968). Initiation à la recherche dans les sciences humaines. "Les classiques des sciences sociales" (http://classiques.uqac.ca/contemporains/tremblay_marc_adelard/initiation_recherche_sc_hum/MAT_initiation_recherche_sc_hum.pdf)
- Van Gameren, V., Weikmans, R. and Zaccai, E. (2014). *L'adaptation au changement climatique*, Paris, Repères, La Découverte.
- Voinov, A., Seppelt, R., Reis, S., Nabel, E.M.S. J. and Shokravi, S. (2014). Values in socio-environmental modelling: Persuasion for action or excuse for inaction. *Environmental Modelling and Software*, n° 53, pp. 207-212.

ANNEXE

PROGRAMME DU COLLOQUE

COLLOQUE-DÉBAT

(In)certitudes et adaptation au climat futur

17-18 novembre 2014,
CNRS Meudon, France

Ce colloque-débat a vocation à améliorer à la fois la **compréhension des incertitudes sur le climat futur**, et leur **prise en compte** dans les décisions publiques et privées en faveur de l'adaptation au changement climatique d'un territoire, d'une population ou d'un secteur. Il ne vise pas à entrer dans le détail de la caractérisation des incertitudes climatiques, mais plutôt à dresser un bilan des barrières que pose cette incertitude en matière d'identification de stratégies concrètes d'adaptation.

Ce colloque-débat cherche ainsi à **confronter les sphères de la science et de l'action**, et donc à positionner les échanges au carrefour de différents modes d'appréhension des réalités et de différentes cultures professionnelles. L'objectif d'adaptation, désormais impératif, impose en effet de dépasser les problèmes posés par l'existence d'incertitudes climatiques, pour se poser les « bonnes » questions (par exemple, « quelles options ont le plus de chances de se révéler efficaces à l'avenir ? »). De nouvelles bases de dialogue sont en ce sens nécessaires. Dans cette perspective, ce colloque-débat s'appuiera à la fois sur **des communications de chercheurs** proposant un état actualisé des connaissances scientifiques au moment où s'achève le processus d'officialisation finale des trois volets du 5^e rapport du GIEC et sur **des interventions d'acteurs** qui témoigneront de leur propre expérience de terrain.

Ce colloque-débat est concrètement organisé autour de quelques **conférences d'ouverture**, puis de **3 séances plénières** et de **3 tables rondes**, dans l'optique de laisser une place importante aux temps de débat. Ouvert à un **large public** (acteurs publics et privés, chercheurs, étudiants de divers horizons disciplinaires), il ambitionne de faire émerger des recommandations à l'intention des différents acteurs concernés par l'enjeu de l'adaptation, par exemple au travers de la question des « services climatiques ».

Un point fort de ce colloque sera la participation active d'un groupe d'étudiants en fin de cycle et ayant une expertise représentative des différentes questions abordées. Ce groupe portera la voix des

« **acteurs de demain** » et sera impliqué à trois niveaux : réalisation de la synthèse des débats ; participation aux débats en apportant un regard critique et « neuf » sur les propositions et questions abordées dans les différentes sessions ; formulation des recommandations pour la mise en place d'actions concrètes permettant de mieux traiter l'incertitude dans les questions d'adaptation au climat futur.

CONFÉRENCES D'OUVERTURE.

État de l'art et synthèse de travaux antérieurs

Les conférences d'ouverture permettront de cadrer le sujet et les attentes des journées par rapport : aux différentes sources d'incertitudes qui entrent en ligne de compte dans les questions d'adaptation au changement climatique ; à la façon dont elles sont appréhendées dans les travaux des groupes 1 et 2 du GIEC et aux difficultés concrètes qu'elles posent pour l'aide à la décision.

Les **séances plénières** s'articuleront autour de **3 messages clés** : « derrière les incertitudes, il y a beaucoup de certitudes », « différents acteurs, différentes conceptions de l'incertitude », et « l'existence d'incertitudes doit inciter à se poser les bonnes questions ».

Séance plénière n° 1.

Appréhender les résultats des projections climatiques : certitudes et incertitudes

Depuis plusieurs années, les sciences du climat et des impacts ont développé une argumentation sur la caractérisation des incertitudes des projections climatiques, et elles s'attachent à diffuser des bonnes pratiques pour utiliser les résultats des modèles dans différents types d'applications (par exemple les études d'impact). L'incertitude est d'ailleurs elle-même devenue un sujet très médiatisé, avec pour effet pervers de focaliser l'attention sur ces incertitudes. Ainsi, en dehors de la sphère des spécialistes du climat, l'existence d'incertitudes a eu tendance à être utilisée comme un argument justifiant l'inaction face au changement climatique en cours : « comment peut-on se préparer maintenant à quelque chose que l'on ne peut pas appréhender précisément ? ». Pourtant, faut-il nécessairement attendre que la science du climat réduise la fourchette des incertitudes ? En réalité, ne dispose-t-on pas déjà de suffisamment d'informations pour identifier les meilleures options ? Ainsi, si l'on acceptait de reconnaître que l'incertitude n'est en fait que l'arbre qui cache la forêt (de certitudes), quelles implications cela aurait-il pour la décision et l'action ?

Cette séance plénière n°1 clarifiera les bases de la connaissance scientifique sur les (in)certitudes climatiques et les impacts futurs.

- Les sources d'incertitude climatique : que nous disent-elles des certitudes que l'on peut avoir ? Et pourra-t-on réduire drastiquement l'incertitude dans le futur ? Si oui, à quelle échéance ? Si non, pourquoi ?

- Ce que l'on sait des impacts futurs, et ce que l'on ne sait pas (bilan du volet 2 du 5^e rapport du GIEC) ;

- Communiquer sur l'incertitude climatique aux sphères des non-spécialistes : comment le fait-on aujourd'hui ? L'exercice n'induit-il pas nécessairement le risque d'oublier de parler des « certitudes » ?

Séance plénière n° 2.

Différents acteurs, différentes conceptions de l'incertitude

Si l'incertitude climatique occupe une place particulière dans les réflexions sur la vulnérabilité et l'adaptation au changement climatique, il est primordial de comprendre qu'elle va se combiner à d'autres formes d'incertitudes pour expliquer pourquoi prendre des décisions sur l'avenir n'est jamais aisé, ni les résultats garantis. L'incertitude sur le futur caractérise également les tendances socioéconomiques, les modes de consommation, les rapports sociaux, la capacité d'adaptation des espèces végétales et animales, etc. Dès lors, les démarches prospectives, qui sont au cœur de l'enjeu d'adaptation au changement climatique, demandent nécessairement de combiner des incertitudes de natures variées et, dans ce contexte, d'oser faire des choix et prendre des décisions « visionnaires ».

Cette séance plénière n°2 visera donc à clarifier ce que les uns et les autres entendent par « (in)certitude », pour identifier les contradictions et/ou les points de convergence entre ces différents regards. Elle fera d'abord le point sur la démarche prospective et sur son positionnement théorique par rapport aux (in)certitudes, puis s'articulera autour de plusieurs points de vue d'acteurs confrontés à la gestion en contexte d'incertitude[1]. Elle entend éclairer diverses questions majeures : (in)certitude, qui parle de quoi ? Et quels degrés de précision sur les données climatiques futures sont nécessaires à la prise de décision, et donc à partir de quels seuils davantage de précisions n'implique pas forcément de meilleures prises de décision ?

- L'intégration des certitudes et des incertitudes dans les démarches prospectives

- L'incertitude selon différents acteurs (public national, public local, privé local, etc.) : quelles formes d'incertitudes prendre en compte, et comment les combiner ?

Séance plénière n° 3.

L'existence d'incertitudes doit inciter à se poser les bonnes questions

Comme rappelé en introduction, les incertitudes ne peuvent pas être considérées comme une excuse pour « attendre et ne rien faire ». Il est en réalité nécessaire que la société change de regard et considère l'existence d'incertitudes climatiques non uniquement comme une barrière à la décision et à l'action, mais également comme une incitation à se poser les bonnes questions : quel est le poids de l'information climatique dans le processus de réduction de la vulnérabilité au changement climatique ? Quels sont les déterminants de cette vulnérabilité, et quelle est la part des facteurs naturels et anthropiques ? Ici également, quels degrés de précision des données sur le climat futur jouent un rôle de facteur limitant, et quels seuils contraignants envisager ?

Cette séance plénière n°3 s'articulera autour de plusieurs axes, parmi lesquels :

- De quelle précision en termes de données climatiques a-t-on réellement besoin ?

- Au-delà du fait que « fournir des données climatiques aux utilisateurs est un point de départ », les services climatiques ont aussi vocation à jouer le rôle de traducteur entre les spécialistes et les utilisateurs permettant de mieux qualifier le changement climatique en termes d'impacts physiques sur les milieux et/ou les activités. Dès lors, une question-clé s'impose à tout service climatique : quels sont les besoins en termes de caractérisation des incertitudes (niveau de précision, par exemple), quels sont les principaux freins à l'intégration de ces incertitudes, et comment communiquer à leur sujet pour justement dépasser ces barrières ?

- Si faire du « sans regret » ou du « robuste » constitue un point de départ concret pour la prise de décision et l'action, cela suffira-t-il ?

Trois tables rondes permettront de mettre en débat les éléments soulevés dans les séances plénières, en posant la question de l'intégration des incertitudes dans les choix politiques et opérationnels en matière de réduction des risques actuels et d'adaptation au changement climatique. Chacune des tables rondes se concentrera sur un secteur particulier et réunira scientifiques et acteurs dans le but de **confronter des points de vue et des expériences**, et de lancer un **débat** avec la salle.

Table ronde n° 1.
Industrie (eau, énergie...)

Parce qu'il est à l'origine de services essentiels au fonctionnement des sociétés (extraction de matières premières, production d'énergie, systèmes de transport, production alimentaire, services, etc.), le monde de l'industrie est particulièrement concerné par l'enjeu de l'adaptation. Les grandes entreprises le savent pertinemment, et nombreuses sont celles qui développent elles-mêmes, au sein de leurs unités « recherche et développement », des outils de prospective sur les conditions climatiques futures et leurs implications pour leurs activités respectives (contraintes à la production, évolution des marchés, etc.). Concrètement, quels problèmes l'incertitude pose-t-elle à ces grands groupes, et quels moyens déploient-ils pour répondre à ces problèmes ? Quels enseignements tirer des nombreuses études qui restent encore trop confidentielles ? Comment ces entreprises traitent-elles les certitudes climatiques ? Par ailleurs, qu'en est-il des plus petites entreprises, qui ne peuvent développer ces outils prospectifs en interne et sont donc davantage dépendantes d'acteurs exogènes (laboratoires scientifiques, bureaux d'étude, etc.) ?

Table ronde n° 2.
Politiques publiques

Comment l'incertitude est-elle comprise, discutée et intégrée aux politiques publiques de réduction de la vulnérabilité au changement climatique de secteurs, de groupes de population, de territoires ? Et ce tant à l'échelle nationale (dans le Plan National d'Adaptation au Changement Climatique, par exemple) que locale (dans un Plan climat énergie territorial, par exemple) ? Les échelles spatiales et les pas de temps significatifs des (in)certitudes sur le plan scientifique le sont-ils du point de vue de l'élaboration et de la mise en œuvre de politiques publiques compatibles avec le changement climatique ? Et ces incertitudes climatiques constituent-elles nécessairement un élément central (et donc un facteur de blocage) pour ces politiques publiques, ou bien n'entrent-elles finalement en ligne de compte que de façon mineure par rapport, par exemple, aux dimensions économiques et sociales du changement de trajectoire ? Enfin, ici aussi, quel(s) rôle(s) les certitudes climatiques jouent-elles ?

Table ronde n°3.
Les services climatiques, au-delà de la seule fourniture de données climatiques

Sur le terrain, il apparaît clairement que fournir des données climatiques n'est qu'un pan du « service » climatique, de l'aide que la science peut apporter à la décision et à l'action. Un réel bénéfice est aussi attendu d'une conception permettant d'intégrer, par exemple, l'analyse des impacts potentiels des modifications du climat, là encore sur des secteurs, des groupes de population, ou des territoires. Mais cela suppose, en parallèle d'efforts de la part du monde scientifique, de développer les capacités des acteurs à utiliser ces « services », ce qui renvoie à des questions de responsabilités, de compétences, de formation, etc. On touche ici la nécessité de clarifier collectivement quels sont les besoins profonds de la société civile en matière de connaissances sur les conséquences potentielles du changement climatique (et donc d'acceptation des incertitudes), et sous quelles formes ces informations seront les plus à même de pouvoir être utilisées.

PROGRAMME

* *Intervenants non encore contactés ou confirmés*

Lundi 17 novembre

9h00-9h30	Enregistrement
10h00-10h20	Ouverture officielle : Objectif du colloque et méthode de travail – P. Braconnot et A. Magnan
10h20-12h30	Conférences d'ouverture <ul style="list-style-type: none">- Bilan rapide des conclusions des Groupes de Travail 1 et 2 du GIEC sur la question des incertitudes (ampleur et modalités de traitement) – H. le Treut- Les différentes incertitudes : bilan de la journée du GIS-Climat sur les incertitudes – S. Joussaume- L'incertitude climatique est-elle un problème de politique publique ? – S. Mondon- Panorama des « services climatiques » en France – R. Vautard- (In)certitudes et adaptation au changement climatique – A. Magnan<ul style="list-style-type: none">☛ Animation par P. Braconnot
12h30-14h00	<i>Déjeuner</i>
14h00-16h00	Séance plénière 1 – Incertitudes et certitudes <ul style="list-style-type: none">- Variabilité et changement climatiques : pourquoi les acteurs s'approprient mal les conclusions du GIEC – P. Braconnot- (In)certitudes sur les impacts du changement climatique sur les risques côtiers – V. Duvat- Des cas concrets : l'expérience SECIF – C. Deandreis- Les études d'impact face aux différentes incertitudes des projections climatiques. Des progrès sont-ils possibles? – J. Boé<ul style="list-style-type: none">☛ Animation par H. Kieken
16h00-16h30	<i>Pause café</i>
16h30-18h00	Table ronde 1 – Les industries face aux (in)certitudes C. Derognat, H. Kieken, M. Kolacinski <ul style="list-style-type: none">☛ Animation par A.-C. Bras
18h00-19h00	<i>Cocktail</i>

Mardi 18 novembre

9h00-10h40	<p>Séance plénière 2 – Les différentes conceptions de l'incertitude</p> <ul style="list-style-type: none"> - Certitudes et incertitudes dans les démarches prospectives – S. Treyer - L'incertitude selon l'acteur public national : quelles formes d'incertitude prendre en compte, et comment les combiner ? – S. Mondon - L'incertitude selon l'acteur public local (formes d'incertitude à prendre en compte, modes de combinaison) – T. Pelte <p style="text-align: center;">☉ Animation par A. Magnan</p>
10h40-11h00	Pause café
11h00-12h30	<p>Table ronde 2 – Politiques publiques</p> <p>T. Hubert, C. Philipps, A. Roche, G. Dubois</p> <p style="text-align: center;">☉ Animation par A.-C. Bras</p>
12h30-14h00	Déjeuner
14h00-15h30	<p>Séance plénière 3 – Lever les barrières de l'incertitude</p> <ul style="list-style-type: none"> - La ville face à l'incertitude – D. Tavernier - Prendre en compte l'incertitude dans les projets de développement et d'adaptation au changement climatique – N. Rossin - Le secteur de la pêche face à l'incertitude climatique – H. Carré - Le secteur de l'agriculture face à l'incertitude climatique – F. Levraux <p style="text-align: center;">☉ Animation par P. Braconnot</p>
15h30-16h00	Pause
16h00-17h30	<p>Table ronde 3 – Intégrer et communiquer l'incertitude dans les services climatiques</p> <p>F. Rudolf, H. Loukos, S. Planton, G. Dubois, J.-P. Vandenlinden*</p> <p style="text-align: center;">☉ Animation par A.-C. Bras</p>
17h30-17h45	Synthèse et clôture

Organisateurs :

IPSL (Pascale Braconnot)

IDDRI (Alexandre Magnan)

GIS Climat-Environnement-Société

Le site de la conférence :

www.gisclimat.fr/manifestation-scientifique/colloque-incertitudes-et-adaptation-au-climat-futur

(In)certitudes et adaptation au climat futur : le regard des « acteurs de demain »

Article écrit par un groupe d'étudiants (universités de Paris, Montpellier, Strasbourg, Bruxelles, Brest, La Rochelle) : Yann Quilcaille, Yann Chavaille, Sabine Giguet, Aglaé Jézéquel, Amélie Rajaud, Camille Ferron, Amandine Amat, Vivian Dépoues, Adèle Revelard, Marine Lugen, Leslie Tourneville, Adrien Comte, Xavier Mouroux, Marien Ranche, Margot Hovsepian, Roxane Sansilvestri

IDDRI



SciencesPo.

PUBLICATIONS DE L'IDDRI

- Magnan, A., Ribera, T., Treyer, S. (2015). National adaptation is also a global concern, Iddri, *Working Papers* n°04/15.
- Magnan, A., Ribera, T., Treyer, S., Spencer, T. (2014). What adaptation chapter in the New Climate Agreement, Iddri, *Policy Briefs* n°09/14.
- Magnan, A., Duvat, V., Pouget, F. (2013). L'archipel de Kiribati entre développement non durable et changement climatique : quelles recherches pour quelle adaptation ? Iddri, *Policy Briefs* n°09/13.
- Gemenne, F., Wanneau, K. (2013). Climate and security: evidence, emerging risks and a new research agenda, Iddri, *Working Papers* n°12/13.
- Magnan, A. (2013). Éviter la maladaptation au changement climatique, Iddri, *Policy Briefs* n°08/13.

Publications disponibles en ligne sur : www.iddri.org

Institut de recherche sur les politiques, l'Institut du développement durable et des relations internationales (Iddri) a pour objectif d'élaborer et de partager des clés d'analyse et de compréhension des enjeux stratégiques du développement durable dans une perspective mondiale. Basé à Paris, l'Iddri accompagne les différents acteurs dans la réflexion sur la gouvernance mondiale des grands problèmes collectifs que sont la lutte contre le changement climatique, la protection de la biodiversité, la sécurité alimentaire ou l'urbanisation et participe aux travaux sur la redéfinition des trajectoires de développement. L'Iddri porte une attention toute particulière au développement de réseaux et de partenariats avec les pays émergents et les pays les plus exposés aux risques, de façon à mieux appréhender et partager différentes visions du développement durable et de la gouvernance. Afin de mener à bien son action, l'Iddri s'insère dans un réseau de partenaires issus des secteurs privé, académique, associatif ou public, en France, en Europe et dans le monde.

Institut indépendant, l'Iddri mobilise les moyens et les compétences pour diffuser les idées et les recherches scientifiques les plus pertinentes en amont des négociations et des décisions.

Ses travaux sont structurés transversalement autour de sept programmes thématiques : Gouvernance, Climat, Biodiversité, Océans et zones côtières, Fabrique urbaine, Agriculture et Nouvelle Prospérité.

Dans le cadre de son partenariat avec Sciences Po, de nombreux chercheurs de l'Iddri participent aux enseignements ainsi qu'au développement de programmes de recherche.

Fondation de recherche reconnue d'utilité publique, l'Iddri met à la disposition de tous, via son site Internet, ses différentes analyses et propositions.

L'Iddri organise sa politique de publications autour de collections propres, d'ouvrages en partenariat (comme *Regards sur la Terre*, fruit d'une collaboration avec l'Agence française de développement et d'un partenariat éditorial avec Armand Colin), et de publications dans des revues scientifiques. L'Iddri publie également les études menées dans le cadre du Club d'ingénierie prospective énergie et environnement [CLIP] : *Les Cahiers du CLIP*. Les collections de l'Iddri sont constituées de textes courts (*Issue Briefs* et *Policy Briefs*), de documents de travail (*Working Papers*) et d'études ou rapports (*Studies*).

Pour en savoir plus sur les activités et les publications de l'Iddri, visitez www.iddri.org

www.iddri.org