



HAL
open science

Cycle du carbone global: Variabilité, Rétroactions et Couplages aux interfaces

Roland Sférian

► **To cite this version:**

Roland Sférian. Cycle du carbone global: Variabilité, Rétroactions et Couplages aux interfaces. Océan, Atmosphère. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2019. tel-03420520

HAL Id: tel-03420520

<https://hal.science/tel-03420520v1>

Submitted on 9 Nov 2021

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.

Mémoire présenté pour l'obtention d'une Habilitation à Diriger des Recherches

UNIVERSITÉ PAUL SABATIER TOULOUSE

Cycle du carbone global Variabilité, Rétroactions et Couplages aux interfaces

présenté par :
Roland SÉFÉRIAN

Soutenu le 15 Novembre 2019 devant le jury composé de :

Dr. Pascale	Braconnot	LSCE, Gif-sur-Yvette, France	Rapporteur
Pr. Pierre A. G.	Regnier	Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgique	Rapporteur
Pr. Nicolas	Gruber	ETH, Zürich, Suisse	Rapporteur
Dr. Céline	Guivarch	CIREN, Nogent-sur-Marne, France	Examineur
Pr. Catherine	Jeandel	LEGOS, Toulouse, France	Examineur
Dr. Laurent	Bopp	LSCE, Gif-sur-Yvette, France	Parrain

Table des matières

1	Contexte Scientifique	1
2	Etude du cycle du carbone global à l'aide de la modélisation	7
2.1	Introduction	8
2.2	Développement d'un modèle du système Terre au CNRM	10
2.3	Amélioration de la représentation du cycle du carbone global	11
2.3.1	Feux naturels	12
2.3.2	Albédo de surface de l'océan	14
2.3.3	Couplage continents-océan : première ébauche du continuum aquatique . .	16
2.4	Évaluation des modèles du système Terre	17
2.4.1	Analyse multi-modèle	17
2.4.2	Analyse de Traçabilité	19
3	Cycle du carbone à l'interface avec le climat	23
3.1	Introduction	24
3.2	Variabilité décennale des flux de carbone océanique	26
3.3	Analyses de tendances récentes	29
3.3.1	Détection & Attribution de l'évolution récente des flux de carbone océaniques	29
3.3.2	Détection & attribution de l'évolution récente de l'indice foliaire de l'hémisphère Nord	31
3.4	Rôle du cycle du carbone dans les projections futures	31
3.4.1	Rétroaction climat-cycle du carbone et non-linéarité	33
3.4.2	Rétroaction climat-cycle du carbone et variabilité interne	34
4	Cycle du carbone à l'interface avec les impacts	37
4.1	Introduction	38
4.2	Étude des facteurs de stress des écosystèmes marins	40
4.2.1	Projections des facteurs de stress des écosystèmes marins	40
4.2.2	Mise en évidence de mécanismes compensatoires entre les facteurs de stress	41
4.3	Temps d'émergence des facteurs de stress	41
4.4	Incertitudes dans le projections des facteurs de stress des écosystèmes marins . .	44
4.4.1	Bref rappel — pourquoi contraindre les projections futures de la productivité primaire ?	47
4.4.2	Contrainte observationnelle sur l'évolution future de la productivité primaire	48

5	Cycle du carbone à l'interface avec la mitigation	51
5.1	Introduction	52
5.2	La contrainte géophysique ultime : le budget carbone compatible	55
5.3	Limite géophysique au déploiement de certaines techniques de mitigation	58
5.3.1	Une brève introduction aux contraintes géophysiques	58
5.3.2	Étude de la limitation en eau sur le déploiement des techniques de <i>biomass energy carbon capture and storage</i>	59
5.4	La modification du rayonnement solaire est-elle une forme de mitigation ?	61
5.4.1	Éléments de contexte	61
5.4.2	Impacts de la modification du rayonnement solaire sur les budgets carbone	62
6	Perspectives de recherche	65
6.1	Introduction	66
6.2	Étude du cycle du carbone par la modélisation : plus de processus, plus de couplages	66
6.3	Modélisation du système Terre : de l'évaluation à la vérification	69
6.4	Vers un cycle du carbone opérationnel	70
6.5	Modélisation du système Terre : vers la prise en compte des rétroactions activités humaines-climat	71
7	Curriculum Vitae Détaillé	77
7.1	Parcours Professionnel	78
7.2	Parcours scolaire	78
7.3	Enseignements	78
7.4	Encadrements	79
7.5	Administration de la recherche	79
7.6	Publications	79
7.7	Conférences	86
8	Sélection de 5 Publications	89
8.1	Séférian, R. , Bopp, L., Gehlen, M., Swingedouw, D., Mignot, J., Guilyardi, E. and Servonnat, J. : Multiyear predictability of tropical marine productivity, Proceedings of the National Academy of Sciences, 111(32), 11646–11651, 2014a.	90
8.2	Séférian, R. , Gehlen, M., Bopp, L., Resplandy, L., Orr, J. C., Marti, O., Dunne, J. P., Christian, J. R., Doney, S. C., Ilyina, T., Lindsay, K., Halloran, P., Heinze, C., Segschneider, J., and Tjiputra, J. : Inconsistent strategies to spin up models in CMIP5 : implications for ocean biogeochemical model performance assessment, Geosci. Model Dev., 9, 1827-1851, doi :10.5194/gmd-9-1827-2016, 2016b.	92
8.3	Séférian, R., Delire, C., Decharme, B., Voldoire, A., Salas y Melia, D., Chevallier, M., Saint-Martin, D., Aumont, O., Calvet, J.-C., Carrer, D., Douville, H., Franchistéguy, L., Joetzjer, E., and Sénési, S. : Development and evaluation of CNRM Earth system model – CNRM-ESM1, Geosci. Model Dev., 9, 1423-1453, doi :10.5194/gmd-9-1423-2016, 2016a.	94
8.4	Berthet, S., Séférian, R., Bricaud, C., Chevallier, M., Voldoire, A. and Ethé, C. : Evaluation of an online grid-coarsening algorithm in a global eddy-admitting ocean-biogeochemical model. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 11. https://doi.org/10.1029/2019MS001644 , 2019.	96
8.5	Plazzotta, M., Séférian, R. , Douville, H., Kravitz, B., Tjiputra, J. : Land surface cooling induced by sulfate geoengineering constrained by major volcanic eruptions. Geophysical Research Letters, 45, 5663–5671. https://doi.org/10.1029/2018GL077583 , 2018.	98

Contexte Scientifique

Rapport après rapport, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) n'a eu de cesse de démontrer qu'en raison de nos activités l'humanité a modifié son environnement et le climat de la Terre. Le dernier rapport du GIEC publié en octobre 2018 fait état d'un réchauffement global de 1°C en 2017 par rapport à la période 1850-1900. Ainsi, à part peut-être le maximum thermique du Paléocène-Éocène ayant eu lieu il y a 56 millions d'années, la Terre n'a pas connu de changement climatique aussi ample et vélocité que depuis l'ère industrielle. Sur des échelles de temps centennales, l'humanité et ses activités se sont hissées comme un facteur de forçage du système climatique à part entière, comme le sont les paramètres astronomiques mais sur des périodes bien plus longues.

Le marqueur le plus emblématique de ce changement global est sans doute la teneur atmosphérique de dioxyde de carbone (CO_2) dont le seuil symbolique de 400 ppm (partie par million) a été franchi en moyenne annuelle en 2015. Cette augmentation de près de 40% de la teneur de l'atmosphère en CO_2 depuis l'ère industrielle a induit un forçage radiatif d'environ 2 W m^{-2} sur le système climatique. Ce forçage domine aujourd'hui la contribution des autres gaz à effet de serre tels que le méthane ou le protoxyde d'azote (Figure 1.1a).

Depuis l'ère industrielle, l'accroissement de la teneur de l'atmosphère en CO_2 est en grande partie pilotée par les émissions de CO_2 anthropiques, c'est-à-dire celles issues des activités humaines dues à l'utilisation d'énergies fossiles telles que le charbon, le gaz naturel et le pétrole, la fabrication de ciment (Figure 1.1b). Dans une moindre mesure, les changements d'usage des terres et l'expansion de l'agriculture au détriment des écosystèmes naturels sont responsables d'environ 10% des émissions de CO_2 anthropiques (Figure 1.2). Les autres composantes expliquant cette tendance de la teneur de l'atmosphère en CO_2 sont les réservoirs naturels de carbone que sont au premier ordre la biosphère terrestre et l'océan. En effet, seulement une partie de ces émissions de CO_2 anthropique s'accumule dans l'atmosphère tandis que le reste est absorbé par la biosphère terrestre et l'océan (Figure 1.2). En ordre de grandeur, ces deux réservoirs naturels de carbone ont absorbé environ 30% et 23% des émissions anthropiques en moyenne sur 2008-2017 (Le Quéré et al., 2018), limitant de ce fait l'accumulation du CO_2 dans l'atmosphère et donc le changement climatique.

Cette description ne représente toutefois qu'une vision statique du cycle du carbone actuel. En effet de nombreuses fluctuations existent à la fois entre ces différentes composantes et dans chacune d'entre elles. La Figure 1.1 montre qu'il existe plusieurs périodes durant lesquelles les émissions de CO_2 liées aux activités humaines ont diminué (Peters et al., 2011). Ces «

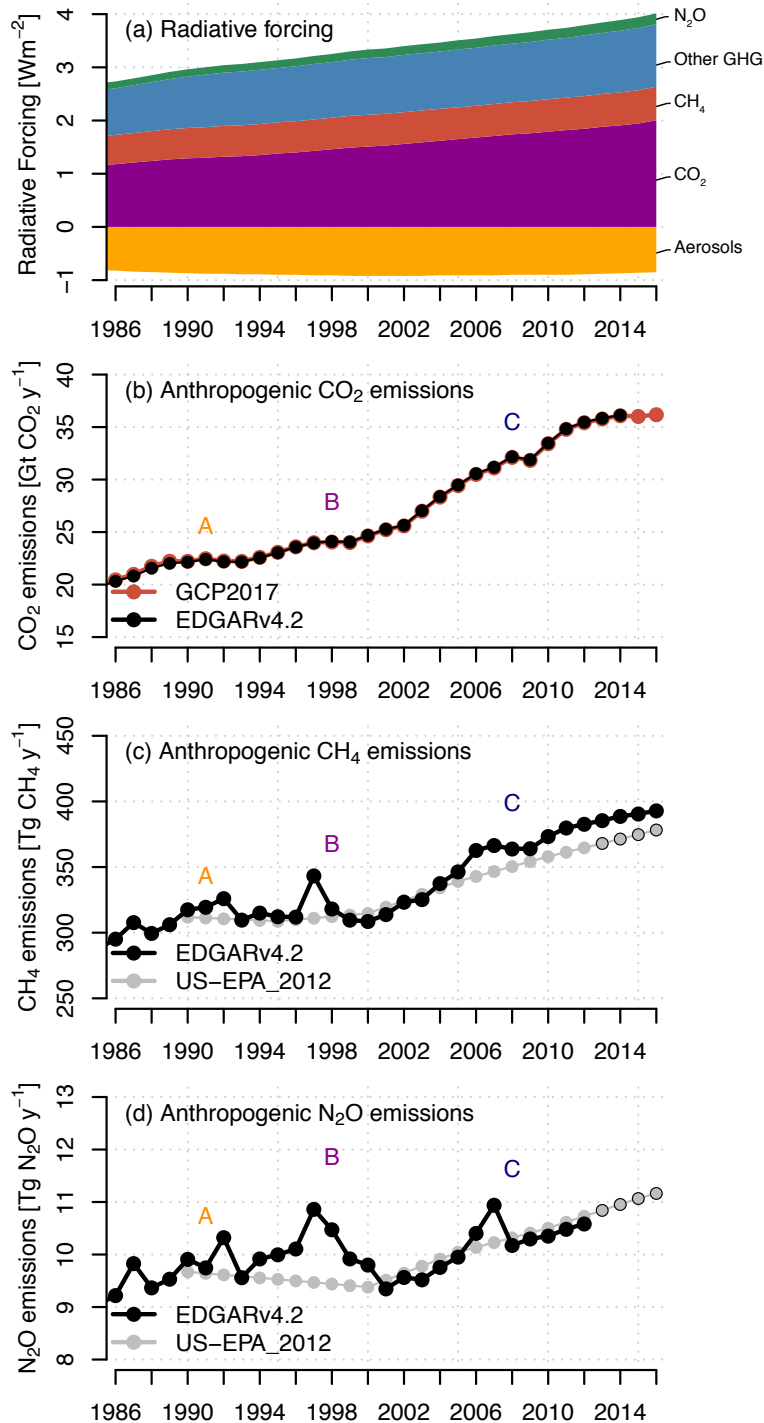


FIGURE 1.1 – Évolution du forçage radiatif des gaz à effet de serre et aérosols (a) et des émissions anthropiques de CO_2 (b), méthane (c), protoxyde d'azote (d) de 1986 à 2017. Le forçage radiatif est estimé à partir de formulation de Etminan et al. (2016) et des concentrations de gaz à effet de serre de Dlugokencky and Tans (2016) et de la base de donnée ECLIPSE pour les aérosols. Les émissions anthropiques de CO_2 sont issues des base de données du Global Carbon Project (Le Quéré et al., 2018) et EDGAR (Joint Research Centre, 2011). Les émissions anthropiques de méthane et protoxyde d'azote sont estimées à partir de base de données EDGAR et US Environmental Protection Agency (Epa and Change Division, 1990). Les crises économiques mises en évidence par les lettres A, B et C correspondent respectivement à l'effondrement de l'URSS, la crise asiatique et la crise financière de 2008.

The rise in atmospheric CO₂ causes climate change

The global carbon cycle 2008-2017

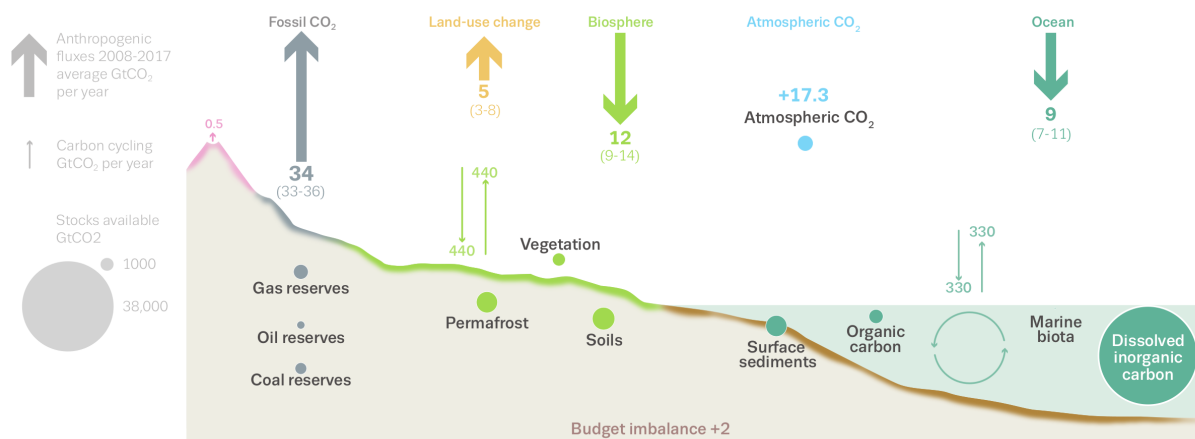


FIGURE 1.2 – Représentation schématique du cycle du carbone global proposé par le Global Carbon Project (Le Quéré et al., 2018). Les flux de CO₂ sont exprimés en GtC y⁻¹ et correspondent aux flux moyen estimé sur la période 2008-2017. Les stocks de carbone exprimés en GtC sont issus de Ciais et al. (2013).

décrochages » ont été concomitants avec les crises économiques globales qui ont provoqué un ralentissement de la croissance et donc une utilisation moindre d'énergie fossile telle que le charbon, le pétrole ou le gaz.

En raison des relations que le cycle du carbone entretient avec le climat, les puits naturels¹ de CO₂ de l'océan et de la végétation fluctuent également au gré des grands modes de variabilité climatique (Ciais et al., 2013). Aux échelles de temps interannuelles, le phénomène climatique El Niño exerce un contrôle important sur les puits de carbone de la végétation et de l'océan (Bastos et al., 2018; Malhi et al., 2018; Chatterjee et al., 2017; Liu et al., 2017). L'augmentation de la température et le changement de précipitations associé à El Niño peuvent réduire la capacité de la végétation à absorber du CO₂ (Bastos et al., 2018; Liu et al., 2017). L'impact d'El Niño sur l'océan se traduit principalement par une diminution du dégazage de CO₂ dans le Pacifique équatorial dont l'effet expliquerait des variations d'1/3 de l'accumulation de CO₂ dans l'atmosphère (Feely et al., 1999; Chatterjee et al., 2017).

Les progrès récents dans l'utilisation de méthodes statistiques (réseau de neurones ou assimilation) ont permis de mettre en évidence l'existence de variations du puits de carbone océanique aux échelles de temps décennales (Landschutzer et al., 2015; Rödenbeck et al., 2015; DeVries et al., 2017). Même si les causes et les mécanismes de ces fluctuations restent encore mal compris (Gruber et al., 2019), les analyses récentes mélangeant résultats de modèles et observations suggèrent que ces fluctuations du puits de carbone océanique pourraient expliquer jusqu'à près de 40% des changements du taux de croissance du CO₂ dans l'atmosphère entre les années 1990 et 2000 (DeVries et al., 2019).

Les choix sociétaux d'aujourd'hui en termes de consommation d'énergie fossile, et donc d'émissions de gaz à effet de serre seront déterminants pour l'évolution du climat aux échelles de temps multi-décennales à centennales. Les études basées sur les résultats de modèles dits du «système Terre» montrent un impact du changement climatique sur un grand nombre d'écosystèmes

1. Réservoir qui absorbe du carbone atmosphérique (CO₂).

naturels. Cela se traduit par des modifications importantes du cycle du carbone global comme la réduction voire l'inversion du puits de carbone de la végétation terrestre (Friedlingstein et al., 2006, 2014; Friedlingstein, 2015) ou une réduction de la production primaire du phytoplancton dans l'océan (Bopp et al., 2013a; Laufkotter et al., 2015; Kwiatkowski et al., 2017). Ces modifications conduisent à une accumulation plus importante de CO₂ dans l'atmosphère et donc une amplification du réchauffement global de 5 à 10% en 2100 pour le scénario futur "pessimiste" qui fait l'hypothèse d'une consommation importante d'énergie fossile induisant d'importantes émissions anthropiques de CO₂ (Friedlingstein et al., 2014). Des travaux récents suggèrent que le CO₂ et donc le cycle du carbone est à l'interface de nombreuses disciplines lorsqu'il est question d'explorer les scénarios de mitigation (Rogelj et al., 2016b; Millar et al., 2017) ou des scénarios de géo-ingénierie (Jones et al., 2016b; Seferian et al., 2018; Plazzotta et al., 2019). Par conséquent, le cycle du carbone incarne un vecteur important entre la physique du climat, les impacts du changement climatique et l'étude des solutions au changement climatique.

Mes travaux de recherche depuis ma thèse de doctorat soutenue en 2013 ont porté principalement sur l'étude du cycle du carbone et ses interactions avec le climat et la sphère anthropique aux échelles de temps décennales à multi-décennales. Bien que la plupart de mes travaux soient liés les uns aux autres, ils restent toutefois assez différents par leur objet d'étude (climat, cycle du carbone océanique, cycle du carbone terrestre, écosystèmes), les méthodes d'analyses et leurs échelles de temps. J'ai donc choisi de présenter mes recherches et mes principaux résultats en distinguant trois grandes questions :

1. **Cycle du carbone et Climat** : Quelles sont les relations que le cycle du carbone entretient avec le climat ? Quels sont les différents couplages ou rétroactions qu'elles engendrent ?
2. **Cycle du carbone et Vulnérabilité des écosystèmes** : Dans quelle mesure notre connaissance de l'impact du changement climatique sur le cycle du carbone global nous informe-t-elle sur les impacts du changement climatique sur les écosystèmes ?
3. **Cycle du carbone et Mitigation** : Quelles contraintes géophysiques le cycle du carbone global exerce-t-il sur les solutions pour lutter contre le changement climatique (i.e., atténuation et géo-ingénierie) ?

L'approche adoptée pour mener mes travaux de recherche est la modélisation globale de grande échelle à la fois spatiale et temporelle. Elle s'appuie en particulier sur l'utilisation de modèles numériques du système Terre, comme les modèles CNRM-ESM1 et CNRM-ESM2-1 que j'ai développés pour le CNRM/Météo-France depuis ma thèse en collaboration avec de nombreuses personnes du groupe climat du CNRM. Même si mes travaux sont largement issus de simulation d'ESM, j'ai également eu l'opportunité de travailler à partir de simulations de composantes isolées : qu'il s'agisse de simulations forcées par des observations atmosphériques du modèle de circulation générale océanique NEMO ou du modèle de surface continentale SURFEX.

Ce document synthétise donc mes recherches sur le climat et cycle du carbone global, incluant le travail réalisé en continuité de ma thèse sur la biogéochimie marine et le cycle du carbone océanique, ainsi que mon ouverture sur le cycle du carbone terrestre et global depuis ma prise de poste au Centre National de Recherches Météorologiques de Météo-France. Le document est séparé en cinq parties. La première partie présente les outils de modélisation que j'ai développés et utilisés pour étudier le cycle du carbone global. Dans une deuxième partie, je détaillerai de manière plus approfondie mes travaux à l'interface entre le cycle du carbone et le climat. Une attention particulière sera donnée à l'analyse des tendances récentes et de la variabilité décennale. Dans la troisième partie, je présenterai mes travaux qui se situent à l'interface entre le cycle du carbone, le climat et l'étude des impacts du changement climatique

sur les écosystèmes marins. La quatrième partie présente le rôle du cycle du carbone dans la mitigation et l'adaptation face aux changements climatiques et ses ramifications avec l'économie de l'environnement. Enfin, dans une cinquième partie, je présenterai les différentes pistes que j'envisage de suivre dans le futur.

Etude du cycle du carbone global à l'aide de la modélisation

Sommaire

2.1	Introduction	8
2.2	Développement d'un modèle du système Terre au CNRM	10
2.3	Amélioration de la représentation du cycle du carbone global	11
2.3.1	Feux naturels	12
2.3.2	Albédo de surface de l'océan	14
2.3.3	Couplage continents-océan : première ébauche du continuum aquatique	16
2.4	Évaluation des modèles du système Terre	17
2.4.1	Analyse multi-modèle	17
2.4.2	Analyse de Traçabilité	19

2.1 Introduction

Le système climatique est historiquement associé aux enveloppes fluides (océan, atmosphère) et à leur interactions physiques.

En voulant répondre aux questions relatives au système Terre, les modèles climatiques se sont progressivement complexifiés (Dahan, 2010). Ainsi, comme le montre la Figure 2.1, les modèles climatiques actuels dits "système Terre" (ESMs) sont des modèles couplés océan-atmosphère dans lesquels existe une représentation plus ou moins complexe des cycles biogéochimiques, essentiellement celui du carbone.

La littérature scientifique considère que les ESMs sont à l'état-de-l'art (Flato et al., 2014), même si leur complexité croissante demande aux groupes de modélisation de faire des compromis en terme de résolution. Les ESMs, tout comme pour les modèles couplés océan-atmosphère (AOGCM), résolvent les équations primitives de la dynamique des fluides et du transfert radiatif (sous certaines hypothèses et approximations) à une résolution donnée. Ils ont la capacité de calculer de manière pronostique l'évolution de la pression partielle de CO₂ atmosphérique en fonction des flux de carbone simulés par les composantes continentale et océanique du cycle du carbone global. Ces modèles intègrent également de nouvelles interactions liées à la biosphère ou aux écosystèmes marins. Sur les continents, la présence de végétaux sur les surface continentales modifie les propriétés réfléchives du sol (De Noblet-Ducoudré et al., 2012), de même que les flux de chaleur sensible et chaleur latente (Zeng et al., 2017). Dans l'océan, la présence de plancton entraîne une capture de chaleur au sein de la colonne d'eau car ce dernier modifie les propriétés optiques de l'eau en absorbant une partie du rayonnement solaire pénétrant dans l'océan. La chaleur capturée crée des instabilités thermiques qui favorisent le mélange vertical des masses d'eau (Lengaigne et al., 2007, 2009). Le fait que les ESMs tiennent compte de ces nouvelles interactions permet, au même titre que l'accroissement de la résolution des AOGCMs, d'améliorer le réalisme des modèles de climat.

L'incorporation de simulations d'ESMs dans les exercices d'intercomparaison de modèles (CMIP, Taylor et al., 2012) a représenté une évolution notable dans la diversité des modèles utilisés dans les études multi-modèles mais également par la quantité de données fournies par les groupes de modélisation à la communauté internationale à l'issue de ces exercices.

Cette recherche de "réalisme" peut être toutefois critiquée dans la mesure où l'inclusion de composantes du système Terre dont les lois d'évolution sont issues de relations empiriques (et donc moins maîtrisées que des lois physiques) tend à accroître les incertitudes des projections futures (Friedlingstein et al., 2014). Néanmoins, il est bon de rappeler que la plupart des ESMs tendent aujourd'hui à inclure une complexité nécessaire pour représenter les évolutions de l'environnement observées aux cours des dernières années. Le cas le plus flagrant est sans doute les changements de couverts végétaux qui montrent une tendance au verdissement sur l'hémisphère Nord sur les 30 dernières années (Mao et al., 2016), ayant des conséquences sur les flux de chaleur latente et donc sur le climat (Zeng et al., 2017). Nos connaissances sur l'évolution de l'environnement suggèrent donc que l'utilisation de climatologies de champs géophysiques du système Terre dans les AOGCMs tels que les couverts végétaux serait à proscrire.

Une grande partie de mon travail passé et actuel a reposé sur le développement et l'utilisation de modèles du système Terre. Ce travail s'est concrétisé par la finalisation de CNRM-ESM2-1 qui est le modèle du système Terre de seconde génération du CNRM. Dans ce chapitre, je présenterai l'historique des développements des modèles du système Terre que j'ai réalisés ou pilotés depuis ma prise de poste au CNRM. Je présenterai ensuite la partie de mes travaux

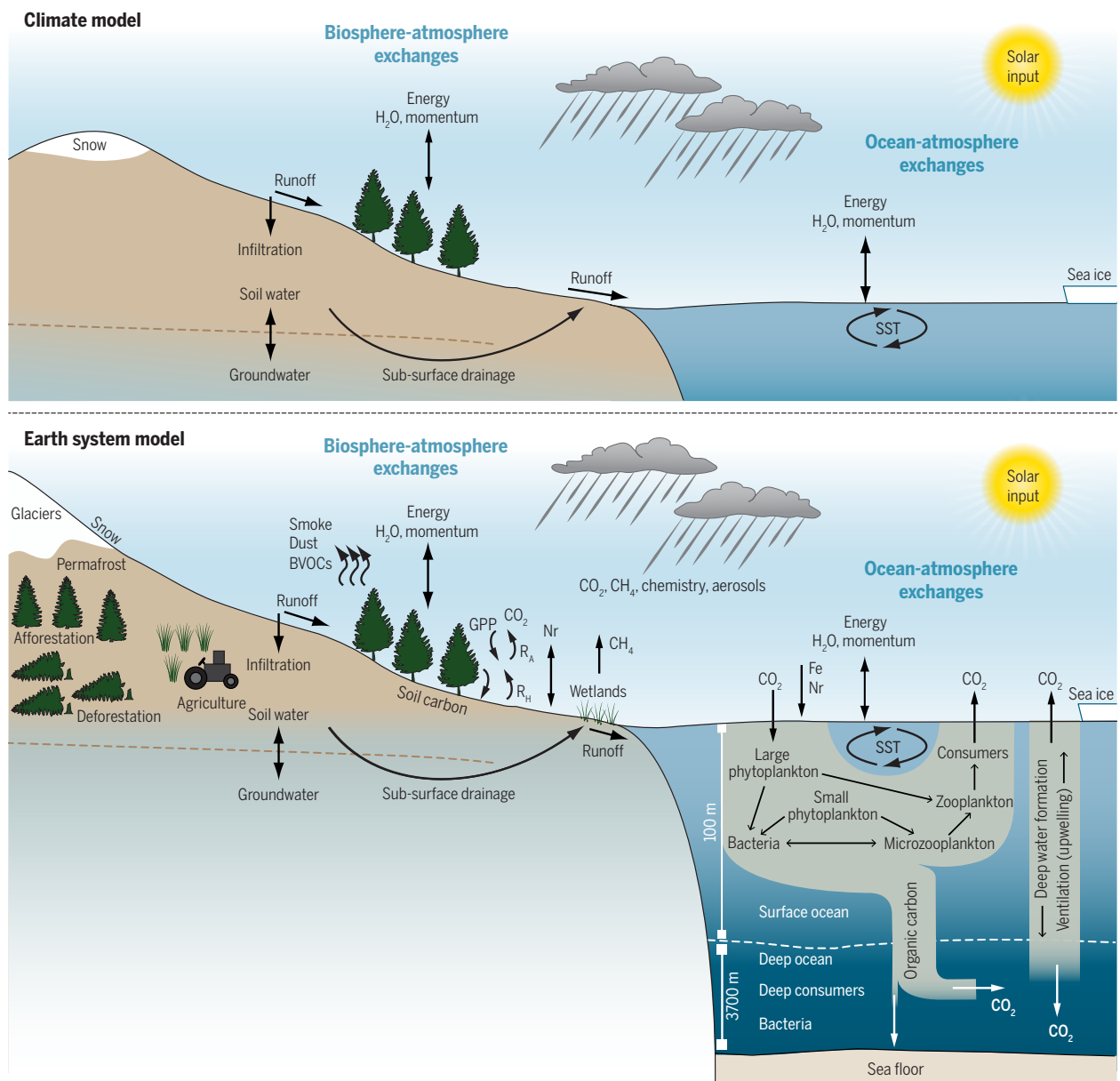


FIGURE 2.1 – Représentation schématique des processus climatiques représentés dans un modèle de climat (panneau du haut) et dans un modèle du système Terre (panneau du bas). Ce schéma est issu de l'article de synthèse de (Bonan and Doney, 2018).

consacrée à l'évaluation des modèles du système Terre.

Depuis ma thèse de doctorat et ma prise de poste au CNRM, j'ai développé le premier modèle du système Terre du CNRM (CNRM-ESM1) à partir de CNRM-CM5 : l'AOGCM de 5ème génération développé au CNRM par le groupe de modélisation du climat pour la 5ème phase de CMIP (CMIP5). Depuis la construction de ce premier ESM, j'ai piloté le développement de CNRM-ESM2-1 qui est le modèle du système Terre de seconde génération du CNRM.

2.2 Développement d'un modèle du système Terre au CNRM

Un travail conséquent de ma thèse de doctorat a été de développer un prototype de modèle système Terre pour le CNRM incluant une représentation du cycle du carbone global. Ce travail a été poursuivi et consolidé depuis ma prise de poste au CNRM. Grâce aux collaborations au sein du GMGEC, j'ai construit une version stable du modèle système Terre du CNRM, dénommé CNRM-ESM1 (Séférian et al., 2016a). Ce modèle s'appuie sur le modèle climatique CNRM-CM5 (Voldoire et al., 2013), auquel il ajoute les modules PISCES (Aumont and Bopp, 2006) pour la représentation du cycle du carbone océanique et ISBAcc (Gibelin et al., 2008) dans SURFEX (Masson et al., 2012) pour la représentation du cycle du carbone continental.

La Figure 2.2 présente une évaluation de paramètres climatiques physiques et biogéochimiques essentiels simulés CNRM-ESM1 sur la période 1986-2005. Cette Figure montre également comment CNRM-ESM1 se comporte par rapport à CNRM-CM5, l'AOGCM dont il est issu. Cette comparaison suggère que les modèles CNRM-ESM1 et CNRM-CM5 sont proches en termes d'état moyen : les scores statistiques composant le diagramme de Taylor sont impossibles à distinguer entre les 2 modèles, en particulier sur les continents (Figure 2.2a). Cela est moins vrai sur les océans où CNRM-ESM1 présente des corrélations spatiales plus faibles suggérant une moins bonne représentation des structures spatiales des couches de mélange océanique et de la salinité de surface que CNRM-CM5 (Figure 2.2b). Nous avons pu identifier que ces différences entre les 2 modèles font suite à l'utilisation d'un pas de temps de couplage entre l'océan et l'atmosphère plus petit dans CNRM-ESM1 que dans CNRM-CM5. Ce pas de temps de couplage a induit des biais sur la couverture de glace simulée par le module de glace de mer Gelato (Salas Mélia, 2002) qui se répercute sur les propriétés hydrodynamiques des masses d'eaux.

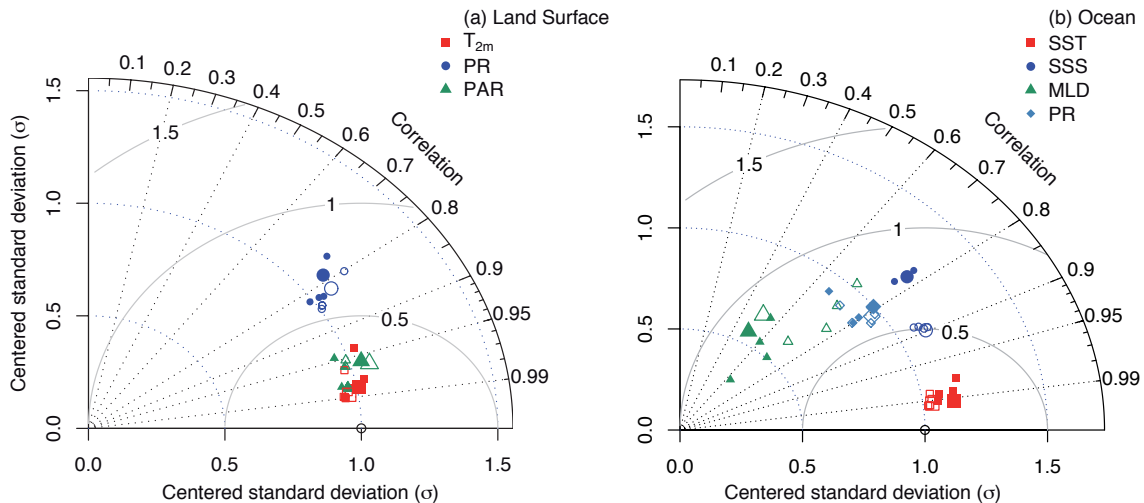


FIGURE 2.2 – Diagramme de Taylor permettant de comparer les performances de CNRM-ESM1 (symboles pleins) et CNRM-CM5 (symboles vides) à reproduire les observations récentes tel que détaillées dans (Séférian et al., 2016a). Les scores statistiques sont calculés à partir de moyenne climatologique sur la période 1986-2005 pour les résultats de modèle et pour les observations. La température de surface (T_{2m}), les précipitations (PR) et le rayonnement photosynthétique (PAR) représentent les paramètres climatiques contrôlant la dynamique du cycle du carbone terrestre (a) ; le température de surface de l'océan (SST), la salinité de surface (SSS), la couche de mélange océanique (MLD) et les précipitations (PR) représentent les principaux paramètres de contrôle du cycle du carbone océanique (b).

Malgré ces différences, CNRM-ESM1 présente des caractéristiques proches des autres ESMs

internationaux ayant contribué à CMIP5. La Figure 2.3 présente les émissions compatibles de CO₂ simulées par CNRM-ESM1 par rapport à celles des 14 ESMs de CMIP5. Comme expliqué dans Jones et al. (2013), les émissions compatibles de CO₂ représentent la somme de tous les flux de carbone entrant dans le système Terre sur une période donnée. Elles permettent de diagnostiquer a posteriori les émissions anthropiques de CO₂. Ces dernières peuvent donc être comparées soit aux émissions anthropiques de CO₂ observées soit aux émissions de CO₂ futures modélisées par les modèles macro-économique intégrés. La Figure 2.3 montre que CNRM-ESM1 représente l'évolution observée des émissions anthropiques de CO₂ et qu'il se situe dans l'enveloppe des modèles CMIP5 sur la période future.

Toutefois, la bonne représentation des émissions compatibles de CO₂ ne veut pas dire que le modèle simule les bons flux de carbone pour de bonnes raisons. En effet, de nombreux processus essentiels du cycle du carbone global étaient mal représentés (e.g., photosynthèse, respiration autotrophique) ou absents (changement d'usage des sols, feux de forêts) dans CNRM-ESM1.

2.3 Amélioration de la représentation du cycle du carbone global

Ce constat sur la qualité des processus représentés dans CNRM-ESM1 a motivé des travaux de développement et d'amélioration du modèle système Terre du CNRM. Ces activités ont pris place entre 2015 et 2018, avec en toile de fond, la préparation du modèle pour la sixième phase de l'exercice d'intercomparaison de modèle (CMIP6) qui sert de base pour l'élaboration des rapports du GIEC.

La mise en place d'un modèle de qualité réunissant toutes les composantes du système Terre modélisées au CNRM a été un objectif de premier plan. Ma participation à cet objectif a été de modéliser le cycle du carbone de ce modèle et de réaliser son assemblage (ou couplage). Par rapport à sa version précédente, CNRM-ESM1, dont le papier de référence a été publié en 2016 (Séférian et al., 2016a), CNRM-ESM2 constitue un vrai saut en termes de complexité dans la mesure où il simulera les interactions entre le climat, le cycle du carbone global, les aérosols et la chimie stratosphérique.

Certains développements de ce modèle ont été menés dans le cadre du projet européen H2020-CRESCENDO. C'est le cas, par exemple, de la nouvelle représentation de l'albédo océanique qui a été intégrée aujourd'hui dans les modèles de climat du CNRM et de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL). D'autres développements se sont inscrits dans le contexte d'encadrement d'étudiants de Master, de post-docs ou de collaborations avec des chercheurs du CNRM.

Le fruit de ces travaux s'est concrétisé par la production des simulations pour CMIP6 avec un modèle système Terre plus réaliste en terme de processus associés au cycle du carbone et dont l'augmentation en complexité n'a pas pénalisé la comparaison par rapport aux observations récentes (Figure 2.4).

Nous verrons à la fin de ce chapitre que la manière dont ce modèle a été construit par le groupe climat du CNRM a permis d'assurer une meilleure traçabilité entre les versions de modèle et donc d'offrir une meilleure compréhension du rôle de composantes du système Terre dans les projections futures. Dans les sous-sections suivantes je m'attarde sur quelques développements portés par des étudiants et/ou post-docs.

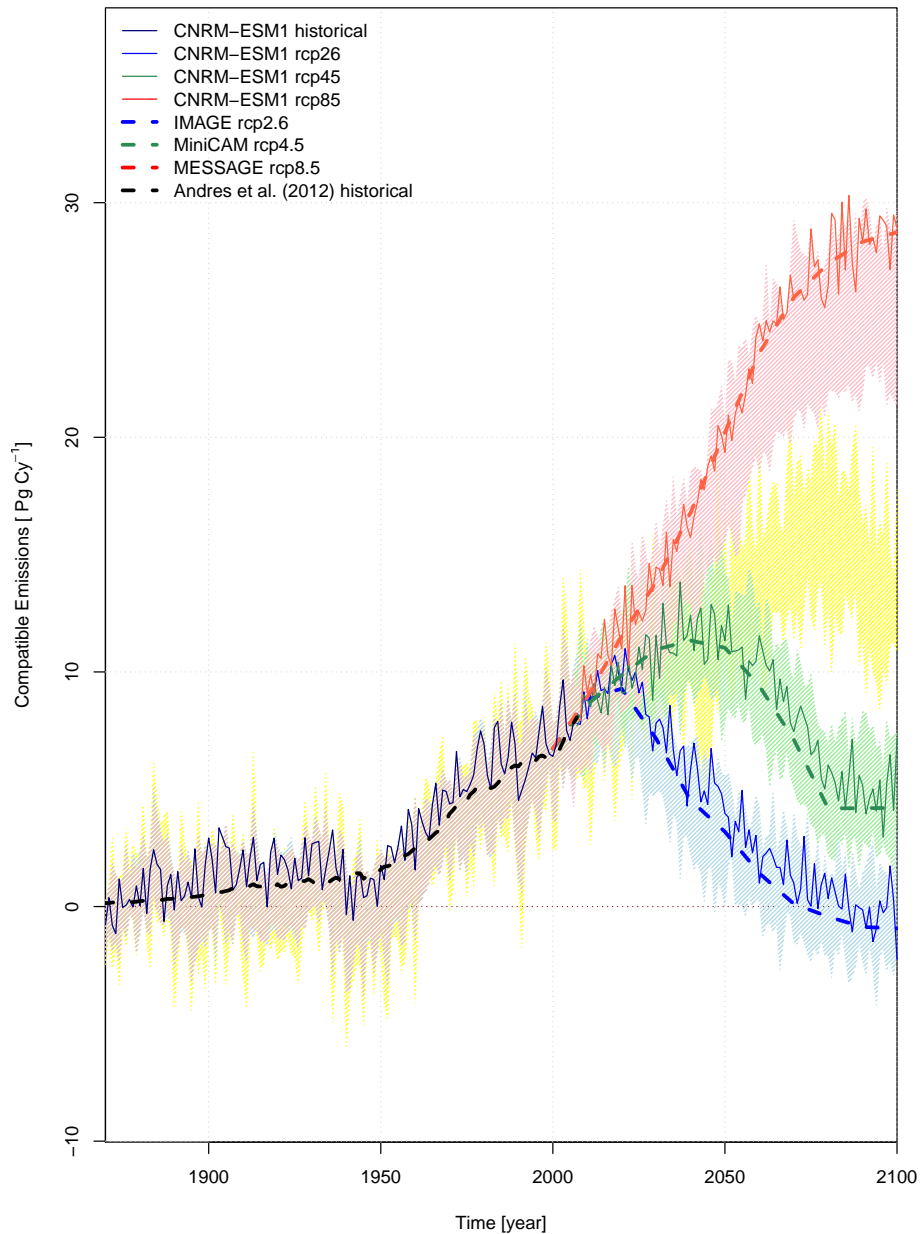


FIGURE 2.3 – Comparaison des émissions compatibles (en Gt C par an) calculées par Jones et al. (2013) pour 4 scénarios futurs utilisés dans le 5^{ème} rapport du GIEC par rapport à celles simulées par le modèle CNRM-ESM1 (en traits pleins) et par les modèles socio-économique intégrés (en traits tiretés) à l'exception de la période 1870-2005 où sont représentés les observations de Andres et al. (2012) (en trait tirette noir). Les enveloppes représentent l'écart-type des modèles système Terre ayant contribué à CMIP5.

2.3.1 Feux naturels

Le module de feux naturels a été implémenté et évalué par Cécile Porchier et Simon Jalladeau lors d'un stage de master. Ce processus était non représenté dans la version précédente d'ISBacc alors qu'il constitue un processus de premier ordre pour le cycle du carbone continental. En effet, Yue et al. 2015 estiment que l'impact des feux sur le puits de carbone continental est d'un ordre de grandeur équivalent à celui de 0.3 GtC y^{-1} ; soit 20% du puits de carbone continental dans un monde sans feux.

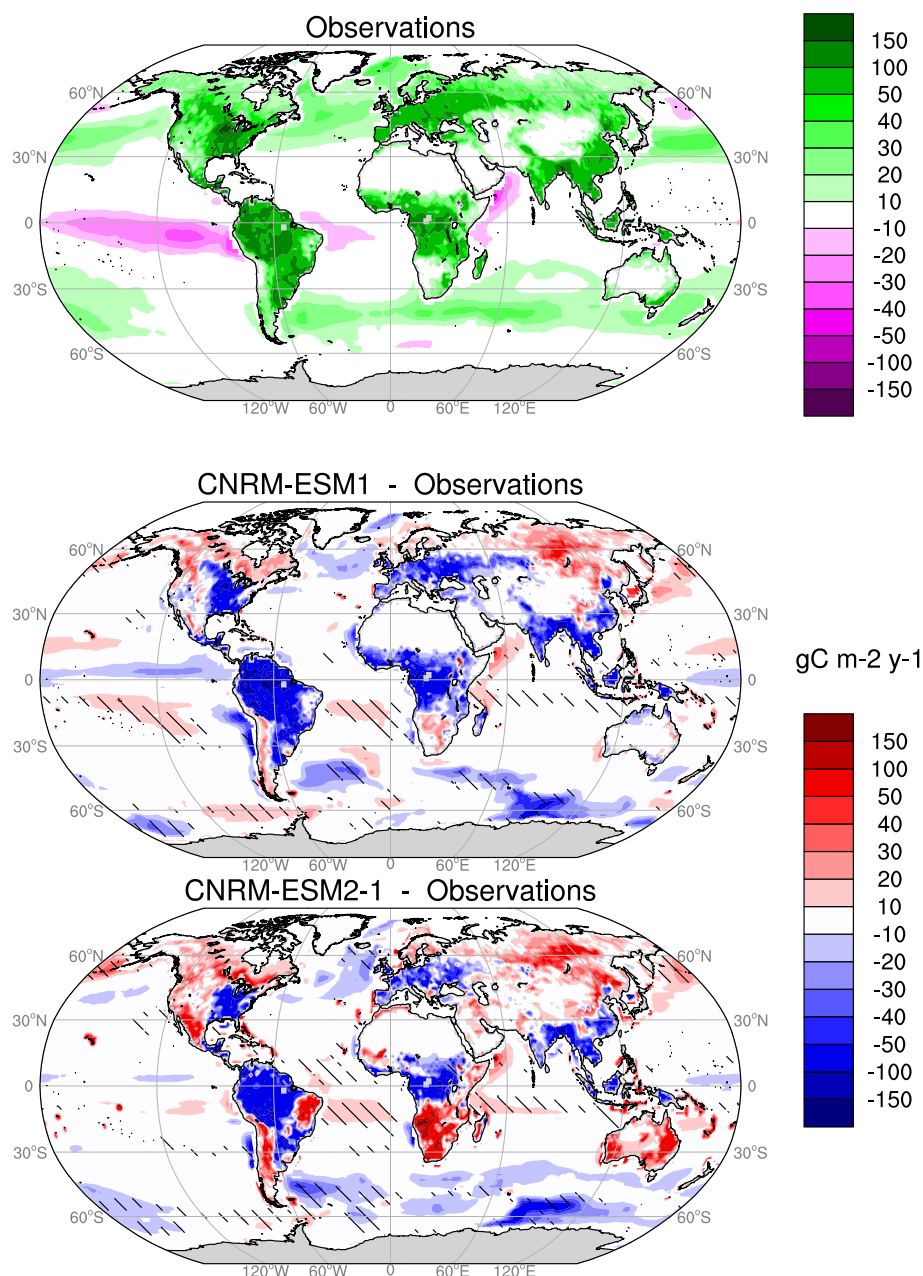


FIGURE 2.4 – Climatologie composite des flux de carbone sur les continents et les océans tels que estimés à partir de produit d’observations sur la période 1986-2005. Le (Figure 2.2a).Le panneau (a) représente les valeurs absolues de la production primaire sur les continent (Schwalm et al., 2015) et les flux de carbone net sur océans (Landschützer et al., 2016). Les panneaux (b) et (c) représentent les différences modèles-données sur la même période pour CNRM-ESM1 et CNRM-ESM2-1. Les zones hachurées sur océans mettent en lumière les régions sur lesquelles modèles et données ne s’accordent pas sur la direction du flux de carbone océanique.

Ce module de feux naturels s’inspire à la fois du modèle GlobFirm (Thonicke et al., 2001), des statistiques de feux de Météo-France et des spécificités du modèle SURFEX associées à l’hydrologie et la végétation.

La Figure 2.5 valide le bon comportement du module de feux naturels en moyenne annuelle sur la période 2001-2013 par rapport aux observations GFED3.1 (Werf et al., 2010). On

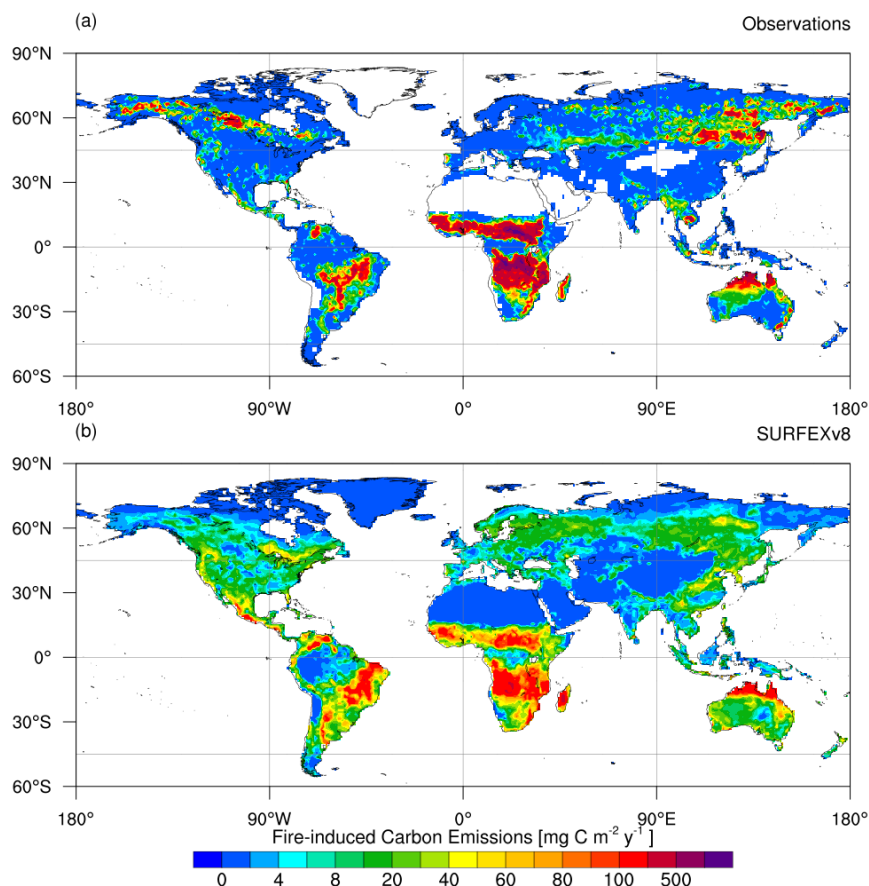


FIGURE 2.5 – Climatologie annuelle des émissions de carbone liées aux feux naturels sur la période 2001-2013. Les estimations provenant de produit d’observations (a) sont issues de la base GFED3.1 (Werf et al., 2010), les résultats de simulation sont issus du modèle ISBA-CTRIP forcé par des réanalyses atmosphériques sur cette même période (Delire et al., submitted).

remarque toutefois que les émissions de carbone imputées aux feux restent sous-estimées sous les tropiques. Ce défaut du modèle s’explique par le fait que seule la part naturelle des feux a été représentée dans ISBAcc alors que les observations tiennent compte des feux naturels et anthropiques, y compris les brûlis sur culture. Comme expliqué dans le Chapitre 6, l’amélioration de ce module de feux en tenant compte des processus anthropiques pilotant le déclenchement et l’arrêt des feux s’inscrit dans mon projet de recherche pour les prochaines années.

2.3.2 Albédo de surface de l’océan

Une nouvelle paramétrisation de l’albédo de surface de l’océan (Séférian et al., 2018a) a été développée en collaboration avec Sunghye BAEK (post-doc) et Olivier Boucher (IPSL/Laboratoire de Météorologie Dynamique). Ce schéma numérique de l’albédo de surface de l’océan permet de représenter les processus qui régissent la réflectance du rayonnement solaire à la surface de l’océan (longueur d’onde, fractionnement du rayonnement diffus/direct, vent, chlorophylle de surface, écume). Ce schéma numérique conduit à une amélioration notable de l’albédo de surface de l’océan (et donc des flux d’énergie au-dessus de l’océan) dans les modèles climatiques de l’IPSL (LMDZ) et du CNRM (ARPEGE) (Figure 2.6).

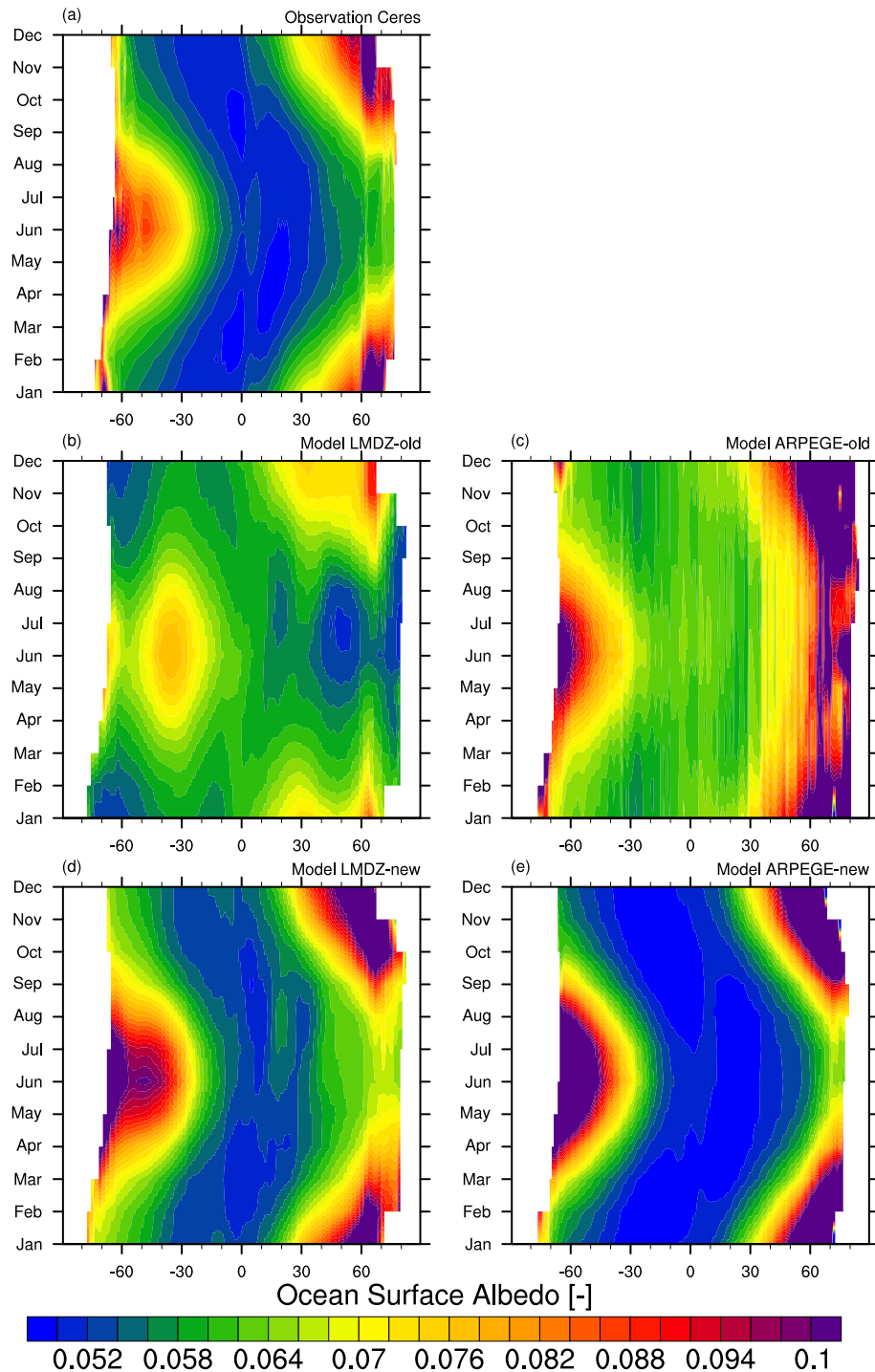


FIGURE 2.6 – Diagramme latitude-temps de l'albédo de surface de l'océan tel qu'estimé à partir des observations satellite CERES (Weilicki, 1996) et des résultats de modèle utilisant soit l'ancienne paramétrisation (LMDZ-old, ARPEGE-old) soit la nouvelle formulation publiée dans Séférian et al. (2018a) (LMDZ-new, ARPEGE-new).

La Figure 2.6 présente le cycle annuel moyen de l'albédo de surface de l'océan dans les modèles LMDZ et ARPEGE et les compare aux observations satellites CERES (Weilicki, 1996). On voit une nette amélioration du cycle annuel de l'albédo de surface de l'océan pour ces deux modèles lorsque l'on passe de l'ancienne (LMDZ-old, ARPEGE-old) à la nouvelle formulation de l'albédo

de surface de l'océan que nous avons développée (LMDZ-new, ARPEGE-new).

Nous avons estimé que le changement climatique pouvait donc induire un changement de $\pm 5\%$ de l'albédo de surface de l'océan en raison des variations du régime des vents, de la proportion diffus/direct liée à la couverture nuageuse et de la couleur de l'océan. Ce changement représente une modulation de $\pm 1 \text{ W m}^{-2}$ du bilan radiatif de la planète; c'est à dire une amplitude comparable aux forçages radiatifs des gaz à effet de serre.

2.3.3 Couplage continents-océan : première ébauche du continuum aquatique

Dans le cadre d'une collaboration avec l'Observatoire Midi-Pyrénées, nous avons initié un premier couplage entre le modèle ISBacc et PISCES permettant de représenter les flux de carbone organique dissous à travers le continuum aquatique. Ce couplage a été possible grâce à la participation de Christine Delire et Bertrand Decharme à ce projet. En effet, leurs connaissances du modèle de surface, SURFEX, et du modèle de rivières, CTRIP, utilisés au CNRM ont été fondamentales puisqu'il fallait générer des flux de carbone organique dissous dans ISBacc (composante du cycle du carbone de la plateforme SURFEX), acheminer ce flux vers les rivières simulées par CTRIP et puis réaliser le couplage avec le modèle d'océan NEMO.

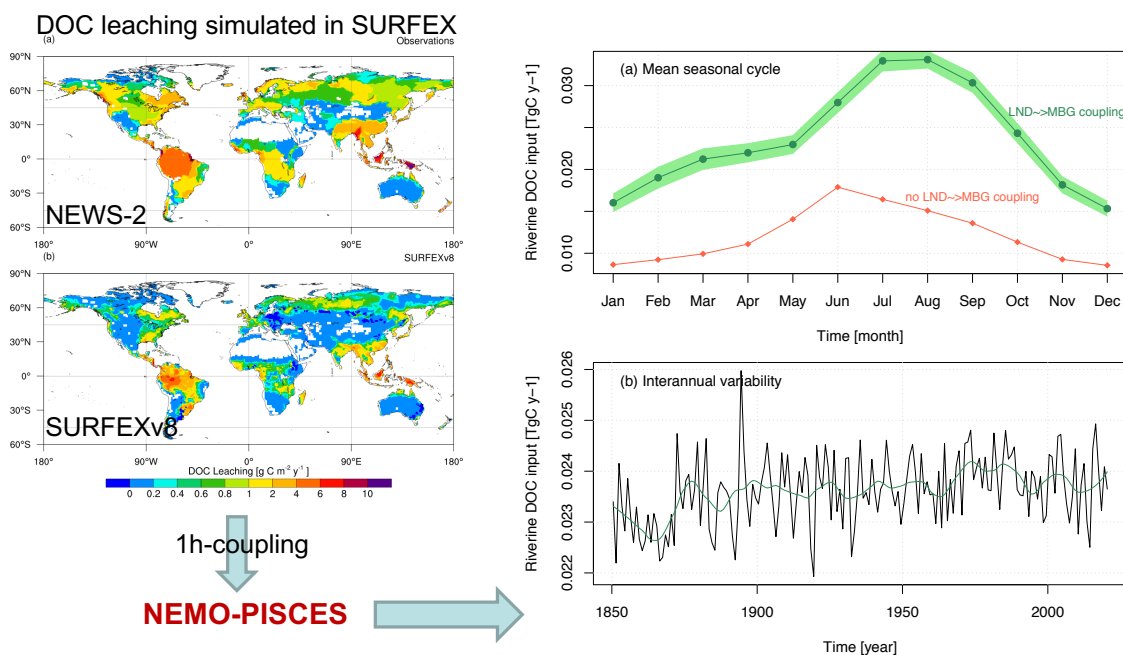


FIGURE 2.7 – Représentation schématique du couplage entre le cycle du carbone continental et le cycle du carbone océanique via le continuum aquatique tel que modélisé dans CNRM-ESM2-1 (Séférian et al., submitted). Les panneaux de gauche montrent les estimations récentes et les résultats de simulation de ISBA-CTRIP en termes de la libération de carbone organique dissous (DOC) des sols vers les rivières. Les panneaux de droite montrent l'impact de ce couplage sur les apports de DOC à l'océan, notamment l'impact sur le cycle saisonnier et la représentation de sa variabilité interannuelle.

La Figure 2.7 présente de manière schématique la manière dont ce couplage s'opère et les résultats qu'il induit, notamment en terme de variabilité du flux de carbone organique dissous vers l'océan.

À travers ce travail nous avons appris deux choses qui nous semblent importantes. La première

concerne la modélisation du continuum aquatique vis-à-vis des surfaces continentales. En implémentant un module assez simple dans un modèle qui représente bien l'hydrologie continentale (Decharme et al., 2019), nous arrivons à capturer au premier ordre la distribution géographique des flux de DOC vers le continuum aquatique. La seconde concerne le traitement des conditions aux limites dans les modèles de biogéochimie marine. En effet, on voit que la prise en compte de ce couplage induit des changements sur le cycle saisonnier de l'apport de carbone organique dissous (DOC) à l'océan ainsi que la prise en compte de variabilité interannuelle des flux de DOC, modulée à la fois par la variabilité interannuelle de la biosphère terrestre mais aussi par celle du flux d'eau en provenance des rivières et des fleuves. Ce qui suggère que les modèles utilisant des conditions aux limites climatologiques ne sont pas cohérents dans leur manière de simuler le cycle du carbone global et le cycle hydrologique global.

Il est important de souligner qu'ici aussi, comme pour le module de feux, de nombreux processus restent manquants. L'amélioration de ce modèle constitue donc une perspective en termes de développement pour les prochaines années. J'aborderai plus en détail cet aspect dans le Chapitre 6.

2.4 Évaluation des modèles du système Terre

L'évaluation des modèles du système Terre est une activité qui va de pair avec le développement des modèles : elle permet de qualifier le comportement du modèle et son adéquation avec les observations et elle permet de mettre en avant les faiblesses du modèle et donc guider les futures améliorations.

Même si l'activité d'évaluation d'un modèle est une activité routinière dans mon travail de modélisateur, je n'ai pas eu l'occasion de publier de travaux sur l'amélioration d'un processus diagnostiqué comme erroné par une évaluation. Par contre, comme mes travaux s'insèrent plus dans la communauté de modélisation internationale, j'ai participé ou piloté des études sur la qualification des ESMs, communément appelées inter-comparaison de modèles.

2.4.1 Analyse multi-modèle

L'évaluation des ESMs a motivé un grand nombre d'études durant l'élaboration du 5ème rapport du GIEC avec des papiers importants comme Anav et al. (2013) ou Knutti et al. (2013) repris dans le Chapitre 11 de l'AR5 (Flato et al., 2014). Cet essor s'explique en partie par

- la mise à disposition de produits d'observations globaux qui permettent d'évaluer les composantes du système Terre (cycle du carbone, chimie, aérosols) caractéristiques des ESMs.
- le traitement systématique d'un grand nombre de résultats de modèle pour lesquels une analyse fine des processus et des mécanismes est compliquée.

À travers mon activité de modélisation j'ai suivi cette tendance à l'évaluation de plus en plus systématique des ESMs qui sert davantage à classer les modèles les uns par rapport aux autres qu'à connaître leurs limitations. C'est ce courant (et les relecteurs du papier) qui m'a poussé à inclure un volet d'évaluation inter-modèles dans l'article de référence de CNRM-ESM1 (Séférián et al., 2016a) dont la Figure 2.8 est extraite. Cette Figure représente un diagramme de scores statistiques caractéristiques (corrélation spatiale et écart quadratique moyen, RMSE) permettant de décrire les performances d'un modèle par rapport à un autre. Cette Figure a permis de montrer que CNRM-ESM1 disposait de performances comparables à celles des autres

modèles officiels de l'exercice CMIP5.

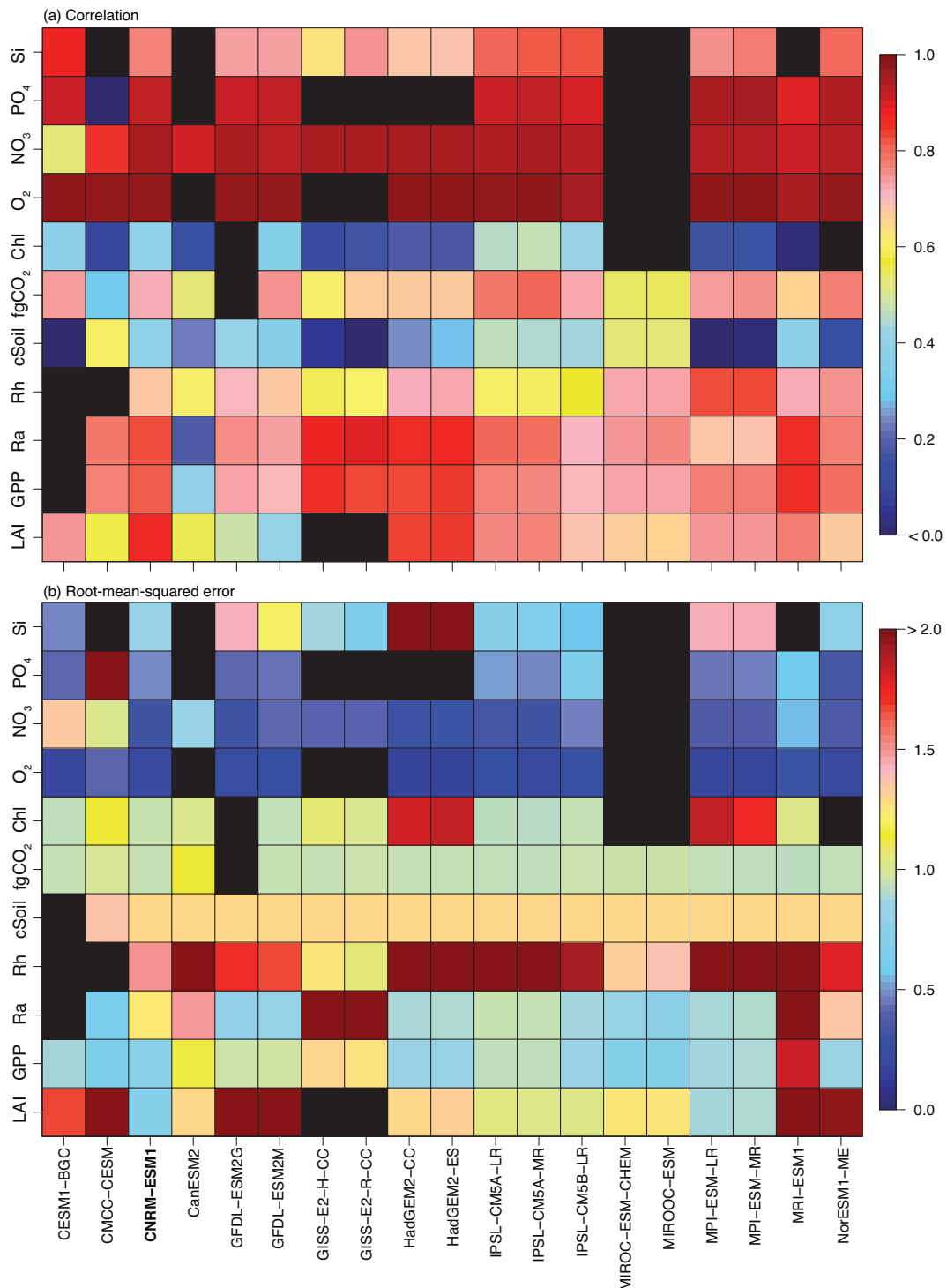


FIGURE 2.8 – Performances d'un ensemble de plusieurs modèle système Terre de CMIP5 (incluant CNRM-ESM-1) en terme de représentation des observations sur la période récente (1986-2005). Ces performances sont mesurées en termes d'écart quadratique moyen (RMSE) ou de corrélation saisonnière. Cette Figure issue de Séférian et al. (2016a) montre que CNRM-ESM1 a des performances comparables à celles des autres ESMs de CMIP5.

Cependant, je suis resté critique quant à la manière dont la communauté utilisait l'évaluation des modèles comme levier pour sélectionner le « meilleur » modèle ou « contraindre » les projections. En effet, selon le champ géophysique évalué, il est naïf de traiter chaque modèle comme équivalent. Certaines spécificités liées à la « cuisine interne » d'un groupe de modélisation peuvent jouer sur les scores statistiques finaux. C'est le cas pour le cycle du carbone océanique ou la biogéochimie marine en particulier pour lesquels les groupes de modélisation utilisent des approches d'initialisation et de spin-up différentes.

En 2016, j'ai pu montrer que les protocoles d'initialisation des modèles de biogéochimie marine n'était pas anodin quand on souhaite évaluer l'écart entre un modèle et les observations (Séférian et al., 2016b). C'est en particulier le cas pour des champs comme l'oxygène pour lesquels la même base de données sert à la fois à initialiser et à évaluer le modèle. Dans ce cadre là, la durée de la simulation de mise à l'équilibre, ou *spin-up*, compte.

En effet aucune métrique statistique utilisée pour évaluer un modèle ne tient compte de la dérive d'un champ simulé. Ainsi il est possible de comparer deux modèles initialisés avec des observations dont l'un dispose d'une centaine d'années de mise à l'équilibre et montre une grande dérive alors que l'autre dispose d'une mise à l'équilibre de plusieurs milliers d'années et ne montre pas de dérive.

À travers ce travail, j'ai pu montrer que si l'on prend en compte la dérive des modèles, et donc les différences en protocole d'initialisation, on obtiennait un classement différent des modèles capables de reproduire les champs observés par rapport à une évaluation aveugle ne tenant pas compte des spécificités entre les modèles (Figure 2.9).

Tenir compte de cette dérive dans le classement des ESMs dans leur capacité à simuler la distribution d'oxygène dissous à 150m fait passer CNRM-ESM1 de la première place à la onzième place si l'on tient compte de la dérive dans le temps de ce champ.

La Figure 2.9 montre en particulier que le modèle IPSL-CM5B-LR est très largement pénalisé par rapport aux autres ESMs si l'on tient compte de la dérive en oxygène en surface dissous tel que simulé par ce modèle. Le même phénomène est constaté pour CMCC-ESM pour l'oxygène à 150m.

En raison de sa pertinence pour les exercices d'intercomparaison de modèle, les recommandations de cette étude ont été utilisées par quelques articles pour la mise en place des protocoles expérimentaux de l'exercice CMIP6 (e.g., Jones et al., 2016a; Orr et al., 2017).

2.4.2 Analyse de Traçabilité

Cette dernière sous-section vise à mettre en lumière le travail que j'ai entrepris depuis le développement du modèle du système Terre du CNRM. En effet, comme expliqué en introduction, la complexité des ESMs en termes de processus biogéochimiques ainsi que la diversité des cadres physique et dynamique rend l'analyse d'un ensemble multi-modèle compliqué et difficile à contraindre.

C'est pour cela que le développement d'un ESM en parallèle au développement d'un modèle de climat (cadre physique et dynamique) permet d'isoler le rôle de composantes du système Terre dans les projections futures. En partant de ce principe, j'ai démontré dans le papier de référence de CNRM-ESM2-1 (Séférian et al., submitted)—le modèle système Terre du CNRM qui a été développé à partir un modèle de climat CNRM-CM6-1 (Voldoire et al., 2019)— que l'inclusion des composantes du système Terre induisait un gain climatique de -10%. Ceci veut dire que le réchauffement global projeté en fin de siècle par CNRM-ESM2-1 est moins important que celui

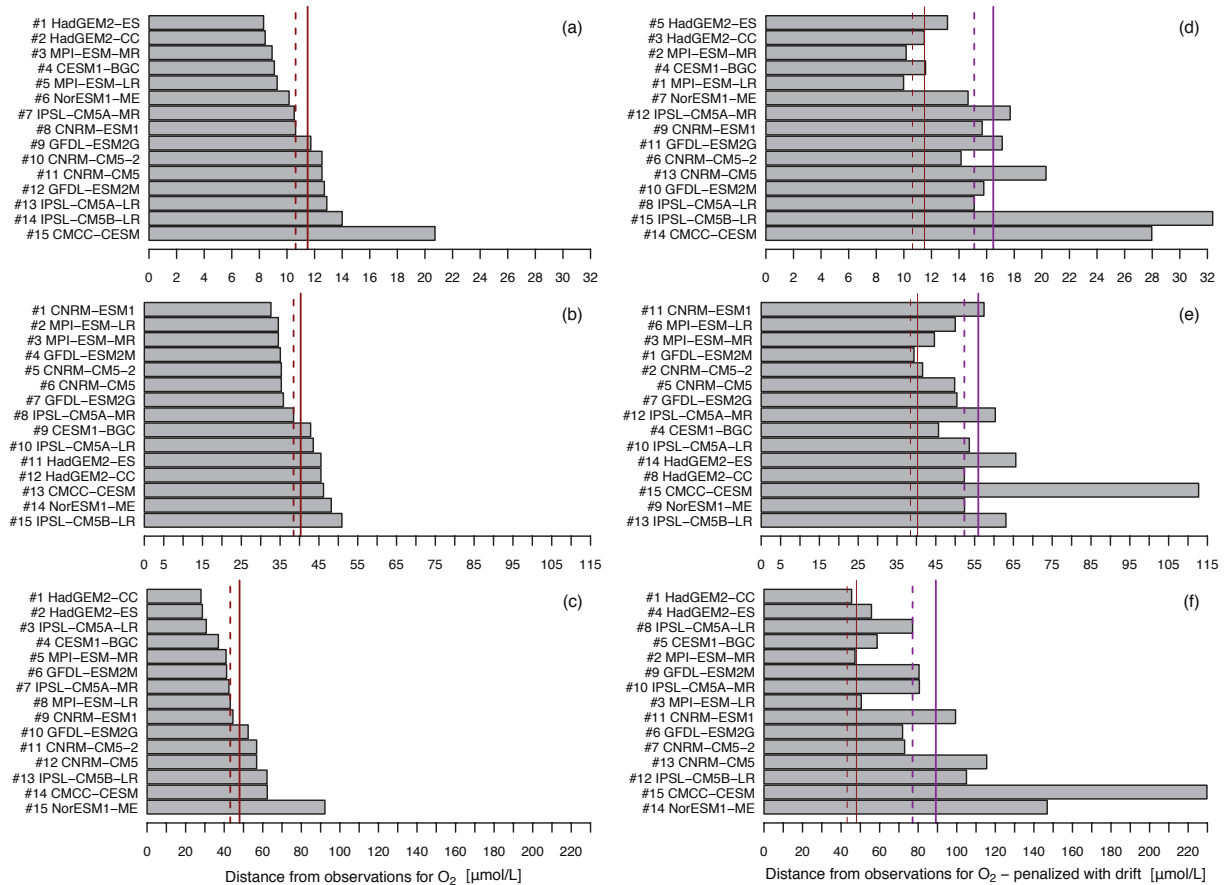


FIGURE 2.9 – Influence de la prise en compte de la dérive des concentrations d'oxygène dissous sur le classement des performances des ESMs à simuler les concentrations d'oxygène dissous. Les panneaux de gauche (a,b et c) représentent le classement des ESMs en fonction de leur capacité à représenter les concentrations d'oxygène dissous en surface, 150 m et 2000 m, respectivement. Les panneaux de droite (d,e et f) représentent les mêmes scores statistiques mais tenant compte de la dérive en oxygène dissous des ESMs. Cette Figure est issue de Séférian et al. (2016b)

projeté par CNRM-CM6-1.

La Figure 2.10 issue de cette étude illustre à quel point les projections de température en moyenne globale par rapport à la période 1850-1900 diffèrent entre CNRM-ESM2-1 et CNRM-CM6-1 pour les mêmes scénarios.

Avec mes collègues du CNRM, nous avons montré que plusieurs composantes étaient en jeu pour expliquer les différences en termes de projections futures.

En premier lieu, les différences de réchauffement global entre CNRM-ESM2-1 et CNRM-CM6-1 sont expliquées par la réponse de la végétation au changement climatique et à l'augmentation du CO₂. L'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère cause une fermeture des stomates limitant la transpiration de la végétation terrestre. Cet effet a pour conséquence d'amplifier le réchauffement planétaire. Nous avons pu montrer que ce couplage CO₂-transpiration de plantes est plus réaliste dans CNRM-ESM2-1 que dans CNRM-CM6-1 du fait de la réponse de la végétation terrestre au changement climatique. Ce processus est responsable d'un forçage radiatif de l'ordre de $1.01 \cdot 10^{-4} \text{ W m}^{-2} \text{ ppm}^{-1}$ dans CNRM-CM6-1 alors qu'il est de $0.5 \cdot 10^{-4} \text{ W m}^{-2} \text{ ppm}^{-1}$ dans CNRM-ESM2-1. Dans un scénario futur tel que le scénario ssp585, l'effet du

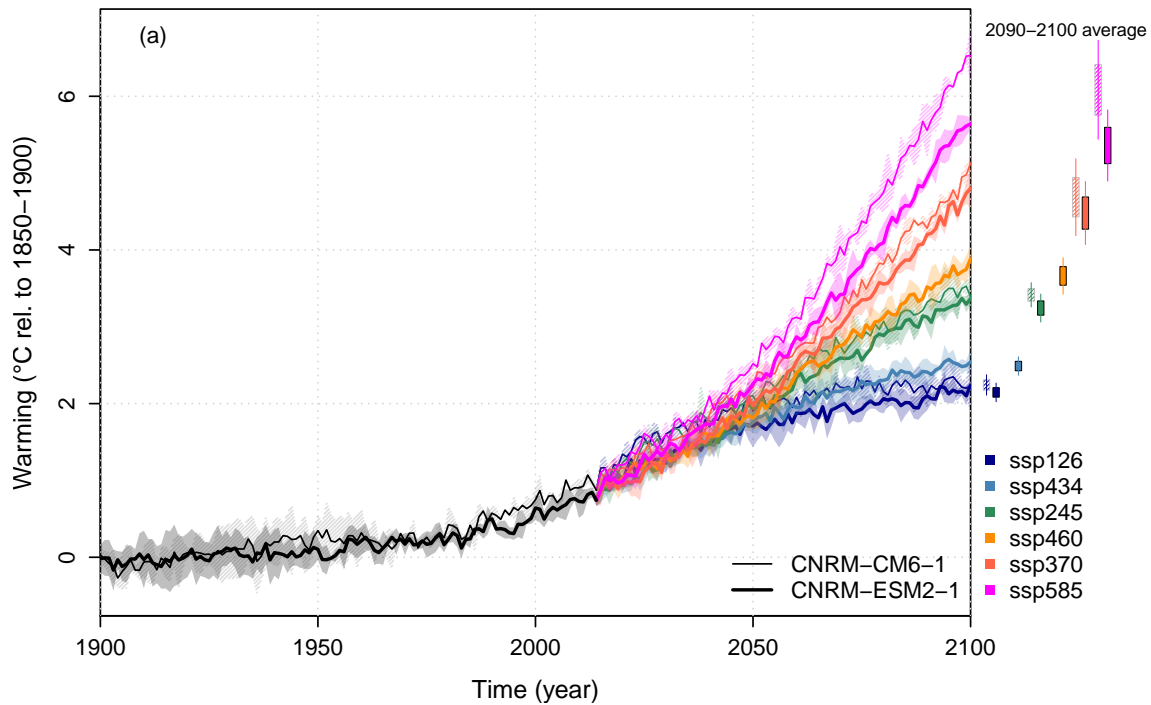


FIGURE 2.10 – Évolution de la température en moyenne globale de 1900 et 2100 telle que simulée par CNRM-ESM2-1 (traits épais) et CNRM-CM6-1 (traits fins). De 1900 à 2014, l'évolution de la température est reconstruite à partir de forçages observés. Après 2014, l'évolution de la température représente des projections futures selon 6 scénarios de développement macro-économique. Cette Figure est issue de Séférian et al. (submitted).

couplage CO_2 -transpiration induit un forçage radiatif en 2100 (1035 ppm) de 0.104 W m^{-2} pour CNRM-CM6-1 et de 0.051 W m^{-2} pour CNRM-ESM2-1. Cette différence en termes de forçage radiatif induit un réchauffement supérieur de quelques dixièmes de degré à l'échelle planétaire dans CNRM-CM6-1 par rapport à CNRM-ESM2-1.

La prise en compte des rétroactions entre le climat et les aérosols naturels est également importante mais explique moins de 40% de la différence de réchauffement global entre les deux modèles. En effet, dans CNRM-ESM2-1 seules les émissions de poussières désertiques et de sels marins sont interactives¹. Les émissions d'aérosols naturels peuvent donc évoluer librement et répondre aux variations du climat comme le changement du régime des vents ou le réchauffement des couches superficielles de l'océan. Ces rétroactions induisent une augmentation de l'épaisseur optique des aérosols dans CNRM-ESM2-1 de 20% par rapport à ceux de CNRM-CM6-1, s'opposant au réchauffement global.

Enfin, l'utilisation d'un schéma de chimie stratosphérique interactif conduit à la fin du 21ème siècle à des concentrations d'ozone stratosphérique plus importantes que celles simulées par le schéma simplifié de CNRM-CM6-1 (316 DU par rapport à 310 DU en moyenne sur la période 2091-2100 dans le scénario ssp585). Avec des concentrations plus importantes, le forçage radiatif simulé dans CNRM-ESM2-1 est plus faible que celui de CNRM-CM6-1 réduisant le réchauffement planétaire.

1. Elles interagissent avec les nuages, les vents, la température de surface, le rayonnement, etc...

Cycle du carbone à l'interface avec le climat

Sommaire

3.1	Introduction	24
3.2	Variabilité décennale des flux de carbone océanique	26
3.3	Analyses de tendances récentes	29
3.3.1	Détection & Attribution de l'évolution récente des flux de carbone océaniques	29
3.3.2	Détection & attribution de l'évolution récente de l'indice foliaire de l'hémisphère Nord	31
3.4	Rôle du cycle du carbone dans les projections futures	31
3.4.1	Rétroaction climat-cycle du carbone et non-linéarité	33
3.4.2	Rétroaction climat-cycle du carbone et variabilité interne	34

3.1 Introduction

Comme expliqué dans le Chapitre 1, le cycle du carbone global entretient un lien fort avec le climat à des échelles de temps et d'espaces très différentes. Les reconstructions paléoclimatiques montrent que le climat de la Terre a connu des variations climatiques de très grandes amplitudes (Petit et al., 1999; Lüthi et al., 2008). Au cours de ces variations, la température moyenne globale oscille entre des périodes froides (définies comme périodes glaciaires) et des périodes chaudes (définies comme périodes interglaciaires) dont l'amplitude est de l'ordre d'une dizaine de degrés Celsius. Sur la base de cette cyclicité, le mathématicien Milankovitch propose dans les années 1920 une théorie astronomique fondée sur la variabilité du forçage solaire. Dans cette théorie, la variabilité climatique se trouve être gouvernée par une variabilité forcée naturelle qui répond aux fluctuations de l'excentricité, de l'obliquité de l'axe de rotation de la terre ainsi que de la précession des équinoxes. D'autres enregistrements paléoclimatiques indiquent que des variables biogéochimiques telles que le CO_2 , le méthane ou les poussières désertiques montrent des variations très significatives avec la même périodicité. Pour le simple cas du CO_2 , l'amplitude de ces variations est de l'ordre de 90–100 ppm entre une période glaciaire et une période interglaciaire. Tout laisse donc à penser que de petites oscillations des paramètres astronomiques engendrent des variations du cycle du carbone qui sont amplifiées par l'effet de serre. On parle alors de rétroaction climat-carbone positive car cette dernière tend à amplifier la perturbation initiale.

Depuis la période industrielle, les activités humaines ont libéré dans l'atmosphère une quantité très importante de carbone jusqu'à stocké dans le réservoir géologique depuis le carbonifère. Ces émissions anthropiques sont responsables de l'augmentation de la concentration atmosphérique de CO_2 qui est aujourd'hui environ 45% plus importante que sur la période préindustrielle. Cette augmentation aurait été bien plus importante si les puits naturels de carbone, que sont l'océan et la biosphère terrestre, n'avaient pas absorbé chaque année plus de 50% des émissions de carbone issues des activités humaines (Le Quéré et al., 2018). Ce phénomène témoigne de l'existence d'une autre boucle de rétroaction entre le cycle du carbone et les émissions de CO_2 ; cette dernière est cette fois négative car elle s'oppose à l'accroissement du CO_2 dans l'atmosphère et donc limite le changement climatique global.

L'évaluation réalisée dans le 5ème rapport au GIEC (Ciais et al., 2013) montre que les modèles s'accordent sur le signe de ces deux boucles de rétroactions avec une valeur moyenne de $-1 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ pour la boucle de rétroaction négative CO_2 -cycle du carbone et une valeur moyenne maximale de $+0.5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ pour la rétroaction positive climat-carbone (Figure 3.1).

Friedlingstein et al. (2014) montre qu'une fois prises en compte dans des modèles système Terre, les rétroactions climat-carbone peuvent induire des gammes de réchauffement en 2100 plus importantes que celles estimées sans ces rétroactions pour un même scénario d'émission de gaz à effet de serre et d'aérosols. Néanmoins, l'étude de Friedlingstein et al. (2014) comme la Figure 3.1 montrent qu'il existe une gamme de réponses très différentes d'un modèle à l'autre et donc que la capacité de l'océan et la biosphère terrestre à absorber les émissions anthropiques de CO_2 et limiter le changement climatique reste relativement incertaine (Arneeth et al., 2010).

À ces boucles de rétroactions climat-carbone ou CO_2 -carbone s'ajoutent d'autres boucles de rétroactions climatiques liées de manière plus ou moins directe avec le cycle du carbone et la biosphère (Cadule et al., 2009; Arneeth et al., 2010; Schwinger et al., 2017). La rétroaction la plus forte en amplitude reste à ce jour celle assignée au pergélisol (ou *permafrost* en anglais). En effet, certains modèles prédisent un effet sur le climat d'une ampleur quasiment comparable à

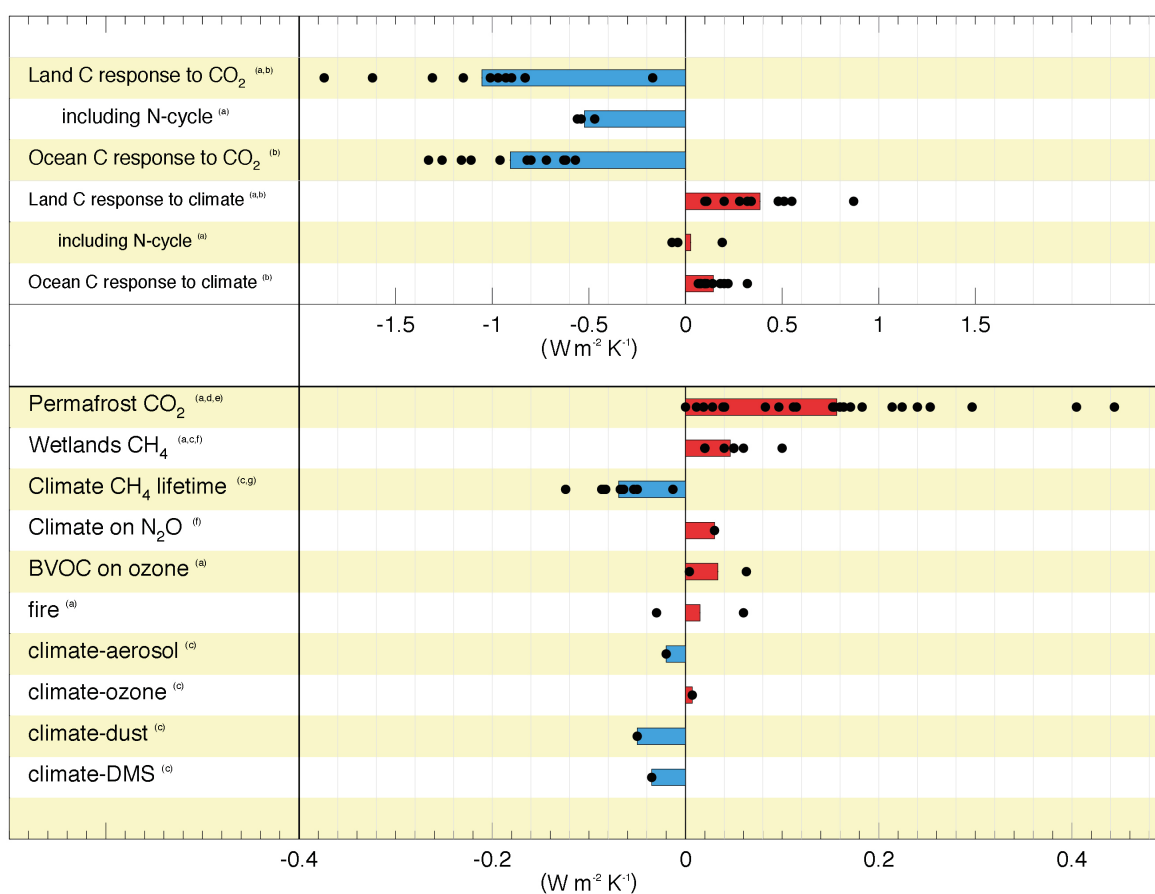


FIGURE 3.1 – Estimations des rétroactions climatiques en lien avec le cycle du carbone et les autres cycles biogéochimiques issues de (Ciais et al., 2013). Les rétroactions représentées en bleu sont des rétroactions négatives s’opposant au changement climatique global tandis que celles indiquées en rouge sont positives et renforcent le réchauffement planétaire.

celle de la rétroaction climat carbone ($+0.4 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$). Mais la fourchette de valeur donnée par les modèles actuels reste très mal contrainte. Les principales sources d’incertitudes sont en lien avec la modélisation sur les régions polaires de l’hémisphère Nord (neige, pergélisols, hétérogénéité des sols en réponse à la fonte du pergélisol, etc.) et la représentation des stocks de carbone dans les régions arctiques. Cependant d’importants progrès ont été réalisés au cours de ces dernières années (depuis l’AR5) sur cet aspect (e.g., Schädel et al., 2014; Burke et al., 2017). Il est probable que le 6^{ème} rapport du GIEC révisé encore ces estimations et ces fourchettes d’incertitudes (e.g., Burke et al., 2017; Gasser et al., 2018; Comyn-Platt et al., 2018).

Outre ces rétroactions liées au cycle biogéochimique du carbone, le cycle du carbone global entretient des interactions plus « physiques » avec le climat. Elles interviennent généralement sur les échanges de chaleur ou d’eau entre des composantes physiques du système climatique et des composantes biologiques. On parle alors d’interaction biophysique. Il s’agit par exemple des changements de réflectivité de surface terrestre via le verdissement de la végétation (Zeng et al., 2017) ou le changement d’usage de sol (De Noblet-Ducoudré et al., 2012), ou les effets d’ombrage que les blooms de phytoplancton induisent sur le transfert radiatif dans l’océan (Lengaigne et al., 2007, 2009).

Dans ce contexte, l'étude des tendances récentes grâce aux observations longues et aux mesures satellites est aujourd'hui un atout pour mieux (1) appréhender les nombreuses incertitudes attenantes à la compréhension du cycle du carbone global et ses mécanismes de rétroactions avec le climat, (2) améliorer les modèles du système Terre et, (3) contraindre les projections climatiques futures. Il en est de même pour l'étude des variations naturelles du cycle du carbone global, et en particulier des flux de carbone, qui permet de contraindre le comportement des modèles en scénarios futurs (Cox et al., 2013; Wenzel et al., 2014, 2016; Kwiatkowski et al., 2017).

C'est dans cette direction que s'inscrit mon travail de recherche à l'interface entre le cycle du carbone et le climat, et pour lequel je tire parti de l'expertise interne du CNRM sur les questions de détection-attribution et l'étude de la variabilité naturelle du climat et du cycle du carbone.

3.2 Variabilité décennale des flux de carbone océanique

Les principaux objectifs de ma thèse de doctorat étaient d'étudier la variabilité décennale des flux de carbone océanique à l'aide de la modélisation numérique. En effet avant 2015, la communauté scientifique ne disposait pas d'estimations des flux de carbone sur le long terme et couvrant l'ensemble de l'océan. Un effort considérable de la communauté a permis de mettre en place une base de données européenne des mesures de carbone océanique appelé SOCAT (Bakker et al., 2016). Cette dernière a permis, de faire émerger des produits globaux comme ceux de Landschützer et al. (2016) ou Rödenbeck et al. (2014). Ces produits ont montré en particulier qu'il existe des variations du puits de carbone océanique de plus de 20% par rapport au puits moyen (2.7 GtC y^{-1}) aux échelles de temps décennales. Ces produits d'observations ont donc permis de faire des progrès considérables et de réconcilier des hypothèses débattues depuis 2007 (Le Quere et al., 2007). Cependant, la publication de ces données a mis les modélisateurs face à un problème de taille : aucun des modèles actuels n'apparaît capable de représenter de telles oscillations à l'échelle d'une ou plusieurs décennies. En effet les modèles du système Terre se montrent trop enclins à représenter la tendance de renforcement du puits de carbone avec la croissance du CO_2 atmosphérique.

Dans DeVries et al. (2019), nous montrons que ces fluctuations décennales du puits de carbone océanique sont en lien avec les ralentissements du taux d'accumulation du CO_2 dans l'atmosphère (Figure 3.2). Comprendre les mécanismes physiques et biogéochimiques mis en jeu dans ces variations décennales peut donc avoir des conséquences importantes sur le climat global et sur les budgets carbone (que nous discuterons plus tard dans le Chapitre 5). Il est donc tout aussi important que les modèles du système Terre soient capables de représenter de telles fluctuations et les mécanismes physiques et biogéochimiques associés.

Mes travaux de recherche sur ce thème depuis mon doctorat portent essentiellement sur la compréhension des mécanismes en lien avec ces fluctuations décennales. Il se trouve que le modèle du système Terre du CNRM que j'ai développé se trouve être un des modèles disposant des variations décennales (DeVries et al., 2019) les plus importantes de l'ensemble CMIP5 et donc offrant un bon outil pour étudier cette question.

Les travaux que je mène actuellement porte sur le rôle des téléconnexions sur le puits de carbone de l'océan Austral en collaboration avec Aurore Voldoire au CNRM. Lors du meeting CLIVAR 2016, j'ai présenté des résultats qui montrent qu'il existe une téléconnection entre la variabilité climatique du Pacifique Équatorial et le puits de carbone de l'océan Austral. C'est en appliquant

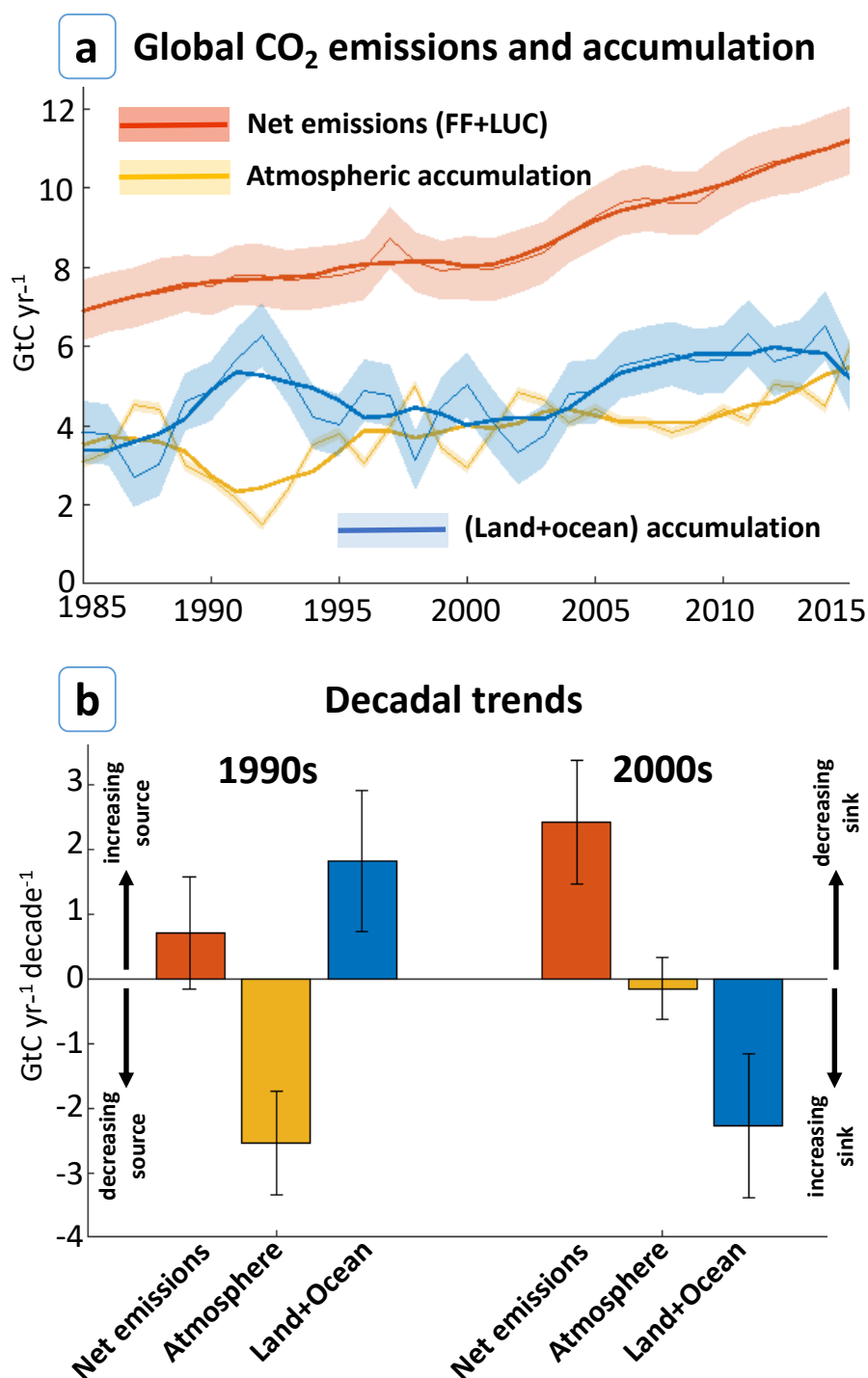


FIGURE 3.2 – Évolution temporelle (a) et tendances décennales (b) des émissions anthropiques de CO₂ (rouge) et du taux observé d'accumulation de CO₂ dans l'atmosphère (orange) et celui estimé à partir des reconstructions du puits de carbone océanique et continental (bleu) de Le Quéré et al. (2018). Cette figure est issue de DeVries et al. (2019)

les mêmes méthodes de rappel en SST et vent de surface que Kosaka (2014) ou Douville et al. (2015) que j'ai pu montrer qu'il était possible de capturer les fluctuations décennales de puits de carbone de l'océan Austral (Figure 3.3). Le fait que seul le rappel en SST permette de capturer ces variations suggère l'existence d'un pont atmosphérique entre ces régions éloignées.

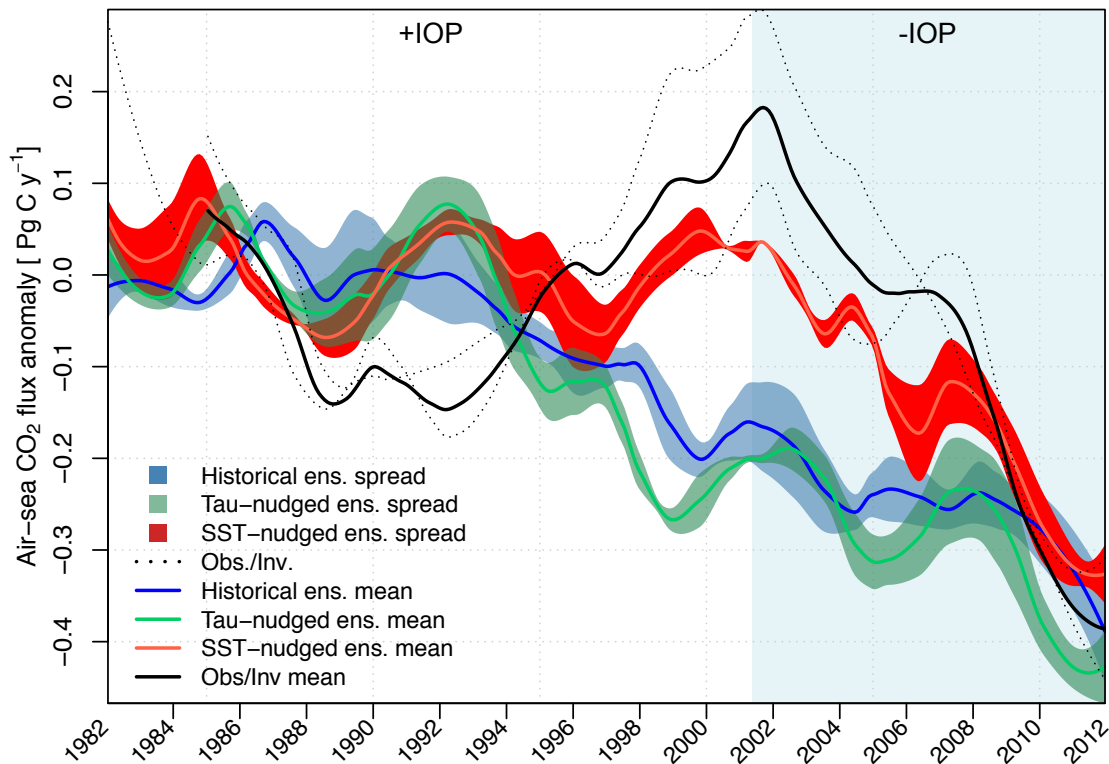


FIGURE 3.3 – Évolution du puits de carbone de l'océan Austral ($<30^{\circ}\text{S}$) de 1982 à 2012 tel qu'estimé à partir des observations (Landschützer et al., 2016; Rödenbeck et al., 2014) et simulé par CNRM-ESM1. La moyenne et l'écart type des ensembles des simulations « libres » sont représentés par la couleur bleu, tandis que les couleurs rouges et vertes représentent ces grandeurs pour les simulations contraintes ou rappelées vers les SST ou le vent de surface observés dans le Pacifique Équatorial (boîte Nino 3.4; 5°S - 5°N and 170 - 120°W .)

En connectant ces résultats à ceux de Kosaka (2014) ou Douville et al. (2015), nous pouvons émettre l'hypothèse que les mécanismes ayant causé « le hiatus » du réchauffement global des dernières décennies ont aussi causé des fluctuations du puits de carbone de l'océan Austral.

Ce résultat donne un autre regard sur les résultats de l'analyse multi-modèles que nous avons conduite avec Laure Resplandy (IPSL) et Laurent Bopp (IPSL) sur la variabilité décennale des flux de carbone et d'oxygène (Resplandy et al., 2015). En effet certains modèles montraient une forte corrélation entre les variations décennales du puits de carbone de l'océan Austral et l'indice SAMI (qui est un indice capturant les fluctuations climatiques entre le Pacifique Équatorial et l'Austral) alors que d'autres modèles montraient une dominance des modes de convection profonde. C'est le cas par exemple du modèle IPSL-CM5A-LR que j'ai utilisé durant ma thèse (Séférian et al., 2013).

Mon travail suggère que les modèles du système Terre doivent être capables à minima de représenter cette téléconnection pour représenter des fluctuations décennales en accord avec les observations récentes du puits de carbone océanique. Ce mécanisme ne représente toutefois qu'une condition nécessaire mais pas suffisante car même en utilisant cette approche nous n'avons pas été en mesure de reproduire des fluctuations d'amplitude égale à celles observées.

3.3 Analyses de tendances récentes

3.3.1 Détection & Attribution de l'évolution récente des flux de carbone océaniques

Comprendre et quantifier avec précision la variabilité climatique est un prérequis essentiel lorsqu'on souhaite s'attaquer à l'analyse des tendances récentes des puits de carbone océanique et continental. Il en est de même pour détecter l'impact du changement climatique sur le cycle du carbone. En effet, d'un point de vue mathématique, on ne détecte une tendance que si son signal émerge du bruit généré par la variabilité climatique.

Même si de nombreuses approches existent pour attaquer cette question, le CNRM dispose d'une forte expertise sur les méthodes de détection et attribution qui regroupent une gamme de techniques sophistiquées pour analyser les tendances récentes. Jusqu'à présent peu d'études ont eu recours à ces approches (Gillett et al., 2004; Andrews et al., 2013; Mao et al., 2016), en particulier parce que la longueur des séries d'observations n'était pas suffisante.

Une des manières de contourner cette limitation est d'avoir recours à des pseudo-observations qui sont souvent des réanalyses ou des reconstructions de modèles. C'est typiquement ce que nous avons utilisé avec Aurélien Ribes (CNRM) et Laurent Bopp (IPSL) dans notre étude de 2014 (Séférian et al., 2014b). En effet, aucune série longue et globale de flux de carbone océanique telles que celles de Landschützer et al. (2016) ou Rödenbeck et al. (2014) n'était disponible en 2013, nous avons donc eu recours aux reconstructions du puits de carbone océanique de l'initiative du *Global Carbon Project* (Le Quéré et al., 2015). Dans un premier temps, ces reconstructions ont été validées par rapport aux observations SOCATv2 (Bakker et al., 2016). Elles ont ensuite été utilisées pour détecter des changements significatifs du puits de carbone océanique et attribuer ces changements soit au climat soit à l'augmentation du CO₂. Ces deux effets ont été isolés grâce à des simulations spécifiques du protocole CMIP5 dans lesquelles l'effet du CO₂ est soit uniquement limité à son effet radiatif¹ soit uniquement limité à son effet géochimique (respectivement en rouge et vert sur la Figure 3.4).

Dans cette étude nous avons montré que les changements récents du puits de carbone océanique étaient exclusivement expliqués par l'effet géochimique de l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère sur les flux de carbone océanique. Seules les régions tropicales (30°N- 30°S) montrent un effet du climat sur les tendances récentes.

Les progrès récents dans le domaine des observations ne sont pas contradictoires avec nos résultats dans la mesure où le signal séculaire du changement climatique sur le puits de carbone de l'océan Austral reste confondu avec la variabilité interne de flux de carbone océanique de cette région. Toutefois le manque d'accord en termes de variabilité décennale entre les modèles du système Terre et les produits d'observations plaide en faveur d'un approfondissement de ces résultats préliminaires.

J'envisage de poursuivre ces analyses dans les années à venir en les réévaluant à partir des produits d'observations disponibles. Dans ce contexte il serait intéressant d'intégrer l'incertitude observationnelle que l'on pourrait quantifier à l'aide de l'initiative SOCOM (Surface Ocean pCO₂ interCOMparison, Rödenbeck et al., 2015). Il serait aussi intéressant de combiner cette analyse avec d'autres variables océaniques contrôlant les flux de carbone océanique telles que la

1. On entend par effet radiatif, l'effet de la hausse du forçage radiatif imputé à l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère. Ce dernier est responsable du réchauffement planétaire. Ici, l'effet radiatif est un analogue de l'effet du changement climatique sur le puits de carbone océanique.

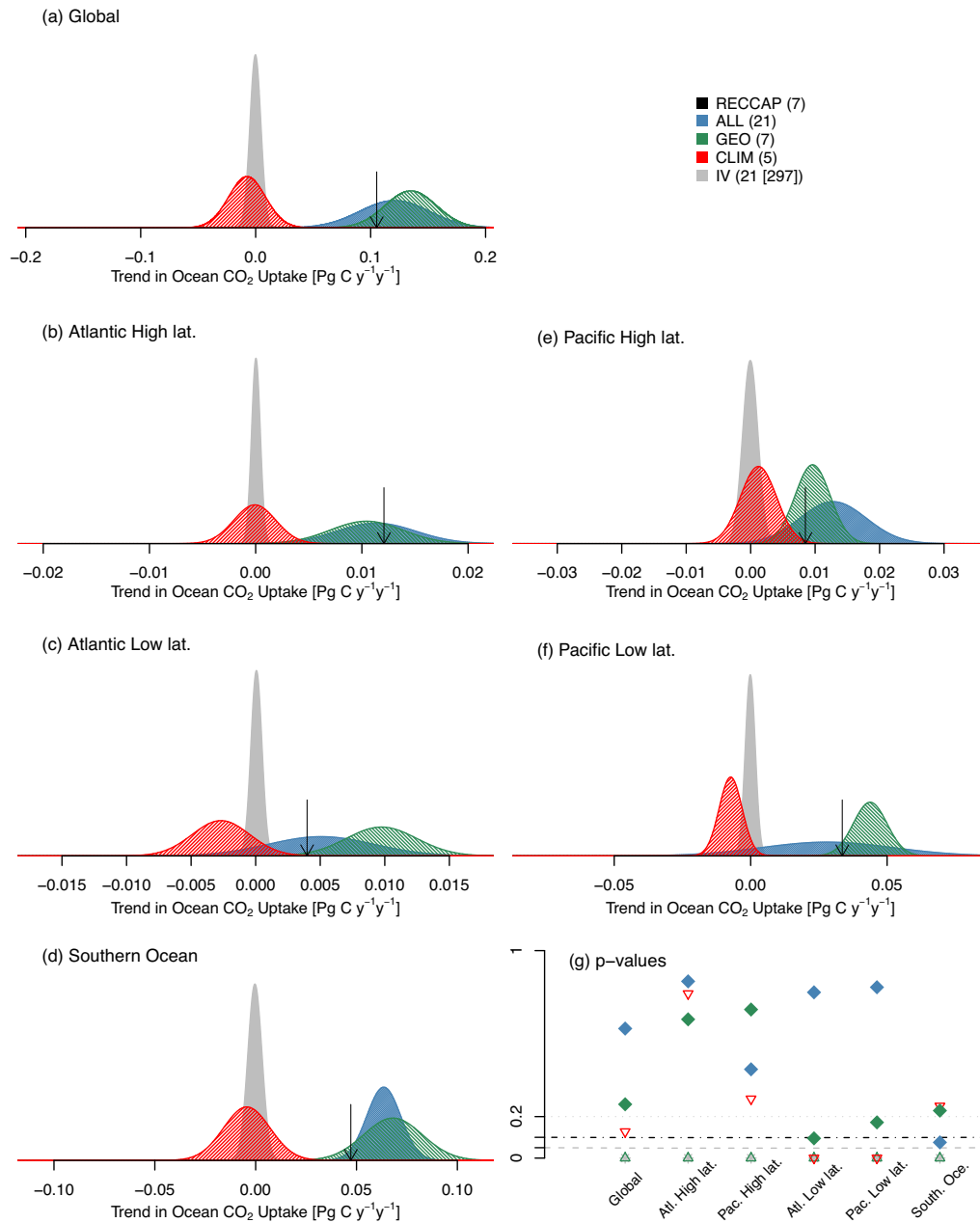


FIGURE 3.4 – Analyse des tendances du puits de carbone océanique conduite dans Sférian et al. (2014b) à partir des simulations CMIP5 disponibles (en couleur) et de la moyenne des reconstructions du *Global Carbon Project* (Le Quéré et al., 2015) (flèche vers le bas). (g) montre les résultats du test statistique de cohérence entre la tendance donnée par les reconstructions et celles simulées par les modèles du système Terre en présence uniquement de l'effet radiatif du CO_2 (rouge) ou uniquement l'effet géochimique du CO_2 (vert) ou la combinaison des deux effets (bleu).

SST ou la couche de mélange océanique voire le stock de chaleur dans l'océan qui permettront de préciser le rôle du couplage de ces flux avec la physique océanique.

3.3.2 Détection & attribution de l'évolution récente de l'indice foliaire de l'hémisphère Nord

Sur les surfaces continentales, les variations d'indice foliaire sont observées par mesure spatiale depuis les années 1980. Il s'agit d'une mesure bien plus contrainte que les flux de carbone car l'indice foliaire (ou *Leaf Area Index*, LAI, en anglais) peut se mesurer directement au sol et constitue une co-variable importante des mesures de radiance satellite (couleur de la végétation, réflectance des sols etc...). En ce sens, les séries chronologiques de LAI observé depuis l'espace constitue une donnée fiable pour tracer l'évolution du puits de carbone lié à la végétation terrestre au même titre que les produits d'observations tels que MTE (Jung et al., 2011) ou FluxCom (Tramontana et al., 2016).

L'étude que nous avons réalisée avec Jiafu Mao de l'Université de Princeton porte justement sur l'analyse de ces tendances grâce aux techniques de détection et attribution. Dans Mao et al. (2016), nous montrons en particulier que le verdissement de l'hémisphère Nord est imputable au forçage anthropique puisque le forçage naturel seul ne permet pas de reproduire cette tendance (Figure 3.5).

L'utilisation de simulations permettant d'isoler l'effet radiatif du CO₂ de l'effet géochimique du CO₂ (fertilisation) nous a permis de montrer que les deux effets jouent sur les tendances de LAI de l'hémisphère Nord. Cela suggère qu'il est aujourd'hui impossible de réellement isoler l'effet fertilisant du CO₂ de l'effet du climat sur le puits de carbone de la végétation terrestre aux moyennes et hautes latitudes.

Nos conclusions tendent à invalider l'étude de Wenzel et al. (2016), également publiée en octobre 2016, qui assume que seule la croissance du CO₂ atmosphérique est responsable du renforcement de puits de carbone de la végétation de l'hémisphère Nord. Il serait intéressant de tester la robustesse de cette hypothèse en introduisant un modèle linéaire bivarié CO₂-température plutôt qu'un modèle linéaire dépendant seulement du CO₂.

3.4 Rôle du cycle du carbone dans les projections futures

Dans les parties précédentes nous avons parlé des interactions entre le climat et le cycle du carbone sur des échelles de temps décennales. Dans cette dernière section, j'aborde mes travaux en lien avec l'analyse des rétroactions climat-cycle du carbone sur les échelles de temps centennales.

Les travaux fondateurs de Hansen et al. (1983) ont suggéré que le cycle du carbone peut être vu comme un facteur de gain pouvant réduire ou amplifier le changement climatique.

En 2003, un formalisme mathématique portant le nom d'analyse linéaire des boucles de rétroaction climat-cycle du carbone fut proposé par Friedlingstein et al. (2003). Ce formalisme permet de quantifier le gain climatique induit par le couplage entre le climat et le cycle du carbone global à partir des différents effets directs et indirects associés à l'augmentation de la pCO₂ atmosphérique.

Dans ce formalisme, on distingue :

l'effet α qui est appelé la sensibilité climatique. Il représente l'effet direct du CO₂ atmosphérique sur la température de surface en moyenne globale exprimé en °C.ppm⁻¹. Son

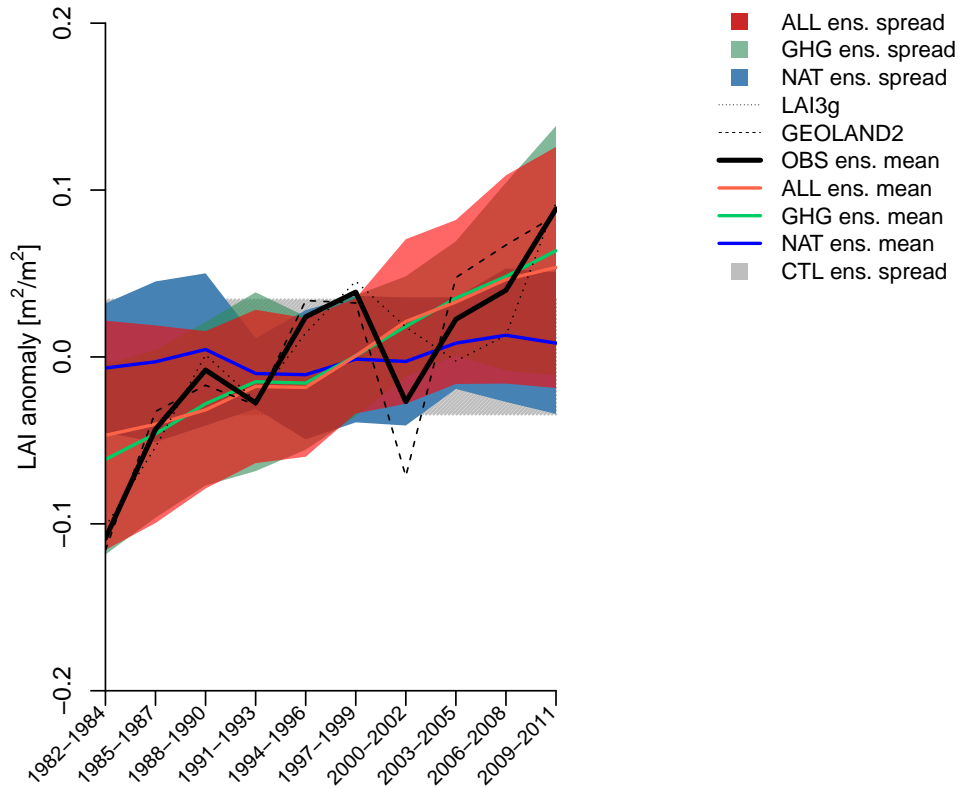


FIGURE 3.5 – Évolution des anomalies d'indice foliaire (LAI) des années 1982 à 2011 en moyenne sur l'hémisphère Nord. Les anomalies de LAI sont calculées sur les mois de croissance (avril à août) de chaque année puis moyenné sur 2 années consécutives. Les simulations de modèles du système Terre sont présentées en aplat de couleur tandis que les observations sont données par des traits noirs épais. Cette Figure est issue de l'étude de Mao et al. (2016).

expression mathématique suppose l'existence d'une relation linéaire entre la pCO_2 atmosphérique et la température de surface en moyenne globale (T) :

$$\Delta T = \alpha \times \Delta pCO_2 \quad (3.1)$$

l'effet β qui est appelé la réponse géochimique. Il s'interprète comme l'effet direct du CO_2 atmosphérique sur les flux de carbone terrestres et océaniques. Il s'exprime en $Pg\ C.ppm^{-1}$. Son expression mathématique suppose l'existence d'une relation linéaire entre la pCO_2 atmosphérique et le cumul temporel des flux de CO_2 pilotés seulement par les changements de CO_2 (ΔC^{CO_2}) :

$$\Delta C^{CO_2} = \beta \times \Delta pCO_2 \quad (3.2)$$

l'effet γ qui est appelé la réponse (ou la rétroaction) climatique. Cette métrique, exprimée en $\text{Pg C} \cdot \text{C}^{-1}$, représente l'effet indirect de l'augmentation de température de surface en moyenne globale sur les flux de carbone continentaux et océaniques.

Son expression mathématique suppose l'existence d'une relation linéaire entre le cumul temporel des flux de CO_2 pilotés seulement par les changements du climat (ΔC^{Clim}) et la température de surface en moyenne globale.

$$\Delta C^{Clim} = \gamma \times \Delta T \quad (3.3)$$

Il est en effet possible de déterminer l'impact du changement climatique sur les flux de carbone (ΔC^{Clim}) de deux manières différentes :

- soit par la différence entre une simulation dans laquelle CO_2 et climat évolue par rapport à une simulation dans laquelle seul le CO_2 augmente
- soit grâce à une simulation où seul le climat évolue

Cependant, comme le signale Ciais et al. (2013), les 2 approches n'aboutissent pas à la même valeur de (γ). Cette différence s'explique de manière générale par l'existence d'une non-linéarité du cycle du carbone.

Ainsi, l'expression du gain climatique (g) est donnée par :

$$g = -\alpha \frac{\gamma}{1 + \beta} \quad (3.4)$$

Au sein du projet d'intercomparaison de modèles couplés climat-cycle du carbone (C4MIP), Friedlingstein et al. (2006) ont démontré que ces différents effets et boucles de rétroactions conduisent à un gain climatique compris entre 2 et 30% et donc à une amplification du réchauffement global de l'ordre 0.1–1.5°C au bout d'une centaine d'années.

3.4.1 Rétroaction climat-cycle du carbone et non-linéarité

Dans cette partie, je présente un travail réalisé en collaboration avec Jörg Schwinger (Université de Bergen) pour évaluer les non-linéarités des impacts du changement climatique sur les flux de carbone et donc sur la détermination des paramètres de rétroaction climatique (Schwinger et al., 2014). Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet Européen COMBINE avec une version préliminaire du modèle du système Terre du CNRM, dans lequel seul le cycle du carbone océanique avait été activé.

Ce travail a permis de réaliser une première estimation des paramètres de rétroaction climat-cycle du carbone océanique avec le modèle du CNRM. La réponse de ce dernier à l'augmentation du CO_2 de l'ordre de $0.702 \text{ PgC ppm}^{-1}$, ce qui est légèrement plus faible que celle simulée par le modèle de l'IPSL ($0.898 \text{ PgC ppm}^{-1}$) qui dispose pourtant du même modèle de biogéochimie marine PISCES. Cette étude met ainsi l'accent sur l'effet du changement climatique sur les flux de carbone océanique, c'est-à-dire sur la rétroaction climat-cycle du carbone. Pour cette dernière, nous avons montré que le modèle du CNRM disposait de la plus forte non-linéarité par rapport aux autres modèles de l'étude. En effet, l'estimation du paramètre de rétroaction γ faite à partir des deux approches évoquées plus haut diffère d'un ordre de grandeur pour le modèle du CNRM. γ vaut -15.9 PgC K^{-1} si on estime ce paramètre à partir de la différence entre une simulation dans laquelle le CO_2 et le climat évoluent (COU sur la Figure 3.6) par rapport à une simulation dans laquelle seul le CO_2 augmente (BGC sur la Figure 3.6). Par contre, l'estimation de γ basée sur une simulation dans laquelle seul le climat évolue (RAD) est de l'ordre de -1.9 PgC K^{-1} .

Même si cette non-linéarité est extrêmement forte pour le modèle du CNRM, nous avons pu montrer qu'il s'agit d'un comportement robuste à travers un ensemble de 7 modèles du système Terre.

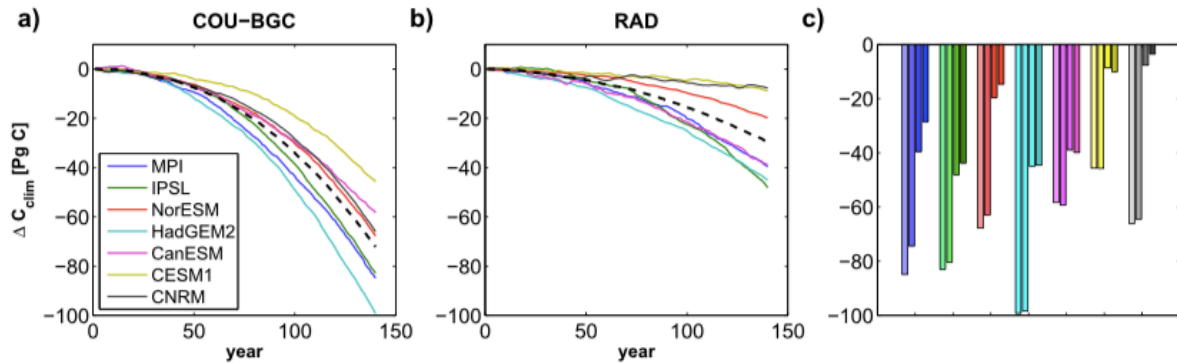


FIGURE 3.6 – Évolution temporelle de l'impact du changement climatique sur les flux de CO_2 cumulés pour différents modèles du système Terre à travers 2 approches. La première approche (a) vise à calculer l'impact du climat par la différence entre la simulation COU moins BGC tandis que la seconde approche (b) utilise uniquement la simulation RAD. Le panneau (c) représente la quantité de carbone absorbé par l'océan et le stock de carbone inorganique stocké à la fin de la simulation pour chaque modèle. La première et la troisième barre permettent d'évaluer la différence d'absorption entre l'approche COU-BGC et RAD; la seconde et quatrième barre permettent de faire de même pour le stock de carbone inorganique stocké dans les simulations COU-BGC et RAD.

Nous avons donc proposé un cadre de travail pour comprendre les causes de cette non-linéarité qui nous a permis de montrer le rôle de la circulation océanique de grande échelle, de la convection profonde océanique ainsi que de l'évolution du stock total de carbone inorganique dissous dans l'océan. La convolution de ces trois facteurs n'évolue pas de la même façon dans une situation où seul le CO_2 atmosphérique évolue (BGC) ou bien dans une situation où seul le climat se réchauffe (RAD). Ce qui suggère que la rétroaction entre le climat et le cycle du carbone océanique ne peut pas être décomposé à partir de la réponse du cycle du carbone naturel (préindustriel) au changement climatique et d'une réponse du cycle du carbone océanique à l'accroissement du CO_2 dans l'atmosphère.

Dans le cas du modèle du CNRM, ce comportement est exacerbé par rapport aux autres modèles de l'étude en raison des changements importants de couverture de glace de mer dans l'océan Austral causés par le réchauffement global.

3.4.2 Rétroaction climat-cycle du carbone et variabilité interne

Dans cette dernière partie, je présente des résultats nouveaux obtenus avec CNRM-ESM2-1 dans le cadre de CMIP6. Afin de mieux contraindre la sensibilité climatique et les rétroactions climat-cycle du carbone, nous avons réalisé des ensembles de simulations idéalisées dans lesquelles seul le CO_2 atmosphérique augmente de 1% par an depuis son niveau préindustriel jusqu'à son quadruplement. Comme dans la partie précédente, nous avons isolé l'effet géochimique en réalisant des paires de simulations pour lesquelles l'augmentation du CO_2 n'"est vue" que par le cycle du carbone.

Cet ensemble de simulations permet d'étudier les rétroactions climat-cycle du carbone de manière plus fine en tenant compte de la variabilité interne du climat et du cycle du carbone.

En effet, en utilisant le concept de temps d'émergence introduit par Hawkins and Sutton (2012),

il est possible de projeter l'impact du CO_2 et du climat sur les flux de carbone continentaux et océaniques en fonction du temps et d'estimer le temps à partir duquel la rétroaction climat-carbone se distingue de l'effet géochimique piloté par l'augmentation du CO_2 . Les estimations basées sur les résultats de CNRM-ESM2-1 suggère qu'il faut attendre entre 100 ans et 120 ans pour que l'effet de la rétroaction climatique se distingue de l'effet géochimique avec un seuil de confiance de 90% et 99% (Figure 3.7). Cette gamme temporelle est robuste à travers les composantes continentales et océaniques du cycle du carbone simulées dans CNRM-ESM2-1.

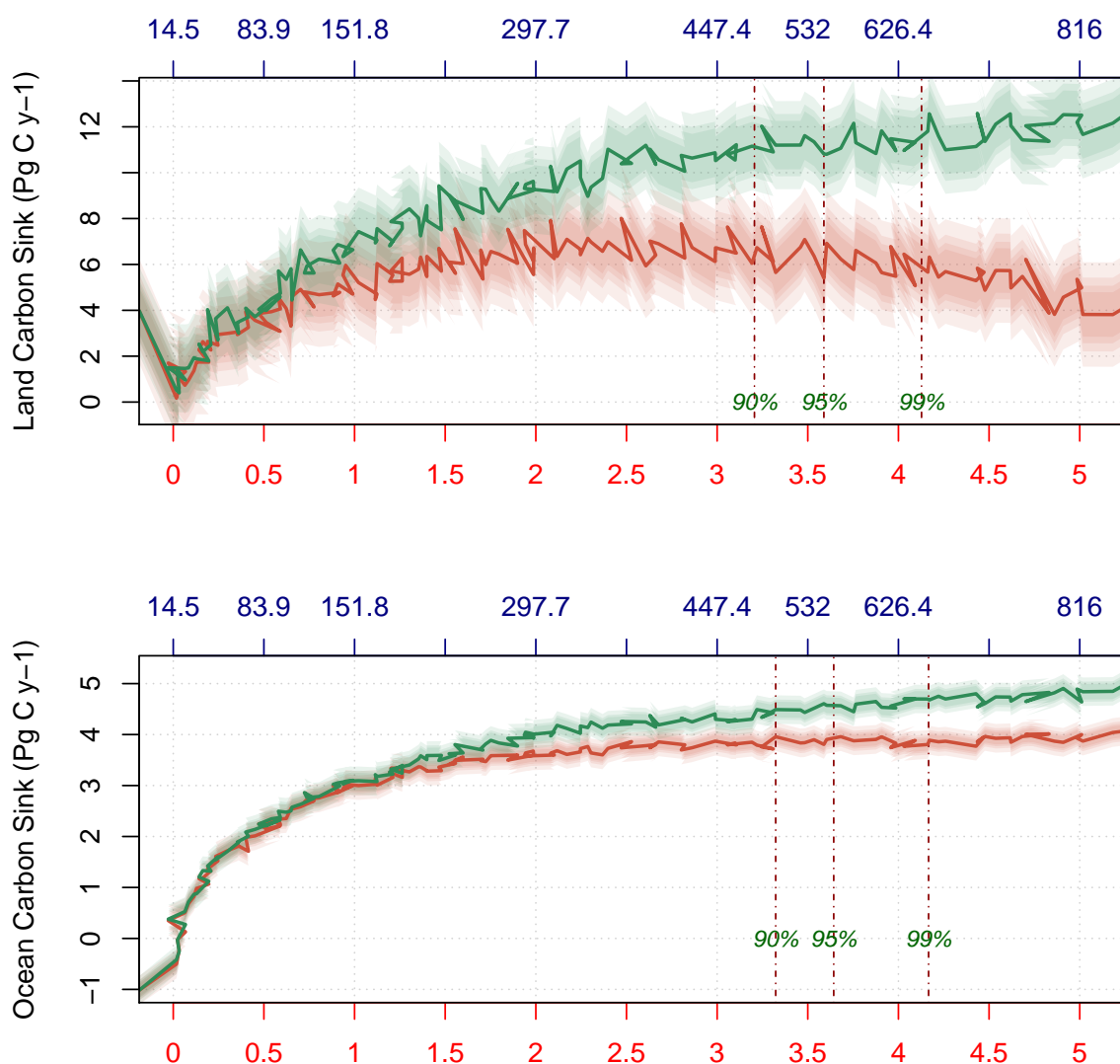


FIGURE 3.7 – Évolution des puits de carbone continentaux (a) et océaniques (b) simulée par CNRM-ESM2-1 en réponse à l'augmentation du CO_2 atmosphérique. La courbe rouge montre l'évolution des puits de carbone lorsque l'on tient compte de la réponse climatique et de la réponse géochimique ; la courbe verte représente seulement l'effet géochimique. Les aplats de couleur représentent les niveaux de confiance autour de la moyenne à 90%, 95% et 99% estimés à partir de 4 paires de membres de simulations. Les lignes tiretées verticales indiquent les seuils à partir desquels la rétroaction climatique se distingue de l'effet géochimique pour des niveaux de confiance de 90%, 95% et 99%.

La convolution entre le cadre d'analyse de Ed Hawkins et le cadre d'analyse classique des rétroaction climat-cycle du carbone permet d'étudier les niveaux de détection en fonction du CO_2 et du réchauffement global. Dans ce cadre, la Figure 3.7 suggère qu'il faut atteindre des niveaux de réchauffement supérieur à $3\text{ }^\circ\text{C}$ par rapport au niveau préindustriel pour

pouvoir distinguer l'effet de la rétroaction climat-cycle du carbone de l'effet géochimique de l'augmentation du CO₂ atmosphérique avec un niveau de confiance supérieur à 90%.

Ce résultat suggère qu'il est peu probable que l'impact du changement climatique sur les puits de carbone continentaux et océaniques soit détectable aujourd'hui avec un niveau de réchauffement global de l'ordre de 1 °C . De la même manière ces résultats suggèrent qu'il est peu probable que cette rétroaction vienne amputer les budgets carbonés compatibles avec des niveaux de réchauffement inférieurs à 3 °C .

Cycle du carbone à l'interface avec les impacts

Sommaire

4.1	Introduction	38
4.2	Étude des facteurs de stress des écosystèmes marins	40
4.2.1	Projections des facteurs de stress des écosystèmes marins	40
4.2.2	Mise en évidence de mécanismes compensatoires entre les facteurs de stress	41
4.3	Temps d'émergence des facteurs de stress	41
4.4	Incertitudes dans le projections des facteurs de stress des écosystèmes marins	44
4.4.1	Bref rappel — pourquoi contraindre les projections futures de la productivité primaire?	47
4.4.2	Contrainte observationnelle sur l'évolution future de la productivité primaire	48

4.1 Introduction

Parce que le carbone est le premier élément chimique constitutif du monde vivant, l'étude du cycle du carbone permet d'appréhender beaucoup de questions en lien avec les impacts du changement climatique sur les écosystèmes naturels. Sur cette problématique, Le 5ème rapport du GIEC du groupe 2¹ (IPCC, 2014b) et le rapport spécial sur 1,5°C de réchauffement (Hoegh-Guldberg et al., 2018) font état de changements importants sur les systèmes physiques et sur les écosystèmes naturels. Ces derniers peuvent avoir des conséquences notables sur les sociétés humaines : réduction de la disponibilité en eau, aléas climatiques et insécurité alimentaire (Figure 4.1). Même si les simulations de modèle suggèrent que ces impacts pourraient être détectables d'ici une cinquantaine d'années aux moyennes latitudes, ils affectent déjà pour certains les populations les plus fragiles de pays tropicaux en voie de développement.

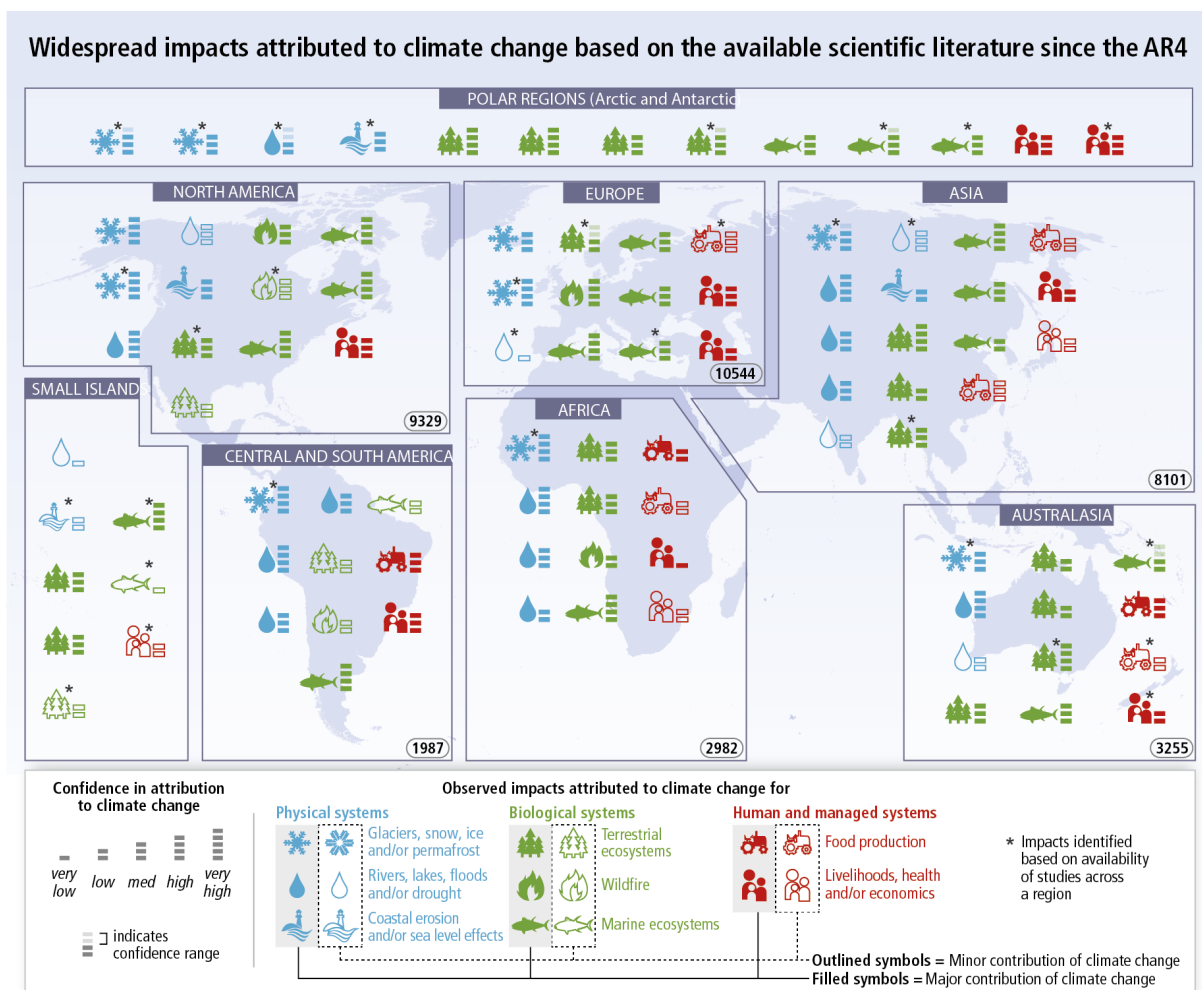


FIGURE 4.1 – Compilation des connaissances (localisation, type et amplitude) sur les impacts du changement climatique depuis 2007. Cette Figure est issue de IPCC (2014b).

L'idée de ce chapitre n'est pas de regarder les impacts du changement climatique sur les sociétés humaines avec une expertise aussi fine et vaste que celle du groupe 2 du GIEC mais de regarder

1. groupe de scientifiques et d'experts travaillant sur les impacts du changement climatiques et les mesures d'adaptation

ce qu'il est possible d'appréhender grâce à l'outil de modélisation. En effet, les modèles du système Terre offrent une palette d'impacts du changement climatique qui n'étaient pas simulés par les modèles de climat de génération précédente. De nombreux travaux visent d'ailleurs à représenter de manière plus fine les impacts du changement climatique sur les écosystèmes naturels en couplant des modèles du système Terre avec des modèles d'écosystèmes ou de chaîne trophique (e.g., Cheung et al., 2012; Lefort et al., 2015; Le Mézo et al., 2016).

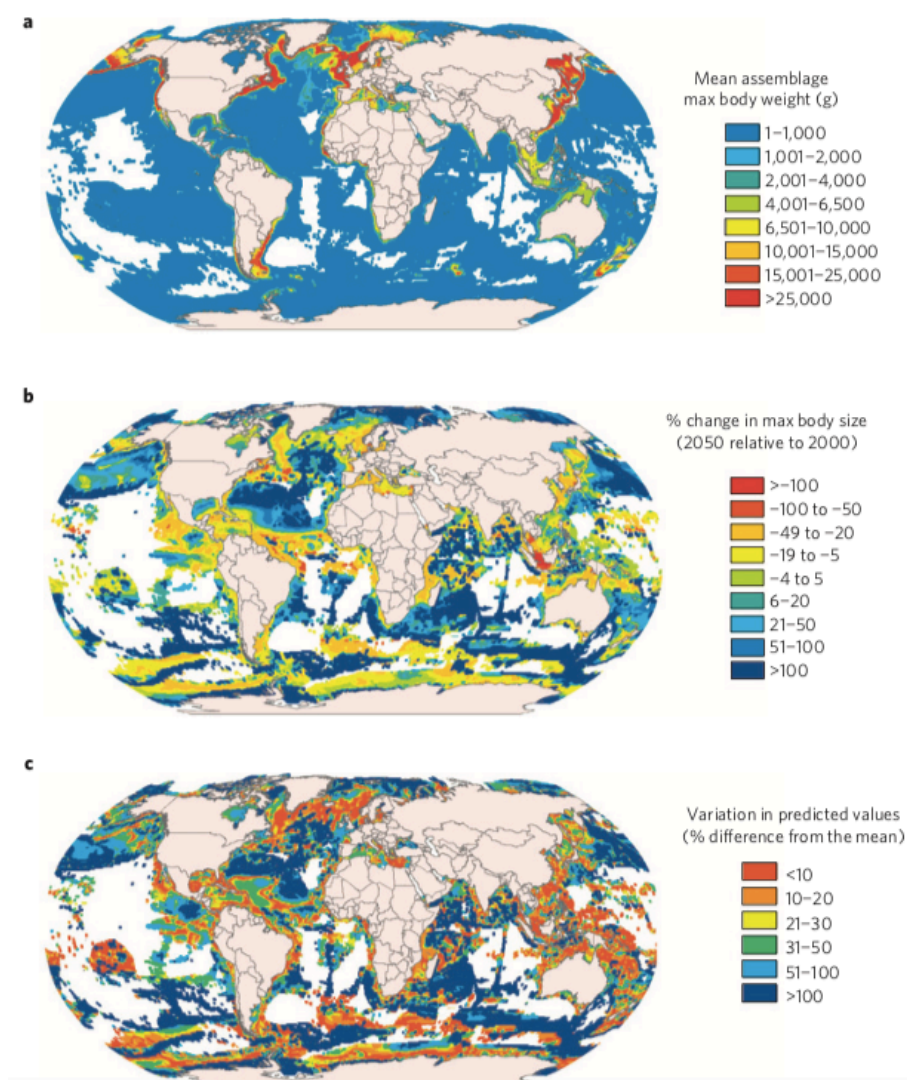


FIGURE 4.2 – Simulation du poids maximal moyen de l'écosystème marin simulé par Dynamic Bioclimate Envelope Model. Le panneau (a) représente le poids maximal moyen de l'écosystème marin en moyenne sur la période historique 1991-2010. Le panneau (b) représente les changements de poids maximal moyen de l'écosystème marin sur la période 2041-2060 par rapport à 1991-2010 suivant le scénario SRES-A2. Enfin le panneau (c) représente les incertitudes liées aux variables de contrôle dynamique et biogéochimique provenant de deux modèles du système Terre IPSL-CM4-LOOP et GFDL-ESM2.1. Figure issue de Cheung et al. (2012).

Depuis mon travail de thèse, mes contributions en lien avec les impacts du changement climatique sur les écosystèmes naturels ont majoritairement été liées à la composante océanique. Sur ce sujet la littérature scientifique montre que bon nombre de changements des systèmes physiques peuvent avoir un impact important sur les écosystèmes marins (Doney et al., 2012; Bopp et al.,

2013b). Les modèles du système Terre suggèrent que ces changements pourraient impacter toute la chaîne trophique de l'océan à cause d'une raréfaction de la nourriture (production primaire du plancton) et une hausse des températures océaniques. Les modèles d'écosystèmes suggèrent quant à eux un déplacement de l'équilibre de l'écosystème favorisant le développement des petites espèces au détriment des grandes (Figure 4.2).

Dans cette partie je soulignerai en particulier le traitement des incertitudes qui représente une limitation forte sur les analyses d'impact du changement climatique sur les écosystèmes naturels. Je présenterai donc comment l'utilisation de relations statistiques observées peuvent nous aider à réduire ces incertitudes et donc à améliorer la fiabilité des études d'impacts.

4.2 Étude des facteurs de stress des écosystèmes marins

Depuis quelques décennies, on observe de nombreux changements environnementaux dans l'océan qui peuvent causer des impacts délétères sur les écosystèmes marins. Les mécanismes mis en jeu dans ces impacts en cascade du climat jusqu'aux écosystèmes marins permettent d'isoler quelques variables climatiques clés. Ces dernières portent le nom de facteur de stress des écosystèmes (ou *stressors* en anglais) dans la littérature scientifique. La Figure 4.3 issue de l'étude de (Doney et al., 2012) permet de montrer leur évolution au cours du temps, qu'il s'agisse d'une diminution de la couverture de glace ou une augmentation des températures océaniques de surface. Tous ces facteurs de stress agissent de manière plus ou moins directe sur la santé, la dynamique et la résilience des écosystèmes.

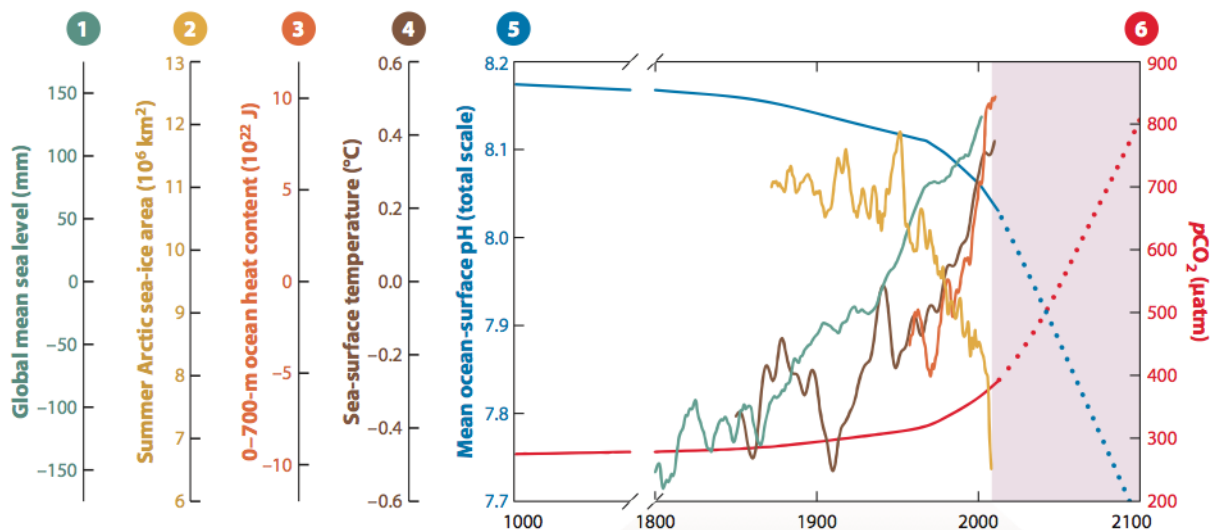


FIGURE 4.3 – Évolution temporelle de 1800 à aujourd'hui (2010) de différents marqueurs de l'impact du changement climatique sur l'océan. Certains de ces marqueurs représentent des facteurs de stress pour les écosystèmes marins. Cette Figure est issue de l'étude de Doney et al. (2012).

4.2.1 Projections des facteurs de stress des écosystèmes marins

Dans l'étude de Bopp et al. (2013b), nous avons évalué l'évolution de ces facteurs de stress telle que simulée par les modèles du système Terre de 1850 à 2100. Nous avons porté une attention particulière à l'amplitude des changements mais également aux incertitudes de modélisation.

La Figure 4.4 met en évidence que les variations de ces facteurs de stress peuvent être globalement très différentes d'ici 2100. Cette figure montre très clairement que le scénario d'émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols le plus pessimiste (rcp8.5) donne les variations les plus importantes de ces facteurs de stress, laissant présager des impacts importants sur les écosystèmes marins. Par contre, il est également notable que l'amplitude des changements et des incertitudes de modélisation associées diffèrent beaucoup d'un facteur de stress à un autre. En effet, si l'ampleur de l'acidification des océans (diminution de pH) reste assez bien contrainte par les modèles du système Terre, l'ampleur des changements pour les autres facteurs de stress, en particulier, pour la diminution de la production primaire reste très incertaine dans la mesure où les projections futures se confondent les unes avec les autres.

Comme le suggère (Frölicher et al., 2016), de telles incertitudes peuvent avoir des conséquences importantes lorsqu'on utilise les résultats de projections climatiques pour forcer des modèles d'écosystèmes. Il est donc important de contraindre ces projections soit en améliorant la composante biogéochimique des modèles du système Terre, soit en excluant les modèles les moins fiables sur la période observée, soit en utilisant des méthodes de contraintes émergentes basées sur l'utilisation des observations récentes. Dans ce chapitre, je présenterai comment cette dernière approche permet de mieux quantifier à quel point la production primaire du phytoplancton est susceptible de diminuer dans le futur.

4.2.2 Mise en évidence de mécanismes compensatoires entre les facteurs de stress

Ici, je veux également illustrer qu'il est difficile d'isoler l'impact d'un facteur de stress dans le contexte du changement climatique sur les écosystèmes marins, notamment quand on parle d'acidification des océans. En effet, dans certains cas, les facteurs de stress peuvent agir dans des directions opposées. C'est par exemple ce que nous avons montré dans l'étude de Gehlen et al. (2014). Dans cette étude, nous avons regardé à l'aide de simulation de modèles du système Terre comment les écosystèmes profonds (souvent endémiques) pouvaient être impactés par l'acidification de l'océan.

L'utilisation de modèles numériques permet d'isoler l'effet de l'acidification causée par la hausse de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère sur la chimie de l'eau du signal du réchauffement global— stratifiant la colonne d'eau de l'océan. La combinaison de ces deux effets pour le scénario rcp45 est présenté sur la Figure 4.5a. La Figure 4.5b isole seulement l'effet « chimique » du CO_2 sur l'acidification de l'océan pour ce même scénario. La différence des deux effets sur la Figure 4.5c montre que l'effet du réchauffement global réduisant la ventilation des eaux profondes permet de limiter l'acidification des eaux profondes et donc de limiter l'impact de l'acidification de l'océan sur les écosystèmes profonds. Cela veut dire qu'il est important d'étudier l'interaction entre les facteurs de stress car leur combinaison peut conduire à des impacts plus importants mais peut également s'atténuer via des mécanismes compensatoires.

4.3 Temps d'émergence des facteurs de stress

Dans l'optique d'appréhender au mieux les impacts du changement climatique sur les écosystèmes marins, il est important de garder à l'esprit les limitations des modèles du système Terre que nous utilisons. Comme signalé dans le Chapitre 2, ces modèles ne disposent que

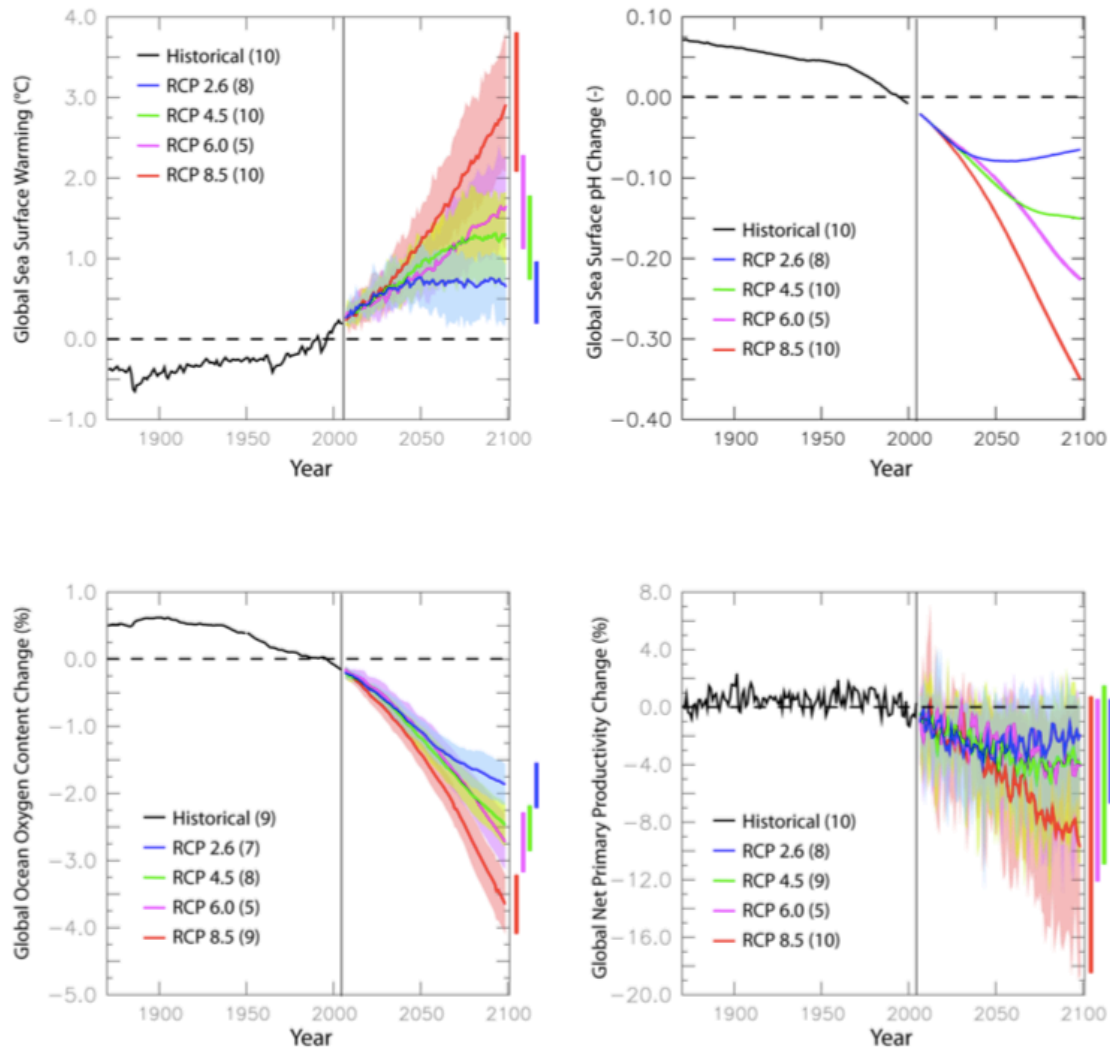


FIGURE 4.4 – Évolution temporelle de 1850 à 2100 de certains facteurs de stress des écosystèmes marins simulés par les modèles du système Terre du projet CMIP5. Le panneau en haut à gauche montre la température de surface de l'océan en moyenne globale ; le panneau en haut à gauche montre le pH des eaux de surface en moyenne globale ; les panneaux en bas à gauche et à droite représentent les changements relatifs en % par rapport aux années 1990-1999. Cette Figure est issue de l'étude de (Bopp et al., 2013b).

d'une version simplifiée voire stylisée du vivant, représentant en premier lieu les échanges de matière entre réservoirs. Ces derniers ne représentent donc pas les mécanismes d'adaptation ou d'évolution qui pourraient se manifester dans des situations de stress environnemental.

La cinétique des facteurs de stress des écosystèmes marins et de leur combinaison dans le temps permet de déterminer la vitesse à laquelle certains écosystèmes ou métapopulations vont vivre des changements environnementaux. Ce type d'information est critique pour évaluer non seulement la vulnérabilité de certains écosystèmes au changement climatique et aux perturbations environnementales mais aussi le temps maximal disponible pour déployer des mesures d'adaptation.

Avec Stéphanie Henson et d'autres chercheurs, nous avons conduit la première étude du genre permettant de quantifier le moment à partir duquel les changements environnementaux futurs deviennent plus importants que les variations saisonnières. Ces dernières représentent les

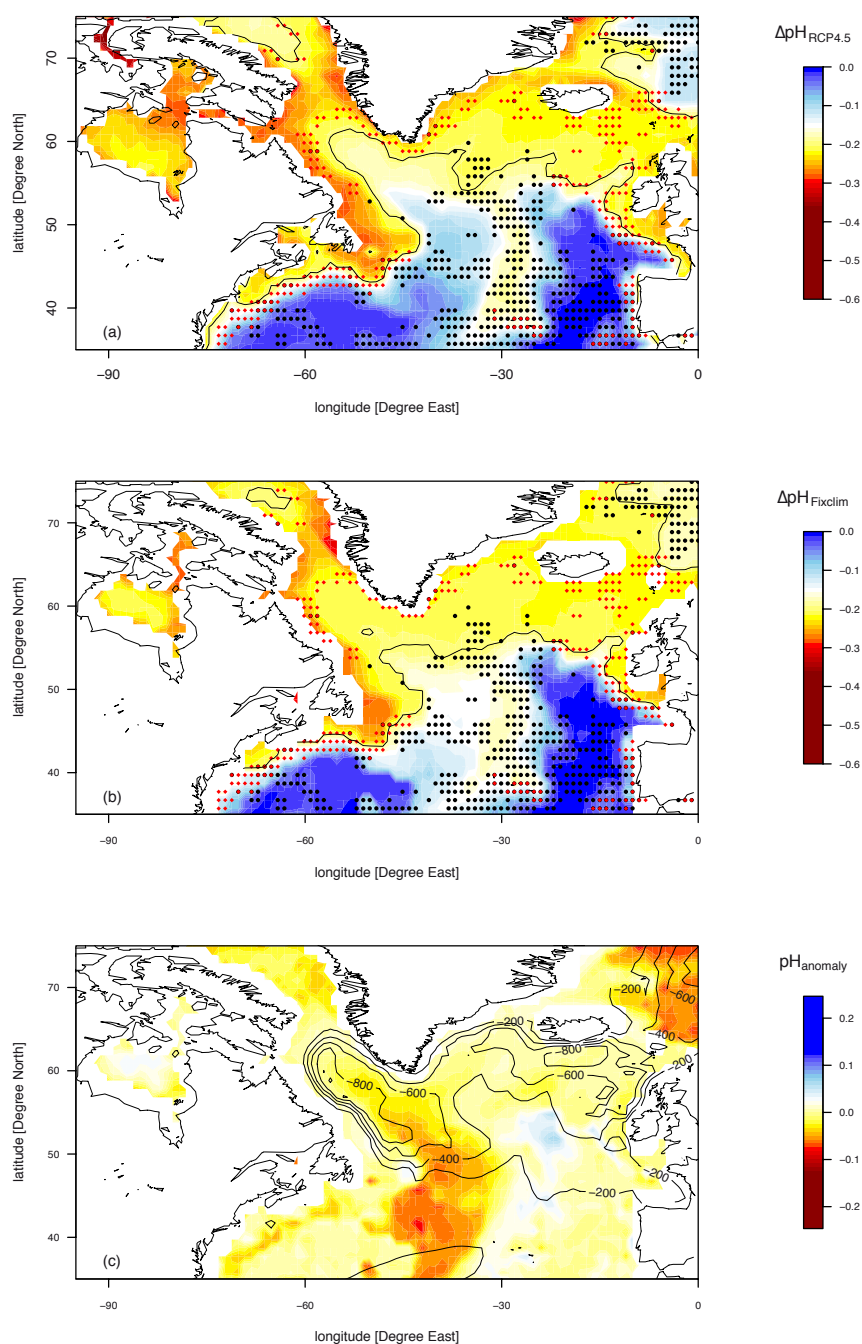


FIGURE 4.5 – Décomposition factorielle de l'impact moyen du changement climatique sur les écosystèmes profonds tel que projeté sur les années 2091-2100 par 12 modèles du système Terre dans le scénario rcp4.5. Le panneau (a) montre les changements de pH sur l'Atlantique Nord dans les régions où sont situés les monts (ronds noirs) et canyons (losanges rouges) sous-marins dans le scénario rcp4.5. Le panneau (b) montre uniquement l'effet de l'acidification causé par la hausse de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère sur la chimie de l'eau. Enfin le panneau (c) représente la différence entre (b) et (a). Cette Figure est issue de l'étude de Gehlen et al. (2014).

fluctuations environnementales maximales que les écosystèmes marins ont l'habitude de vivre. Nous avons réalisé ce travail en nous appuyant sur des simulations de modèles du système Terre disponibles en nous focalisant sur les facteurs de stress mis en avant dans (Bopp et al., 2013b)

et en utilisant une méthode statistique appelée « temps d'émergence » (*Time of Emergence* en anglais). Cette méthode a été développée par Ed Hawkins et Rowan Sutton en 2012. Elle a principalement été appliquée à des variables climatiques physiques depuis la parution de (Hawkins and Sutton, 2012).

La Figure 4.6 montre le moment à partir duquel le signal du changement climatique dépasse l'extrema saisonnier pour un facteur de stress donné. Le nombre d'années séparant le démarrage du changement climatique et le temps à partir duquel un facteur de stress se manifeste varie énormément régionalement mais aussi entre les facteurs de stress eux-mêmes. Ainsi, notre étude montre que des facteurs de stress tels que la hausse de température de surface, l'acidification, et la désoxygénation peuvent se manifester d'ici une vingtaine d'années dans certaines régions océaniques comme les tropiques ou les hautes latitudes. Notre analyse montre que le devenir de la productivité primaire reste très incertain. Ce résultats n'est pas surprenant dans la mesure où notre étude a été menée à partir des mêmes simulations de modèles que (Bopp et al., 2013b) ou (Frölicher et al., 2016), suggérant déjà avant nous que l'évolution de la productivité primaire reste très mal contrainte compte tenu des incertitudes des modèles.

La Figure 4.7 montre comment les facteurs de stress pourraient se combiner dans le futur au niveau régional et sur différents horizons temporels. Il est intéressant de voir dans quelle mesure un scénario dit de mitigation (rcp4.5) permet de légèrement amoindrir les impacts du changement climatique sur les écosystèmes marins par rapport à un scénario dit contrefactuel (rcp8.5). Notre analyse montre que ces différences commencent à apparaître autour des années 2030 et tendent à se renforcer au cours du temps avec un effet très contrasté sur l'apparition des facteurs de stress liés au réchauffement de surface et à l'acidification de l'océan à partir des 2030.

Même si ces résultats restent spéculatifs compte tenu de la qualité des modèles, de leur résolution et des processus représentés, ce travail permet de quantifier de manière idéalisée la cinétique d'apparition des facteurs de stress dans l'océan. Dans ce contexte, nous avons pu montrer que même dans un scénario dit de mitigation, de nombreux facteurs de stress commencent à se manifester dès les années 2030 et tendent à se combiner avec d'autres facteurs au cours du 21ème siècle. Même si nos connaissances restent très limitées sur le potentiel d'adaptation des écosystèmes marins, les premiers travaux semblent suggérer des modifications du spectre de taille des écosystèmes favorisant les petites espèces au détriment des grandes (e.g., Chust et al., 2014; Lefort et al., 2015). Ces dernières disposant d'une plus courte durée de vie semblent être plus à même de s'adapter aux changements environnementaux futurs.

4.4 Incertitudes dans les projections des facteurs de stress des écosystèmes marins

Dans cette dernière section, je souhaite mettre en avant un travail qui aurait pu apparaître dans le Chapitre 1, mais qui a toute sa place ici. Il s'agit de l'étude de Lester Kwiatkowski (IPSL/LOCEAN) portant sur l'utilisation de contraintes émergentes pour réduire les incertitudes des projections futures sur le devenir de la productivité primaire océanique— le facteur de stress le plus incertain à ce jour.

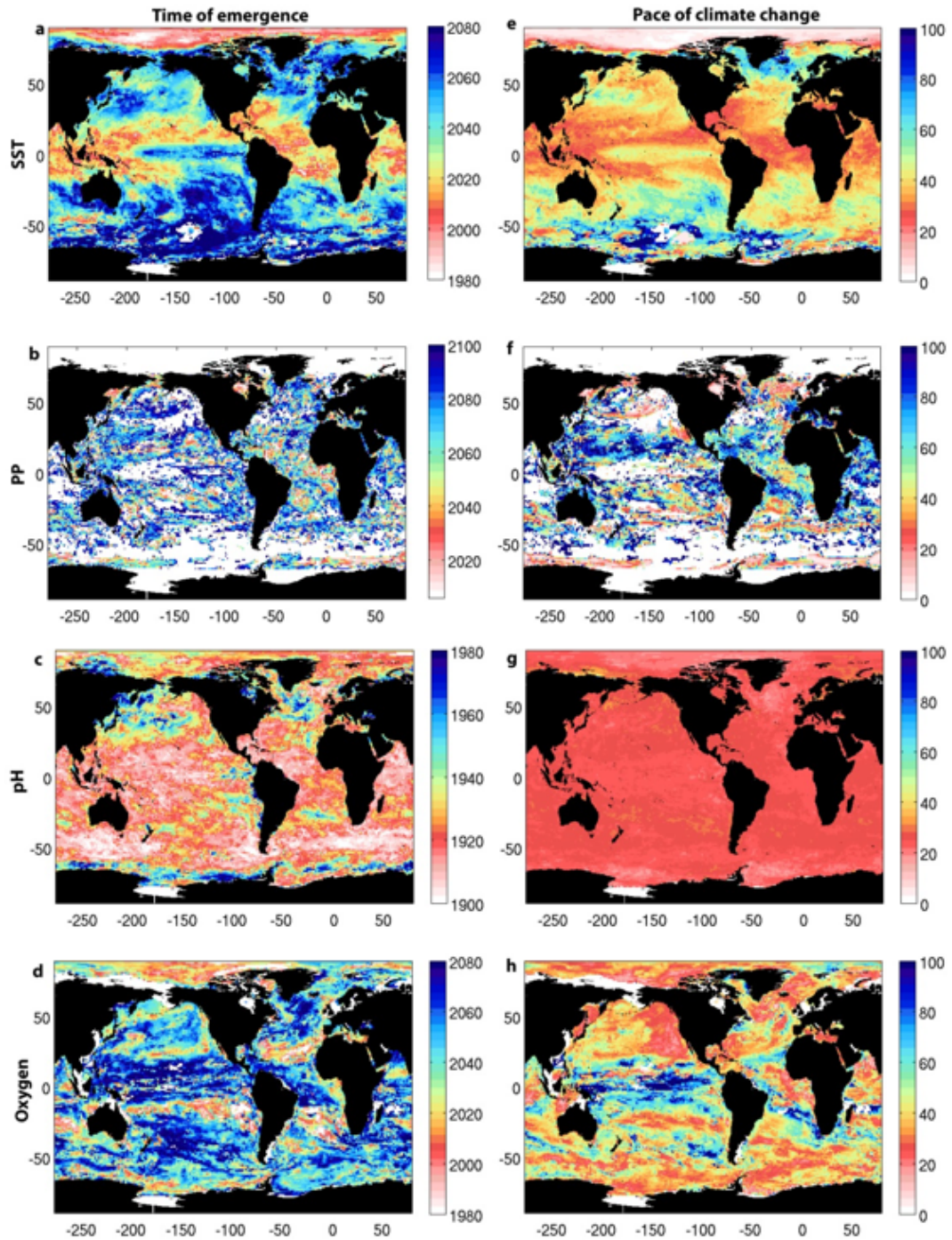


FIGURE 4.6 – Temps d'émergence et cinétique d'apparition des facteurs de stress des écosystèmes marins dans le scénario rcp8.5. Les panneaux (a) à (d) représentent l'année à partir de laquelle le signal du changement climatique sur un facteur de stress dépasse l'amplitude des variations saisonnières moyenne de la période 1986-2005. Les panneaux (e) à (h) présentent la vitesse à laquelle un facteur de stress se manifeste par rapport à la période 1986-2005. Cette Figure est issue de (Henson et al., 2017).

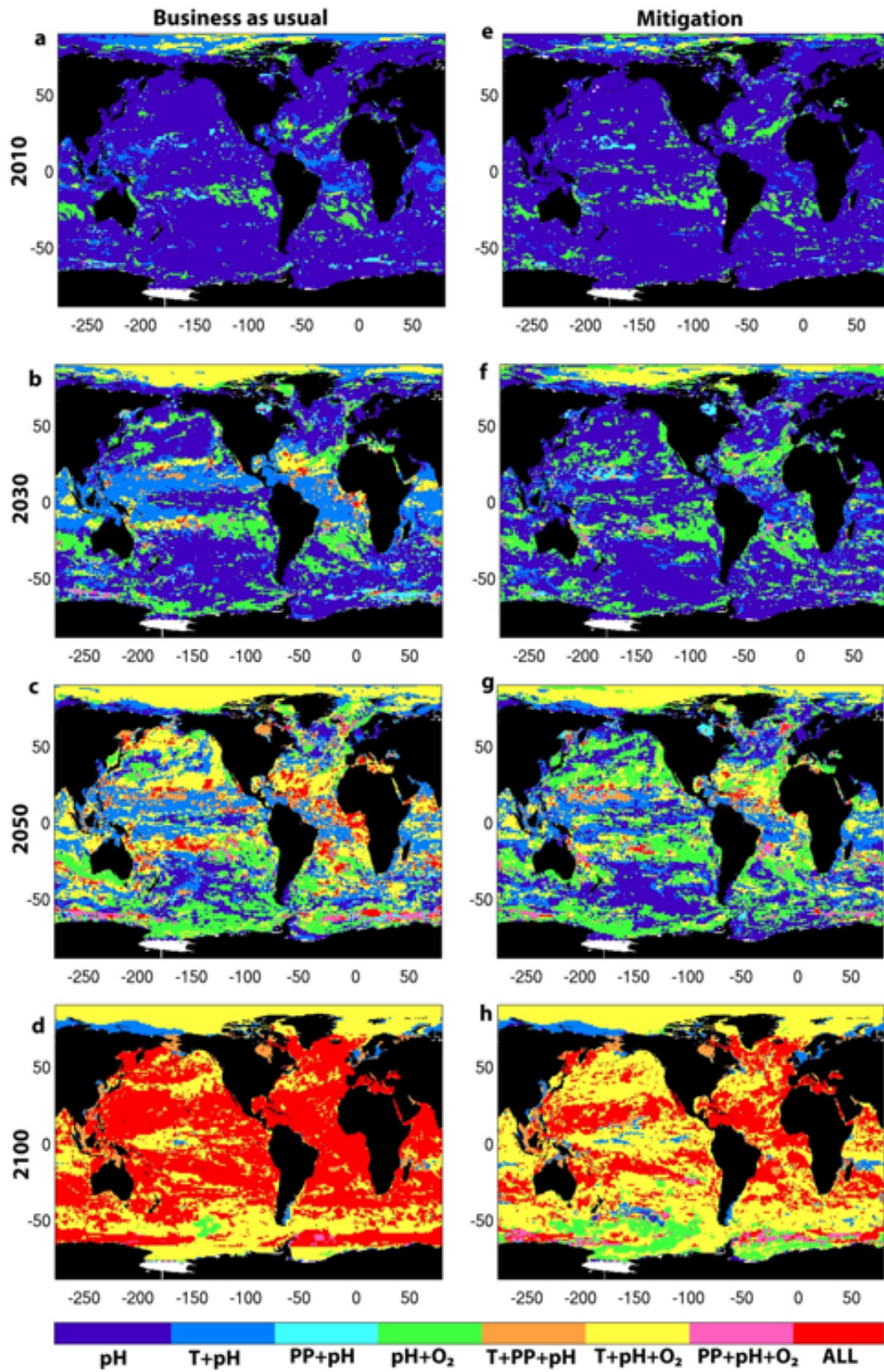


FIGURE 4.7 – Combinaison des facteurs de stress par rapport à leur émergence dans une décennie donnée pour le scénario rep8.5 (à gauche) et rep4.5 (à droite).

4.4.1 Bref rappel — pourquoi contraindre les projections futures de la productivité primaire ?

Comme évoqué précédemment, les résultats de modèles du système Terre sont utilisés pour prédire l'évolution future des facteurs de stress. Or, compte tenu de notre connaissance limitée dans la représentation de certains processus climatiques et biologiques, l'évolution future d'un facteur de stress pour un scénario donné peut être très différente d'un modèle à l'autre.

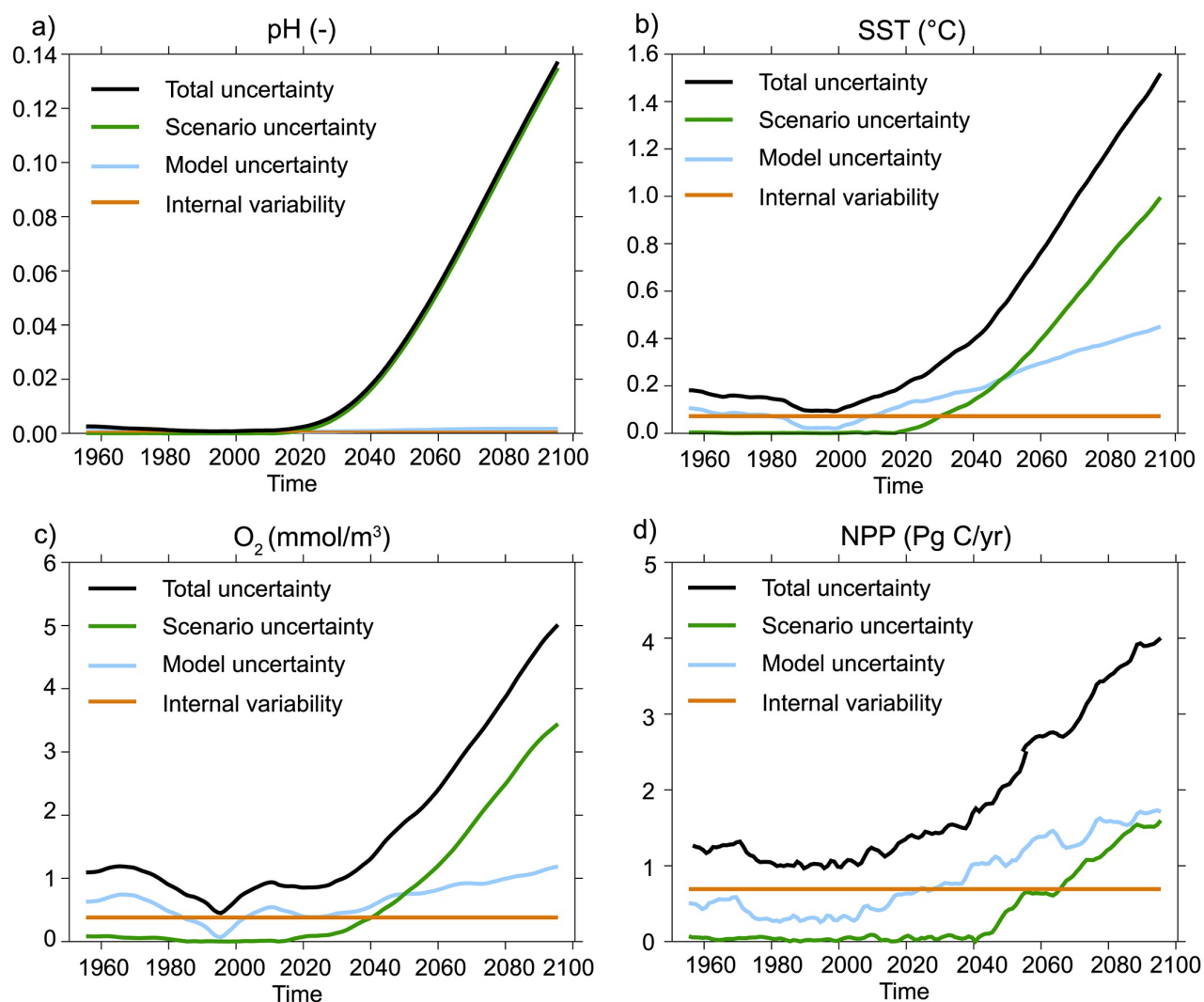


FIGURE 4.8 – Évolution temporelle des différentes sources d'incertitudes de 1960 à 2100 des 4 grands facteurs de stress des écosystèmes marins : l'acidité de l'océan (pH), l'oxygène (O₂), la température de surface (SST) et la productivité primaire (NPP). Les sources d'incertitude sont décomposées en une incertitude liée aux réponses des modèles, une incertitude liée aux trajectoires futures (scénarios) et à la variabilité interne. cette Figure est issue de l'étude de Frölicher et al. (2016).

L'étude de Frölicher et al. (2016) documente très bien ce phénomène. En effet, la Figure 4.8 présente différentes sources d'incertitudes (issues des modèles, des scénarios futurs ou de la variabilité interne) auxquelles nous devons faire face pour prédire les impacts du changement climatique sur les écosystèmes marins.

Ce travail présente deux cas extrêmes : l'acidité de l'océan et la productivité primaire. Pour le cas de l'acidité de l'océan (pH), la Figure 4.8 montre clairement que l'incertitude de modélisation

est très faible par rapport à celle pilotée par les scénarios futurs. Ce résultat s'explique par le fait que la chimie des carbonates est très bien connue et que les modèles de biogéochimie marine utilisent en quasi-totalité la même approche.

Ce n'est pas le cas pour la productivité primaire. Pour cette variable, l'incertitude totale est plutôt dominée par l'incertitude de modélisation. Ce résultat est logique car la pompe biologique reste très mal comprise à ce jour. Elle est sensible à de nombreux processus biologiques incluant la diversité spécifique des espèces de phytoplancton présent dans la masse d'eau. L'incertitude de modélisation reflète ici les choix de paramétrisation de la pompe biologique qui ont été faits par les équipes de recherche développant les modèles du système Terre utilisés dans ce travail.

Les incertitudes des modèles constituent une limitation importante pour toutes les études d'impacts. Compte tenu de ces incertitudes, on peut s'interroger sur la pertinence d'utiliser une moyenne multi-modèle (comme ce que nous avons pu faire avec Stéphanie Henson) pour estimer des changements environnementaux. L'utilisation des méthodes de contraintes émergentes permet d'aller plus loin et d'améliorer la fiabilité des projections futures.

4.4.2 Contrainte observationnelle sur l'évolution future de la productivité primaire

Introduction au concept de contrainte émergente

Le concept de contrainte émergente est relativement simple. Il se découpe en 3 étapes clés :

1. **Identification d'un mécanisme physique ou biogéochimique** : Identifier une relation mécaniste entre 2 variables climatiques qui est observable soit à partir des variations saisonnières ou interannuelle.
Dans notre cas : les variations de la productivité primaire du phytoplancton par rapport aux fluctuations des températures de surface de l'océan.
2. **Identification d'une relation statistique intermodèle "présent-futur"** : Évaluer s'il existe une corrélation forte pour ce même mécanisme permettant d'expliquer le comportement des modèles dans les scénarios futurs par rapport à leur réponse sur la période observée (on parle de propriété ou relation émergente).
3. **Utilisation d'une contrainte observationnelles** : Projeter la réponse observée à partir de cette propriété émergente grâce aux statistiques bayésiennes.
Dans notre cas : les variations observées par satellite les changements de productivité primaire suite aux événements El Niño des années 1997/1998.

À ce jour de nombreuses études ont utilisé cette approche pour des variables climatiques physiques (e.g., Hall and Qu, 2006; Boé et al., 2009; Douville and Plazzotta, 2017) ou en rapport avec le cycle du carbone continental (Cox et al., 2013; Wenzel et al., 2016) mais aucune étude n'avait déployé ce genre d'approche pour des variables océaniques.

Mise en application pour la productivité primaire

À l'aide de cette approche, Kwiatkowski et al. (2017) ont réduit l'incertitude entourant l'impact du changement climatique sur la productivité primaire. Comme le montre la Figure 4.9, cette approche permet de réduire substantiellement la plage d'incertitude. Elle se situe entre -7 et -1

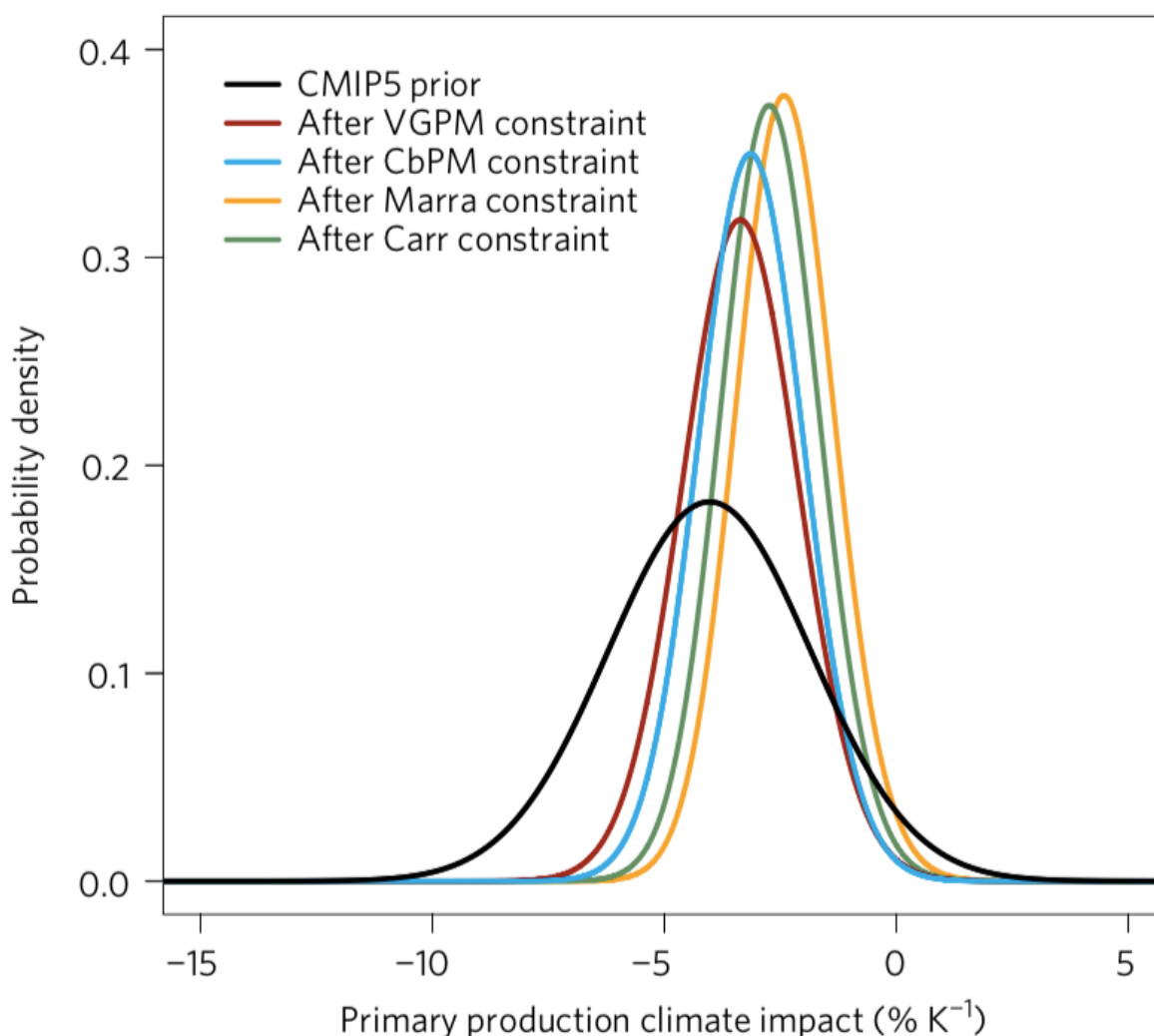


FIGURE 4.9 – Densité de probabilité de l'impact du changement climatique (ici, hausse de la température de surface de l'océan) sur la productivité primaire du phytoplancton. L'estimation non contrainte issue des simulations de modèles du système Terre est représentée en noir tandis que celles contraintes par différentes observations sont données en couleur. Cette Figure est issue de l'étude de Kwiatkowski et al. (2017).

% par °C selon les estimations non contraintes des modèles alors que l'estimation contrainte par les observations serait d'environ -3 ± 1 % par °C de réchauffement.

Cette étude suggère donc que la réponse non-contrainte des modèles tend à sur-estimer l'impact du changement climatique sur la productivité primaire.

Malgré son efficacité, ce genre d'approche reste très sensible à l'échantillon de modèle utilisé pour déduire la propriété émergente. Il en est de même pour la fiabilité des modèles qui peuvent tous être biaisés dans le même sens. Comme le signale Hall et al. (2019), il est nécessaire d'évaluer la robustesse de cette approche en disposant d'une meilleure vérification des mécanismes physiques ou biogéochimiques responsables de cette relation émergente. Il est également nécessaire d'utiliser des méthodes statistiques telles que la distance de Cook qui revient à retirer un modèle de l'échantillon pour voir à quel point la relation émergente peut être sensible à la taille de l'échantillon. L'ajout de nouveaux modèles du système Terre dans l'échantillon servant à estimer

la relation émergente pourrait également être une approche intéressante.

Certaines de ces approches ont été utilisées dans les travaux de thèse de Maxime Plazzotta. Dans Plazzotta et al. (2018), nous avons également évalué la robustesse de la relation émergente à travers un ensemble de réalisations. Cette approche complémentaire à celles mise en avant dans Hall et al. (2019), permet d'évaluer la sensibilité de la relation émergente à la variabilité interne du climat.

Dans un contexte d'adaptation aux impacts du changement climatique, il serait intéressant de mélanger les approches de contraintes émergentes et de temps d'émergence. En effet comme expliqué dans ce chapitre, les techniques de temps d'émergence s'appuient sur des simulations de modèle non contraintes. On voit ici que pour le cas de variables dont les projections futures restent incertaines, les estimations brutes de modèles peuvent conduire soit à surestimer (pour les modèles avec une sensibilité proche de -1 % par °C) soit à sous-estimer (pour les modèles avec une sensibilité proche de -7 % par °C) le temps à partir duquel l'impact du changement climatique sur une variable (telle que la productivité primaire) émerge de la variabilité interne.

Cycle du carbone à l'interface avec la mitigation

Sommaire

5.1	Introduction	52
5.2	La contrainte géophysique ultime : le budget carbone compatible	55
5.3	Limite géophysique au déploiement de certaines techniques de mitigation	58
5.3.1	Une brève introduction aux contraintes géophysiques	58
5.3.2	Étude de la limitation en eau sur le déploiement des techniques de <i>bio-mass energy carbon capture and storage</i>	59
5.4	La modification du rayonnement solaire est-elle une forme de mitigation ?	61
5.4.1	Éléments de contexte	61
5.4.2	Impacts de la modification du rayonnement solaire sur les budgets carbone	62

5.1 Introduction

Parce que le CO₂ est le gaz à effet de serre le plus emblématique du changement climatique anthropique et qu'il est aussi l'espèce chimique la plus émise (consommation de carburants fossiles) ou co-émise (fabrication de ciment, changement d'usage des terres) par les activités humaines, l'étude du cycle du carbone se retrouve au centre de nombreuses problématiques en lien avec l'atténuation du changement climatique (e.g., IPCC, 2014a,c). En effet, le cycle du carbone par son lien avec le réchauffement planétaire exerce une contrainte géophysique de premier plan sur les négociations climatiques et la mise en place d'accords climatiques contraignant (e.g., Smith et al., 2015; Millar et al., 2017; Rogelj et al., 2015; Goodwin et al., 2018; Tokarska and Gillett, 2018; Tokarska et al., 2018b; Lowe and Bernie, 2018). Au même plan, le cycle du carbone représente une variable de couplage avec l'économie de l'environnement que l'on peut approcher de manière rudimentaire en regardant les termes de l'équation de Kaya (Equation 5.1). Cette équation permet de relier les émissions de CO₂ (*EFF*) à la croissance économique mesurée par le *PIB* selon la relation :

$$EFF = PIB \times \underbrace{\frac{NRJ}{PIB}}_{\text{Besoin énergétique du PIB}} \times \underbrace{\frac{EFF}{NRJ}}_{\text{Intensité carbone de l'énergie}} \quad (5.1)$$

À ce propos, j'utiliserai dans la suite de ce manuscrit, le terme *mitigation* au lieu d'atténuation du changement climatique car il a un sens plus large. En effet le groupe 3 du GIEC¹ définit la mitigation de la manière suivante : "*a human intervention to reduce the sources or enhance the sinks of greenhouse gases. The AR5 working group 3 report also assesses human interventions to reduce the sources of other substances which may contribute directly or indirectly to limiting climate change, including, for example, the reduction of particulate matter emissions that can directly alter the radiation balance (e.g., black carbon) or measures that control emissions of carbon monoxide, nitrogen oxides, Volatile Organic Compounds and other pollutants that can alter the concentration of tropospheric ozone which has an indirect effect on the climate*" (IPCC, 2014a). En comparaison, en France, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) considère qu'"une activité contribue à l'atténuation du changement climatique si elle contribue à la stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique". Ce qui est clairement moins fort que la définition consacrée par le groupe 3 du GIEC.

Dans Rogelj et al. (2018b), le Chapitre 2 du Rapport Spécial 1,5°C du GIEC, nous avons montré qu'endiguer le réchauffement global en deçà de 1,5°C demanderait une réduction massive des émissions anthropiques de CO₂, avec un abattement de plus de 45% de nos émissions en 2030 par rapport à 2010 (Figure 5.1) pour arriver à des émissions anthropiques nettes de CO₂ égales à zéro autour de 2060. Ensuite, pour compenser les émissions résiduelles de CO₂ liées aux transport, aux infrastructures et à l'agriculture, il faudrait pouvoir déployer des techniques de retrait de CO₂ de l'atmosphère ou *Carbon Dioxide Removal* ou CDR.

Un tel objectif demanderait donc la mise en place de nombreuses mesures de mitigation mais aussi le déploiement de mesures d'adaptation face au changement climatique.

Pourtant, malgré la publication de ce rapport spécial, et malgré la prise de conscience d'une partie de la société civile, le suivi annuel que nous réalisons dans le *Global Carbon Project* montre que les émissions de CO₂ anthropiques sont reparties à la hausse depuis 2016 et que

1. groupe de scientifiques et d'experts travaillant sur les mesures d'atténuation du changement climatique et de l'économie de l'environnement

cette hausse continue aujourd'hui (Le Quéré et al., 2018).

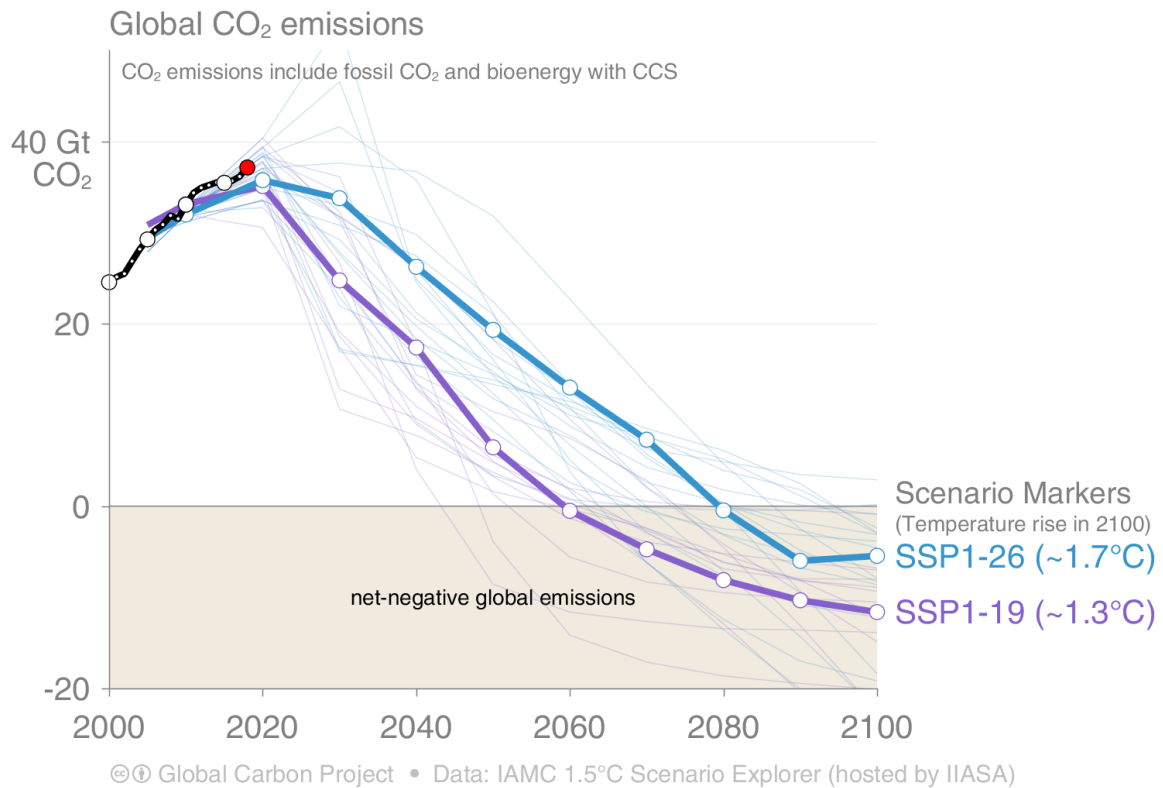
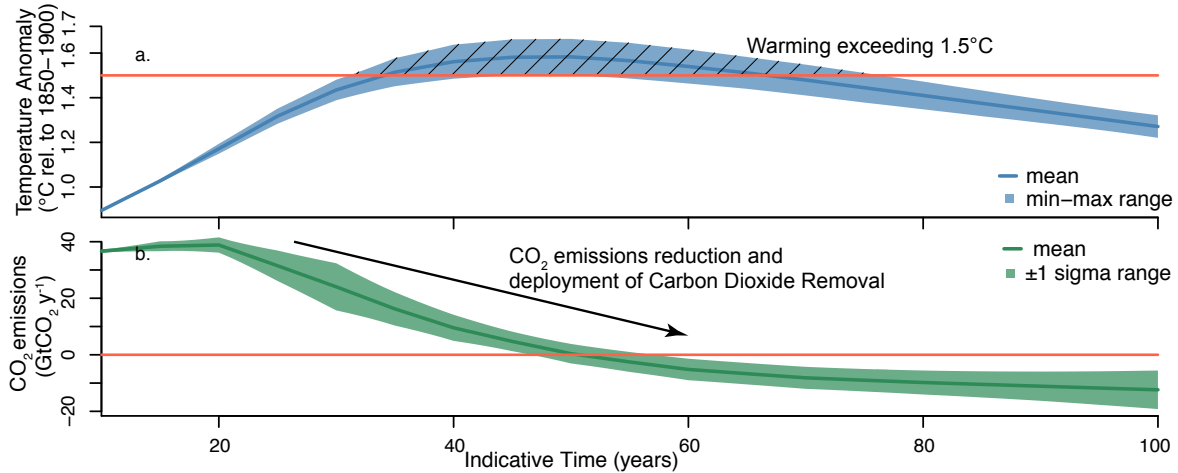


FIGURE 5.1 – Évolution des émissions anthropiques nettes de CO₂ sur la période 2000 à 2100. En bleu sont représentés les scénarios d'émissions compatibles avec un développement soutenable (Rogelj et al., 2018a); en noir sont représentées les émissions anthropiques nettes de CO₂ observées. Ces dernières sont discutées dans l'évaluation du *Global Carbon Project 2018* (Le Quéré et al., 2018).

Un autre type d'intervention climatique existe. Il est dénommée par "la géo-ingénierie". Ce terme englobe les techniques dites de modification du rayonnement solaire (*Solar Radiation Management*, SRM, en anglais). La SRM reste un plan B tant les risques encourus sont grands et son niveau d'acceptation sociale bas (e.g., Boucher et al., 2014, le rapport de l'ARP RÉAGIR). Pourtant, certains articles scientifiques commencent à suggérer qu'une combinaison de mitigation et de SRM pourrait être utilisée pour lutter contre le changement climatique tout en restant dans un domaine de contrainte géophysique acceptable.

Comme le montre la Figure 5.2, la SRM n'est plus vue comme une solution ultime, mais comme une solution de court terme permettant de gagner du temps pour mettre en place des techniques de mitigation efficaces (Lawrence et al., 2018). Il serait ainsi possible d'éviter de dépasser un niveau de température globale qui pourrait s'avérer trop dangereux (Tilmes et al., 2016). Quoiqu'il en soit ce regain d'intérêt pour la SRM pose un vrai problème éthique et social dans la mesure où son coût est bon marché par rapport à celui de la mitigation. En effet, on estime que 15 ans d'injection d'aérosols sulfatés dans la stratosphère (une famille de SRM) incluant les coûts de recherche et développement coûteraient autant que les dégâts que le feu de forêt dénommé "Camp Fire" en Californie en 2018 ou 15% du coût des dégâts causés par la période cyclonique aux États-Unis (environ 16,5 Milliards de \$). Il faudrait déployer une somme d'au moins 1 ordre de grandeur supérieur pour résoudre le problème du CO₂ grâce à une mitigation

Geophysical characteristics of mitigation pathways overshooting 1.5°C by mid-century



Geophysical characteristics of hypothetical SRM deployment holding warming to 1.5°C during the temperature overshoot

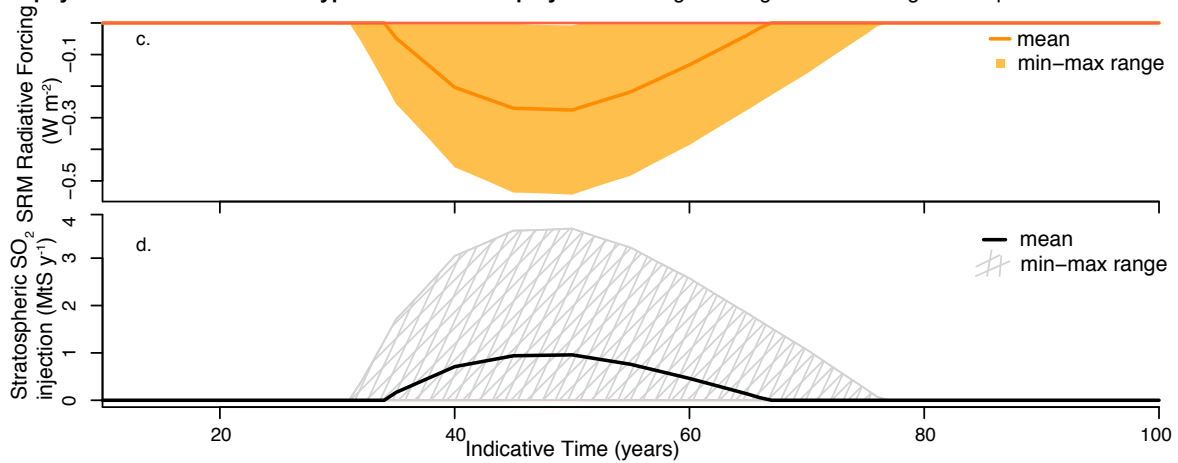


FIGURE 5.2 – Métriques climatiques planétaires permettant de suivre de manière schématique le déploiement hypothétique de SRM conjointement avec la mise en place de méthode de mitigation dont CDR. La température en moyenne globale est représentée en (a) ; Cette dernière présente une forme en "cloche" dites *overshoot* en anglais à cause du déploiement de méthodes de mitigation globale. Afin de limiter le dépassement du seuil de 1,5°C présenté en (a) par le trait rouge, le panneau (b) présente l'hypothèse d'une injection d'aérosols sulfatés dans la stratosphère. Cette Figure est issue de (de Coninck et al., 2018, Chapitre 4 du rapport Spécial 1,5°C du GIEC).

globale.

Mon travail sur ces thématiques s'est étoffé par les biais de mes collaborations avec les collègues de l'IPSL (Olivier Boucher), du CSIRO (Andrew Lenton) et du CIRED (Céline Guivarch et Patrice Dumas). Ce chapitre s'inscrit donc dans le cadre d'une véritable collaboration interdisciplinaire avec les collègues du groupe 3 du GIEC, pour lesquels les informations tirées des modèles et des observations sur les contraintes géophysiques peuvent aider à la mise en place de scénarios réalistes de mitigation. Dans ce chapitre, je présente le travail initié par Matthias Rocher en collaboration avec Céline Guivarch puis Patrice Dumas pour représenter les interactions entre l'économie de l'environnement et le climat au sein d'un modèle du système Terre. En ce qui concerne la géo-ingénierie, même si cette dernière n'est pas une technique de mitigation, elle fait partie de l'éventail de solutions pour lutter contre le changement climatique. Je présenterai donc quelques résultats de la thèse de Maxime Plazzotta (thèse que j'ai co-encadré avec Hervé Douville au CNRM) qui ont permis d'évaluer le potentiel de mitigation de la SRM

en utilisant les concepts de rétroaction climat-carbone telles que discutées dans le Chapitre 3.

5.2 La contrainte géophysique ultime : le budget carbone compatible

L'objectif principal des négociations climatiques est d'éviter la mise en place d'interférences dangereuses des activités humaines sur le système climatique. Cet objectif s'est concrétisé lors de la COP21 à Paris en 2015 par la volonté de limiter le réchauffement planétaire bien en dessous de 2°C par rapport au niveau préindustriel et de poursuivre les efforts pour limiter l'augmentation de la température globale en dessous de $1,5^{\circ}\text{C}$.

Face à cet objectif se pose la question : quel sont les principaux facteurs qui contrôlent la hausse de la température globale ?

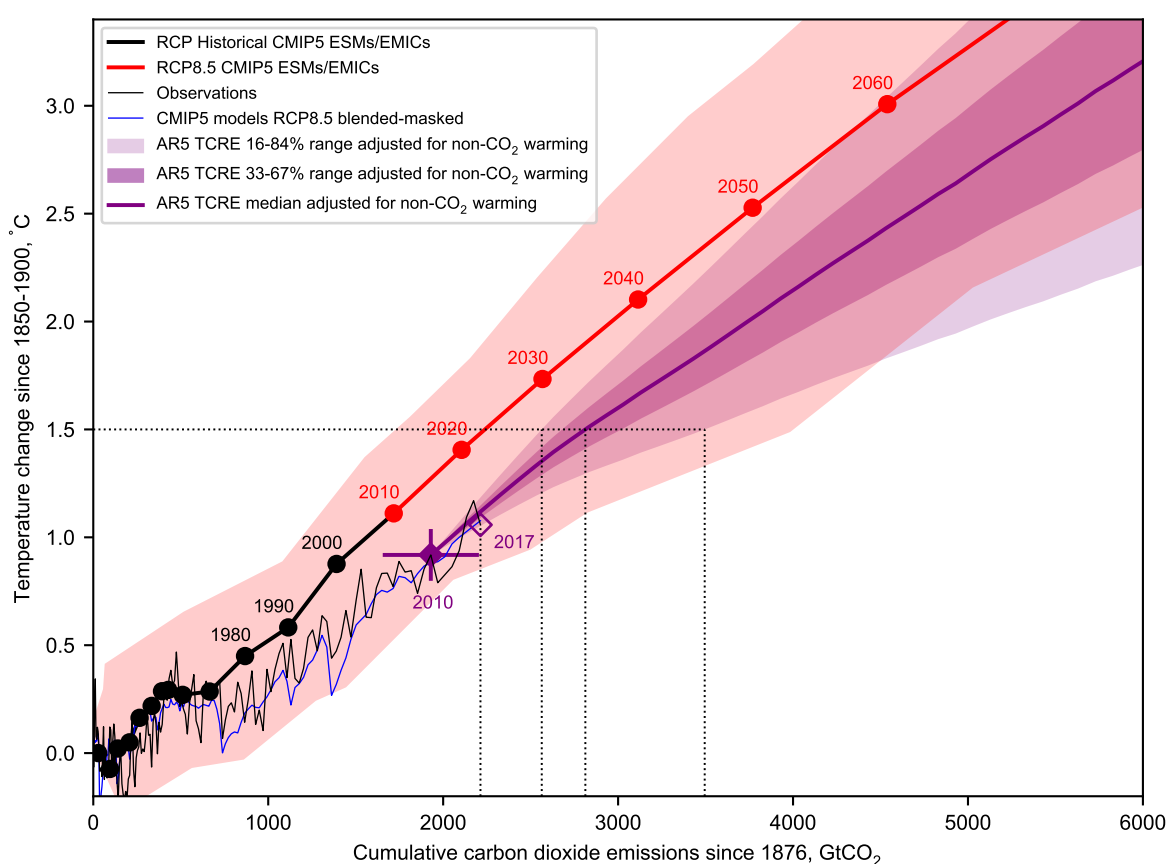


FIGURE 5.3 – Réchauffement global par rapport à 1850-1900 en fonction du cumul d'émissions anthropiques nettes de CO₂ depuis le 1 janvier 1876. La courbe épaisse avec les points et l'aplatissement de couleur rose reproduit la Figure SPM10 de l'AR5 ; ces valeurs ont été calculées à partir des simulations de modèles du système Terre et de modèles de complexité intermédiaire. Les courbes fines représentent les meilleures estimations observationnelles (noir) et modélisées (bleu) issues du rapport spécial du GIEC sur un réchauffement planétaire d' $1,5^{\circ}\text{C}$. La courbe violette représente l'évolution de la température globale en fonction du cumul des émissions à partir de 2005-2016 simulé par les émulateurs climatiques MAGICC6 et FaIRv1.0 utilisant la distribution de la TCRE évaluée dans l'AR5. Cette Figure est issue de Rogelj et al. (2018b).

Le cinquième rapport du groupe 1 du GIEC² indique que le cumul des émissions anthropiques nettes de CO₂ est le principal facteur de contrôle de la hausse de la température globale depuis l'ère préindustrielle IPCC (2013). Ce résultat s'explique principalement par l'existence d'une propriété émergente du système climatique qui se présente sous la forme d'une relation quasi-linéaire entre le cumul des émissions anthropiques nettes de CO₂ et la hausse de la température globale. Cette propriété émergente est dénommée *Transient Climate Response to cumulative Emissions* ou TCRE et a été introduite par Matthews et al. (2009). La limitation du réchauffement planétaire en deçà d'un seuil en température impose la restriction que toutes les sources émissions de CO₂ anthropiques doivent être contraintes à une certaine quantité, dénommée budget carbone ou quota carbone.

Comme le montre la Figure 5.3, les modèles du système Terre sont capables de simuler cette propriété émergente du système climatique. Toutefois, leurs estimations restent encore très incertaines. En effet, Gillett et al. (2013) donnent une gamme de valeurs comprises entre 0,8 et 2,5 °C par 1000 GtC émis dans l'atmosphère conduisant à une incertitude sur les budgets carbone de 400 à 1250 GtC par °C de réchauffement global.

Depuis son introduction dans la littérature, plusieurs budgets carbone compatibles pour le seuil de réchauffement à 2°C ou 1,5°C ont été proposés mais leurs comparaisons sont difficiles dans la mesure où les hypothèses qui ont permis d'élaborer ces budgets sont différentes (Rogelj et al., 2016a).

C'est dans ce contexte que nous avons entrepris de ré-évaluer les budgets carbones avec une méthodologie plus transparente inspirée de (e.g., Millar et al., 2017; Tokarska et al., 2018a) dans le rapport spécial du GIEC sur un réchauffement planétaire d'1,5°C (Rogelj et al., 2018a). Cette dernière nous a également permis de ré-évaluer à la hausse le budget carbone restant compatible avec un réchauffement global de 1,5°C à 158 GtC (ou 580 Gt CO₂). Il avait été évalué à un niveau quasiment deux fois inférieur dans l'AR5 IPCC (2014c).

Avec l'équipe d'auteurs ayant contribué à l'élaboration des budgets carbone compatibles avec un niveau de réchauffement global de 1,5°C ou 2°C, nous avons proposé une méthodologie plus transparente permettant de mieux comprendre et appréhender les changements des budgets carbone compatibles en fonction des progrès scientifiques.

La Figure 5.4 présente les différentes contributions jouant sur le budget carbone pour un seuil de température donné. Je présente dans la Table 5.1 quel est notre niveau de compréhension pour chacune de ces contributions et quels sont les moyens ou méthodes disponibles qui permettraient de progresser sur ces connaissances.

C'est dans ce contexte que nous avons mis en place un protocole expérimental dénommé ZEC-MIP qui visent à évaluer T_{ZEC} aux échelles de temps décennale et centennale en collaboration avec des experts du cycle du carbone et du système climatique (Jones et al., 2019). Certaines actions proposées dans mon projet de recherche (Chapitre 6) visent à améliorer la modélisation du système Terre. Ces dernières pourraient permettre de progresser sur la quantification de T_{nCO_2} et de E_{ESfb} . Toutefois, il est important de signaler qu'une meilleure compréhension de la TCRE et de sa distribution reste le levier majeur pour progresser sur l'élaboration des budgets carbone. Cet aspect n'est pas spécifiquement mis en avant dans ce manuscrit car il fait partie d'une action de long terme qui accompagne à la fois le développement des mo-

2. groupe de scientifiques et d'experts travaillant sur les bases physiques et chimiques du climat

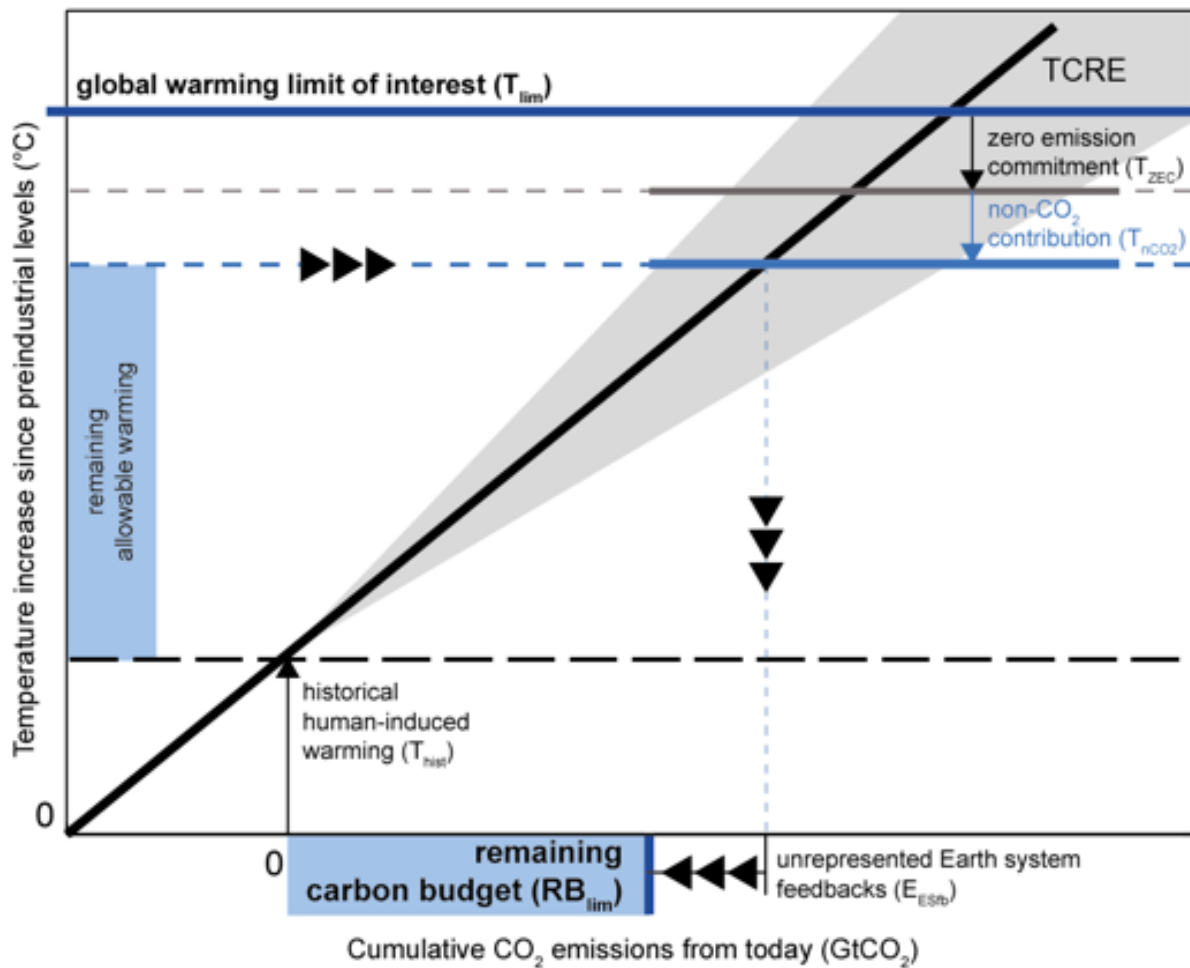


FIGURE 5.4 – Décomposition des différentes contributions jouant sur l'estimation du budget carbone compatible avec un seuil de température. Cette Figure est issue de Rogelj et al. (2019).

dèles du système Terre et les progrès dans le domaine des observations du changement climatique.

Il est enfin important de souligner que malgré sa pertinence pour les décideurs dans le cadre de négociation climatique, la déclinaison du concept de budget carbone au niveau régional, national, voir local reste compliqué. Ce constat s'explique par le fait que cette propriété émergente est inapplicable au niveau local. En effet, il n'existe pas de lien entre les émissions anthropiques nettes de CO₂ régionales et la hausse de la température régionale, même si certains travaux ont pu montrer qu'il existe une quasi-linéarité entre le réchauffement global et la hausse de températures régionales (e.g., Seneviratne et al., 2016). L'application des budgets carbone au niveau local demanderait de s'inspirer de certains travaux comme ceux de Raupach et al. (2014) qui ont fourni une première ébauche de partage des budgets carbone entre les grandes régions du monde. Il serait donc nécessaire de revoir ce genre d'approche en tenant compte des contraintes démographiques, économiques, sociales et structurelles des prochaines décennies.

Terme	Incertitude principale	Compréhension	Levier d'amélioration
TCRE	Estimation de la TCRE et sa distribution statistique	basse à moyenne	Détection et Attribution Contraintes émergentes
T_{ZEC}	Signe et amplitude de la réponse du système climatique à émission nulle de CO ₂	basse	Modélisation
T_{nCO_2}	Réponse climatique de forceurs non-CO ₂ (gaz et aérosols)	basse à moyenne	Modélisation Contraintes émergentes Détection et Attribution
E_{ESfb}	Amplitude et temps caractéristiques des rétroactions climatiques du système Terre (e.g., permafrost)	basse	Modélisation Contraintes émergentes

TABLE 5.1 – Contributions majeures liées à la réponse du système climatique aux émissions de CO₂ intervenant dans l'élaboration des budgets carbone compatibles avec un seuil de réchauffement donné (T_{lim}) telles que présentées dans la figure 5.4. Ce tableau a été modifié par rapport à celui publié dans Rogelj et al. (2019). La dernière colonne donne quelques pistes permettant de progresser sur l'élaboration des budgets carbone compatibles.

5.3 Limite géophysique au déploiement de certaines techniques de mitigation

5.3.1 Une brève introduction aux contraintes géophysiques

Plusieurs revues dans la littérature telles que Smith et al. (2015) expliquent qu'il est possible de classer différentes techniques de CDR en deux groupes. Certaines techniques vont viser à modifier le cycle du carbone, en intensifiant les flux de carbone depuis l'atmosphère vers les autres réservoirs de carbone. Parmi ces techniques, on peut citer la reforestation (si la surface était préalablement boisée), l'afforestation (si la surface n'était pas boisée dans le passé), ou l'altération forcée des roches (des silicates ou des carbonates par exemple) qui permet de dissoudre du CO₂ atmosphérique dans des minéraux. D'autres techniques plus industrielles vont chercher à capter directement le CO₂ de l'atmosphère et sont accompagnées d'un stockage géologique. Par exemple en créant des arbres artificiels capables de reproduire les processus photosynthétiques, ou via l'utilisation de biocarburants accompagnée d'une capture du carbone (technique couramment dénommée BECCS pour *Biomass Energy Carbon Capture and Storage*). L'ensemble des techniques de CDR nécessite un déploiement massif afin d'impacter le climat à l'échelle planétaire et la température globale. Des contraintes spécifiques apparaissent, notamment sur le plan économique, sur la demande en énergie, sur l'usage des sols (compétition vis à vis de l'agriculture) ou encore sur les ressources en eau.

La Figure 5.5 résume les connaissances sur les contraintes géophysiques des techniques de CDR principalement utilisées dans les trajectoires évaluées dans le groupe 3 du GIEC et implémentées dans les modèles macroéconomiques.

On remarquera que la limitation par les nutriments tel que l'azote, le phosphore et le potassium n'est pas représentée sur la Figure 5.5.

On peut également remarquer qu'aucune technique de CR relative à l'océan n'est traitée ici. Toutes ces techniques, malgré leur pertinence (e.g., Ilyina et al., 2013), ne sont pas implémentées dans les modèles macroéconomiques et représentent donc une limitation forte sur le portfolio des techniques de CDR évaluées par le groupe 3 du GIEC.

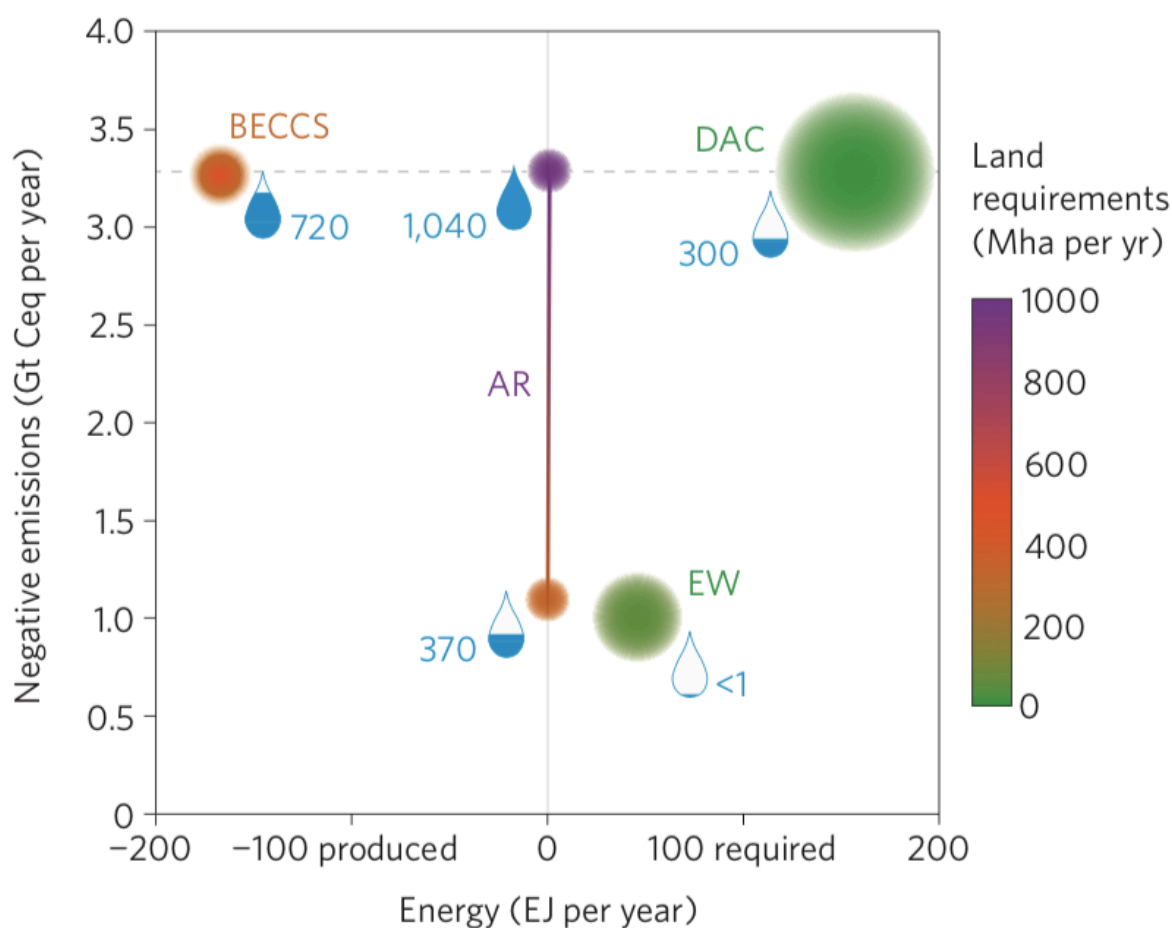


FIGURE 5.5 – Contraintes géophysiques et investissement nécessaire pour le déploiement de technique de CDR sur les continents. Les chiffres sont donnés pour des trajectoires d'émissions compatibles avec un réchauffement planétaire à 2°C. Tous les chiffres sont donnés pour 2100 à l'exception des coûts qui sont donnés pour 2050. Les contraintes en eau sont représentées par les gouttes d'eau. Les contraintes d'espaces sont représentées par les plages de couleurs. Acronymes : BECCS, biomass energy carbon capture and storage; DACCS, direct air capture and carbon storage; AR afforestation/reforestation; EW, enhanced weathering. Cette Figure est issue de Smith et al. (2015).

5.3.2 Étude de la limitation en eau sur le déploiement des techniques de *biomass energy carbon capture and storage*

Dans le cadre du stage de Master de Matthias Rocher, nous avons étudié le rôle d'une contrainte géophysique au déploiement des BECCS : la limite en eau. Pour cela nous avons fait dialoguer le modèle du système Terre CNRM-ESM1 et le modèle macroéconomique IMACLIM pour quantifier comment une représentation réaliste du climat peut donner une information pertinente sur la disponibilité en eau nécessaire au déploiement des BECCS. Ce travail s'est inscrit dans une collaboration avec Céline Guivarch (CIRED) et Jeanne Colin (CNRM) et a été publié dans *Environmental Research Letters* (Séférian et al., 2018c).

Matthias Rocher a élaboré différents scénarios d'émissions de CO₂ dont les budgets carbonés en fin de siècle (2100) sont compatibles avec un réchauffement planétaire compris entre 1,5°C et

2°C . Ce jeu de scénarios stylisés nous a permis de forcer le modèle IMACLIM et de disposer de trajectoires d'évolution des émissions négatives brutes liées au BECCS. Ce même jeu de scénarios nous a également permis de forcer le modèle CNRM-ESM1 en mode émission pour déterminer la réponse du climat de 2015 à 2100. La revue de la littérature de Smith et al. (2015) nous a permis de traduire les émissions négatives brutes des BECCS en un besoin en eau que nous avons réparti sur les terres arables disponibles (définies comme la fraction de sol nu et d'herbe coexistant avec des cultures dans un point de grille). L'eau disponible pour le déploiement des BECCS a été estimée à partir des précipitations de l'évapotranspiration et du ruissellement simulés par CNRM-ESM1 en chaque point de grille. La comparaison entre l'eau disponible et les besoins en eau de BECCS permet d'établir le niveau de précarité en eau.

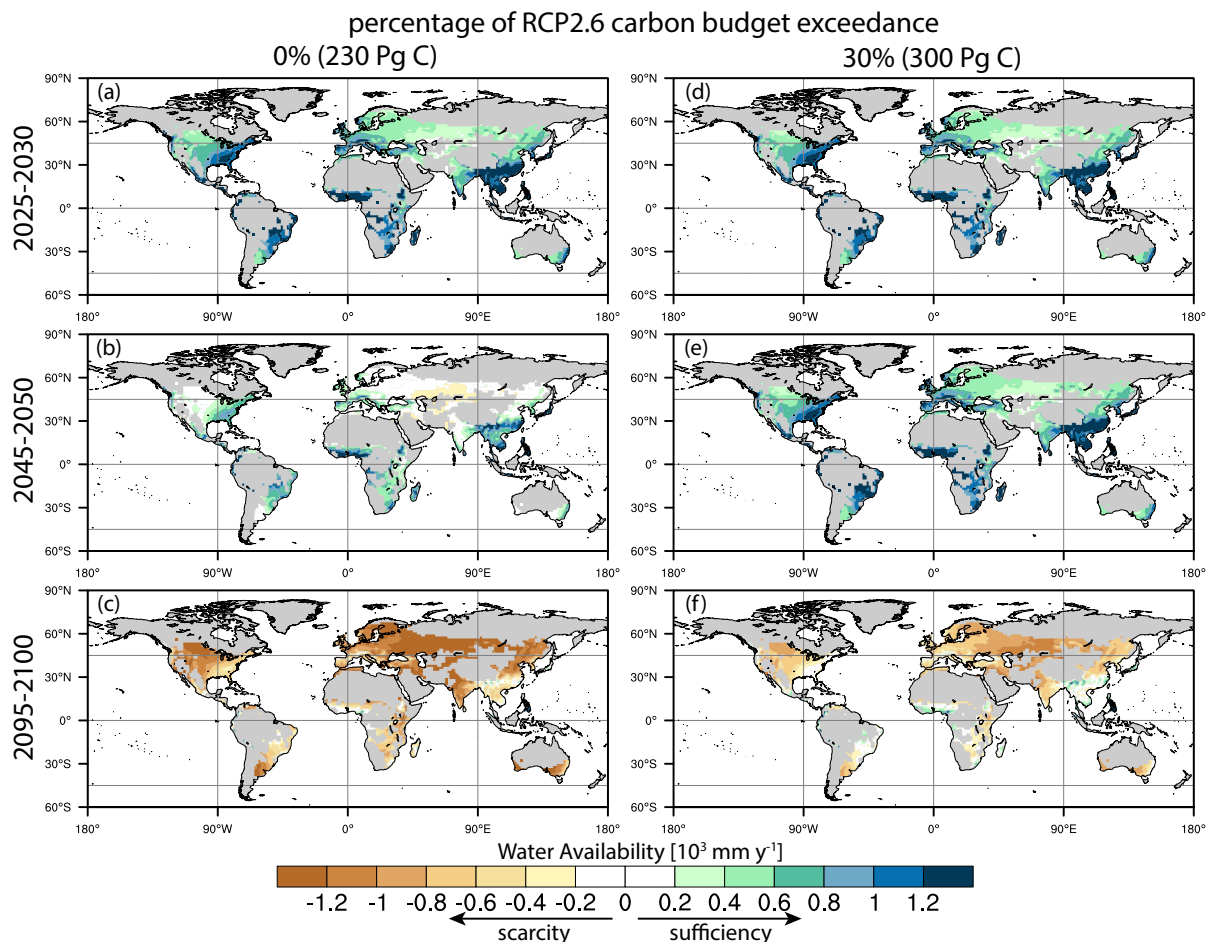


FIGURE 5.6 – Disponibilité en eau sur 3 décennies simulée par le couple de modèle CNRM-ESM1-IMACLIM pour 2 trajectoires d'émission de CO_2 compatibles avec un réchauffement planétaire compris entre 1,5°C et 2°C . La disponibilité en eau est calculé comme la différence entre l'eau bleu (précipitation moins ruissellement de surface, simulé par CNRM-ESM1) et les besoins en eau des BECCS (estimés par les émissions négatives brutes d'IMACLIM et les contraintes hydriques par GtC capturé de Smith et al. (2015)) spatialisé sur les terres arables disponibles. Les terres arables disponibles sont définies comme la fraction de sol nu et herbe co-existant avec des cultures dans un point de grille. Cette Figure est issue de Séférian et al. (2018c).

La Figure 5.6 présente les résultats de notre étude en terme de disponibilité en eau pour deux trajectoires contrastées : une très stricte, respectant le budget carbone du scénario rcp26 en 2100, l'autre plus lâche, permettant un excès de 30% de ce budget carbone en 2100.

On remarque que la précarité en eau (couleurs rougeâtres) arrive dès le début du siècle pour la trajectoire la plus stricte (Figure 5.6, à gauche). Cette précarité arrive plus tard pour la trajectoire la moins stricte (Figure 5.6, à droite). Toutefois, en fin de siècle la quasi-totalité des terres arables présente une précarité en eau qui peut engendrer des impacts sur les cultures vivrières adjacentes.

Dans le monde réel, la précarité en eau d'une parcelle cultivée est souvent compensée par l'irrigation dont le déploiement prélève de l'eau dans d'autres réservoirs (disposant d'autres limites environnementales) mais représente également un coût d'installation. Ce dernier peut agir sur le coût nominal des BECCS et donc rétroagir sur le taux de pénétration de ce genre de technique de CDR dans le marché, et donc modifier les trajectoires compatibles avec un réchauffement planétaire compris entre 1,5°C et 2°C.

Dans ce contexte, notre travail a permis d'évaluer dans quelle mesure ce scénario de déploiement d'émissions négatives brutes simulé par IMACLIM est réaliste au regard des contraintes géophysiques simulées par CNRM-ESM1. Nos résultats sont en accord avec les conclusions d'autres groupes de modélisation telles que celles de Boysen et al. (2016, 2017); Heck et al. (2016).

Avec plus de recul notre travail suggère qu'aucun des 2 types de modèles (macroéconomique et du système Terre) n'est réellement adapté pour étudier ce genre de trajectoires complexes. Un modèle macroéconomique ne dispose pas d'une représentation réaliste du climat et des contraintes environnementales ou géophysiques simples telles que la ressource en eau. Un modèle du système Terre ne dispose pas d'une représentation réaliste de la sphère anthropique (en l'occurrence CNRM-ESM1 ne simule pas l'irrigation).

Notre travail montre donc qu'au moins pour le cas de l'agriculture une représentation fine de ces interactions et de la boucle de rétroaction entre la sphère anthropique et le climat est nécessaire pour bien évaluer le réalisme des trajectoires de bas niveau d'émissions.

5.4 La modification du rayonnement solaire est-elle une forme de mitigation ?

5.4.1 Éléments de contexte

Comme évoqué en introduction, la géo-ingénierie est souvent vue comme un plan B dont les impacts sur le climat et l'environnement sont très peu contraints. N'agissant pas directement sur les taux d'émissions de gaz à effet de serre la géo-ingénierie n'est pas rangée dans les techniques de mitigation. La preuve en est qu'aucun modèle macroéconomique n'intègre cette technique dans son portfolio de techniques de mitigation.

Toutefois la frontière entre mitigation et géo-ingénierie a été remise en question par un commentaire récent de David Keith dans *Nature Climate Change* "SRM as CDR" (Keith et al., 2017). Ce commentaire suggère que par son effet sur le cycle du carbone global la SRM peut être comptée comme une forme de CDR. En effet, de nombreuses études (e.g., Matthews and Keith, 2007; Keller et al., 2014; Tjiputra et al., 2016) montrent que la SRM tend à renforcer les puits de carbone naturels. Toutefois, ces résultats sont basés sur des simulations d'un seul modèle, et avec des scénarios et des hypothèses différents. C'est ce constat qui a motivé l'étude multi-modèles de Plazzotta et al. (2019), menée dans le cadre de la thèse de Maxime Plazzotta au CNRM.

5.4.2 Impacts de la modification du rayonnement solaire sur les budgets carbone

Dans cette étude, nous avons étudié la réponse des flux de carbone à la SRM simulé par 6 modèles du système Terre dans le cadre de l'expérience coordonnée de GeoMIP G4 (Kravitz et al., 2011). Cette expérience simule l'injection continue de 5 Tg par an d'aérosols sulfatés dans la stratosphère du 1 janvier 2020 au 31 décembre 2069. Les analyses de Maxime Plazzotta ont montré que tous les modèles s'accordent sur un renforcement des puits de carbone naturels. En moyenne à travers les 6 modèles, la quantité additionnelle de carbone stocké durant les 50 années de SRM est de 40 ± 19 GtC, correspondant à 4 années d'émissions anthropiques nettes de CO₂ au taux actuel (Le Quéré et al., 2018).

Maxime Plazzotta a montré que les deux puits de carbone ne sont pas stimulés dans les mêmes proportions : la biosphère terrestre est responsable de 85 % de la quantité additionnelle de carbone stocké durant les 50 années de SRM ; l'océan est responsable du reste, contrastant avec les résultats de Tjiputra et al. (2016).

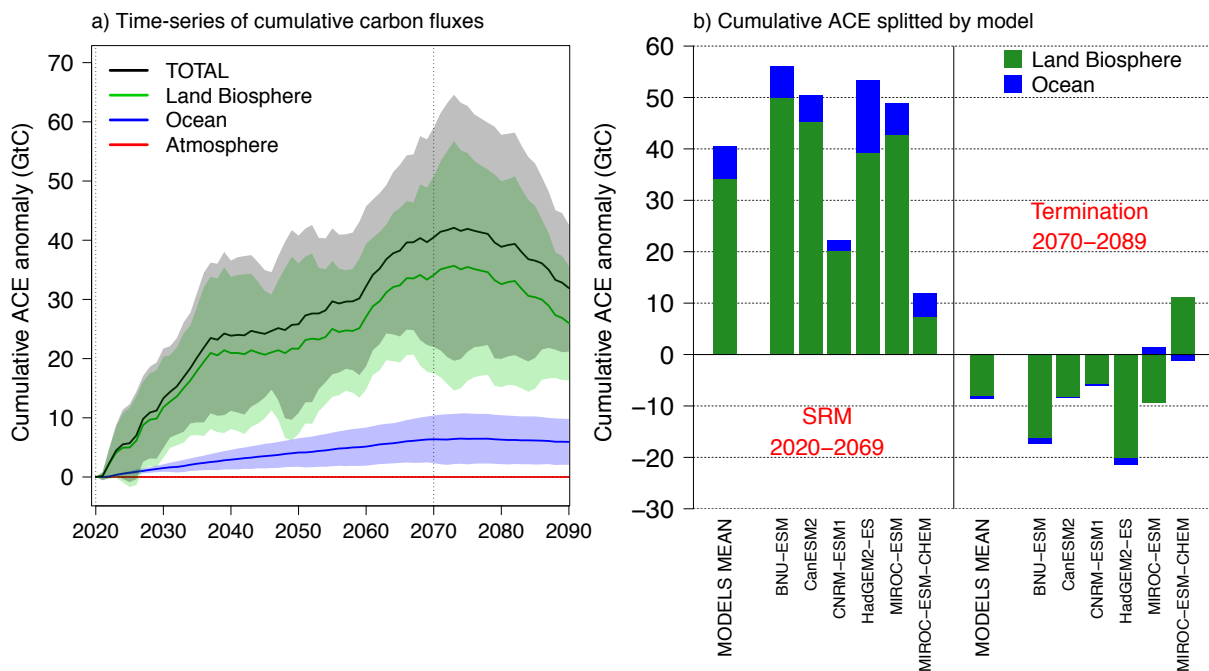


FIGURE 5.7 – Évolution temporelle des émissions compatibles additionnelles imputées à la SRM au cours de 50 années d'injection continue de 5 Tg d'aérosols sulfatés dans la stratosphère par an. Ces émissions compatibles ont été calculées en appliquant la méthodologie classique de Jones et al. (2013) sur la différence des flux de carbone simulés dans les scénarios G4 et rcp45. Le panneau (a) montre l'évolution temporelle des puits naturels au cours de la simulation ; le trait pointillé vertical montre l'arrêt de la SRM. Le panneau (b) montre la quantité additionnelle de carbone stocké durant les 50 années de SRM et sa répartition à travers les réservoirs de carbone continentaux et océaniques. Le panneau (b) montre également la quantité de carbone perdue 20 ans après l'arrêt des injections. Cette Figure est issue de Plazzotta et al. (2019).

La capacité de la SRM à stimuler les puits de carbone fait que cette technique peut être vue comme une forme de CDR et devrait être intégrée dans une certaines mesures au portfolio de solutions des modèles macroéconomiques. Toutefois, la pérennité du stockage après l'arrêt de l'injection d'aérosols sulfatés dans la stratosphère en 2070 n'est pas en accord avec la définition

classiquement acceptée des techniques de CDR (i.e., disposant d'un stockage pérenne). Ce qui suggère qu'une plus grande pénalité pourrait être assignée à cette famille de techniques à cause de son important risque de "fuite" de CO₂.

Dans Plazzotta et al. (2019), l'utilisation d'une simulation couvrant le 22^{ème} siècle avec CNRM-ESM1 a permis de montrer qu'au moins 80 % de la quantité additionnelle de carbone stocké durant les 50 années de SRM serait relâché vers l'atmosphère après l'arrêt des injections, impactant directement le pouvoir de la SRM à agir comme une technique de CDR.

À travers cette première étude du genre, nous avons montré que, pour un scénario d'émission donné, la SRM pourrait augmenter légèrement les budgets carbone compatibles avec le niveau de réchauffement attendu pour ce scénarios. Ce qui veut dire que la SRM pourrait donner quelques années de sursis supplémentaires en terme d'émissions anthropiques nettes de CO₂. Toutefois, ce bénéfice reste très limité dans le temps puisqu'une grande partie de ce budget carbone additionnel est perdu dès lors que le SRM est arrêté, rajoutant un aléas supplémentaire à cette famille de techniques.

D'autre part, le travail de Maxime Plazzotta a également montré qu'il est nécessaire de traiter les résultats issus d'études mono-modèle avec précaution quand il s'agit de géo-ingénierie car l'amplitude de la réponse, la chronologie et les processus mis en jeu diffèrent d'un modèle à l'autre. Ces résultats soulignent clairement que notre compréhension de la réponse du système Terre à la SRM reste très limitée et très mal contrainte.

Un autre aspect important à prendre en compte lorsque l'on souhaite comparer le pouvoir de la SRM à agir comme une CDR est de comparer leurs coût respectifs pour extraire 1 GtC de l'atmosphère. Une telle comparaison a été conduite dans Plazzotta et al. (2019). La Figure 5.8 compare à la fois l'efficacité de chaque technique de CDR pour retirer du CO₂ de l'atmosphère mais aussi son coût pour retirer 1 GtC. La Figure 5.8 montre que lorsque l'on tient compte uniquement du CO₂ stocké lors de la période d'injection, l'efficacité de la SRM à retirer du CO₂ de l'atmosphère est équivalente à celui de l'afforestation avec un coût d'un ordre de grandeur inférieur par rapport à celui évalué dans Smith et al. (2015). C'est ce qui motive en grande partie le commentaire de Keith et al. (2017) Dans *Nature Climate Change*.

Toutefois, Plazzotta et al. (2019) montrent que l'évaluation conduite dans Keith et al. (2017) n'est pas complète dans la mesure où elle se place sous l'hypothèse d'un déploiement perpétuel de SRM. Plazzotta et al. (2019) démontrent que si l'on tient compte de l'effet rebond lié à l'arrêt de l'injection d'aérosols sulfatés en haute atmosphère, l'efficacité se trouve grandement réduite et le coût pour retirer 1 GtC de CO₂ de l'atmosphère devient prohibitif (Figure 5.8).

Dans un contexte de collaboration académique, il serait intéressant de ré-évaluer certaines trajectoires d'émissions futures en intégrant la SRM dans le portfolio de solutions technologiques pour lutter contre le changement climatique. Pour cela, il faudrait tenir compte de ses caractéristiques climatiques et de sa capacité à agir comme une technique de CDR telle que Plazzotta et al. (2019) l'ont évaluée. Compte tenu des caractéristiques mises en avant dans notre travail il n'est pas sûr que cette technique soit compétitive par rapport à d'autres techniques de mitigation bien établies.

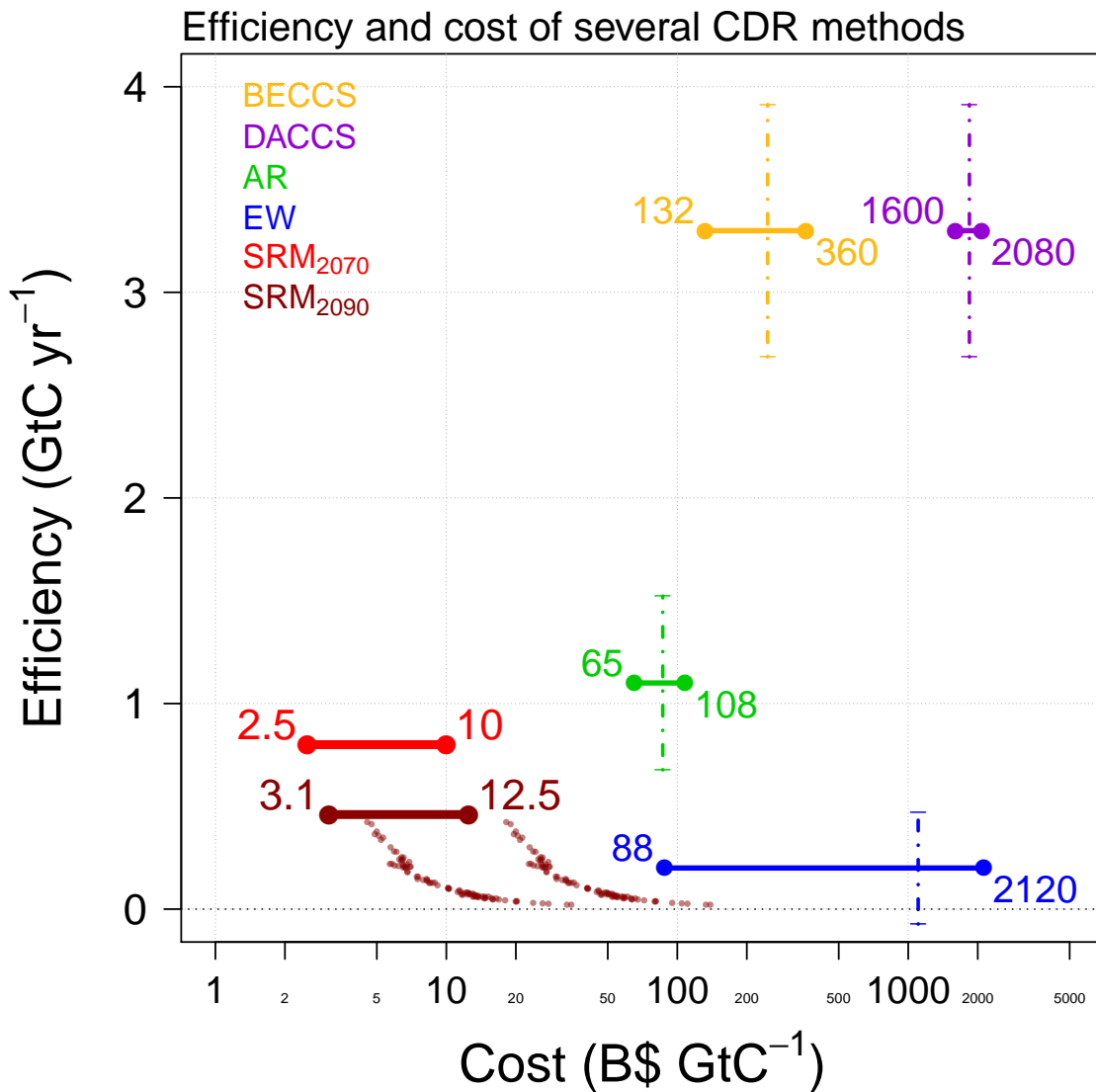


FIGURE 5.8 – Diagramme efficacité versus coûts de différentes techniques de CDR. Acronymes : BECCS, biomass energy carbon capture and storage; DACCS, direct air capture and carbon storage; AR afforestation/reforestation; EW, enhanced weathering; SRM, solar radiation management. Les chiffres pour les BECCS, DACCS, AR et EW sont issus de Smith et al. (2015). Les chiffres pour la SRM sont issus de (Plazzotta et al., 2019). Les valeurs données pour la SRM ont été calculées pour un ensemble de 6 modèles du système Terre à l'exception des petits points ocres qui tracent l'évolution annuelle du stock de carbone capturé durant les 50 années de SRM jusqu'à 2200 tel que simulée par CNRM-ESM1. Cette Figure est issue de Plazzotta et al. (2019)

Sommaire

6.1	Introduction	66
6.2	Étude du cycle du carbone par la modélisation : plus de processus, plus de couplages	66
6.3	Modélisation du système Terre : de l'évaluation à la vérification . .	69
6.4	Vers un cycle du carbone opérationnel	70
6.5	Modélisation du système Terre : vers la prise en compte des rétroactions activités humaines-climat	71

6.1 Introduction

Jusqu'à présent, j'ai détaillé mes travaux antérieurs réalisés depuis l'obtention de mon doctorat. Ces travaux sont très divers et doivent autant à des objectifs que je me suis fixé qu'aux rencontres ou collaborations qui en ont découlé. Dans la partie qui suit, je vais présenter des pistes que je souhaiterais explorer dans les prochaines années. Il ne s'agit en aucun cas d'une liste exhaustive des sujets que j'aborderai dans le futur mais d'une liste indicative dessinant une trajectoire « cohérente » en lien avec ma thématique de recherche et les activités du CNRM.

6.2 Étude du cycle du carbone par la modélisation : plus de processus, plus de couplages

Je commence cette section en présentant un bilan succinct des développements de modèle que j'envisageais il y a 5 ans dans les conclusions de ma thèse. J'avais listé quelques priorités en termes de développement pour le modèle du système Terre (CNRM-ESM1) :

- La prise en compte de la couleur de l'océan au niveau du couplage océan-atmosphère qui affecte au premier ordre la quantité de chaleur pénétrant dans l'océan.
- La modélisation du carbone organique coloré et, par ce biais, la modélisation des eaux de type II qui occupent une grande partie des océans (et qui ne sont pas représentées aujourd'hui dans les modèles climatiques).
- La prise en compte d'un couplage spatial entre les flux de carbone simulés par l'océan et la biosphère continentale avec l'atmosphère (en incluant éventuellement d'autres espèces chimiques réactives telles que aérosols biogéniques, feu de forêts, cycle du l'azote etc.).

Dans le Chapitre 1, j'ai montré qu'une grande partie de ces développements ont intégré CNRM-ESM2-1, le modèle du système Terre de seconde génération du CNRM dont j'ai coordonné le développement. Toutefois certains développements n'ont pas pu être menés à bien, soit par manque de temps soit par un manque d'expertise et de connaissance qui auraient pu être apportées par des collaborations extérieures. C'est par exemple le cas pour la modélisation des propriétés optiques du carbone coloré dans l'océan pour lequel une collaboration avec des experts du transfert radiatif dans l'océan aurait permis d'avancer sur ce point.

Sans oublier de mener à bien ce développement, je présente dans la suite de cette section quelques pistes de développements que j'envisage pour les futures versions du modèle système Terre du CNRM. Ces dernières peuvent être cartographiées selon 3 angles : amélioration des composantes existantes, ajout de couplage entre les composantes du système Terre, et anthropisation des modèles.

De ce fait, ce chapitre n'abordera pas l'amélioration des composantes physiques ni les questions relatives à l'augmentation de la résolution des modèles du système Terre. Ces dernières étant essentielles au développement du modèle couplé de climat et du modèle du système Terre (CNRM-CM et CNRM-ESM) pour les années à venir, je les considère comme des activités scientifiques incontournables du groupe climat du CNRM.

En ce qui concerne les questions relatives à l'augmentation de la résolution des modèles du système Terre, la balle se trouve aujourd'hui dans le camp des numériciens. Les techniques numériques permettent d'amoindrir le coût numérique de certaines composantes du système Terre, comme la biogéochimie marine. Le travail de post-doc de Sarah Berthet sur une méthode d'agrégation de grille pour la biogéochimie marine dans l'océan a permis de réduire le coût

numérique de la composante océanique du modèle du système Terre du CNRM par 2,7 (Berthet et al., 2019). Le recrutement de Sarah Berthet dans le groupe climat va permettre de poursuivre nos recherches dans cette voie. C'est pour cette raison que je n'aborde que de manière succincte les questions relatives à la résolution des modèles dans ce dernier chapitre.

En ce qui concerne l'amélioration des composantes existantes, les progrès sur la compréhension des processus et également l'augmentation substantielle des bases d'observations (incluant les données satellites) plaident en faveur d'une refonte partielle des modèles de cycle du carbone. Dans cet objectif, l'utilisation des statistiques et de l'intelligence artificielle semble aujourd'hui incontournable (Figure 6.1).

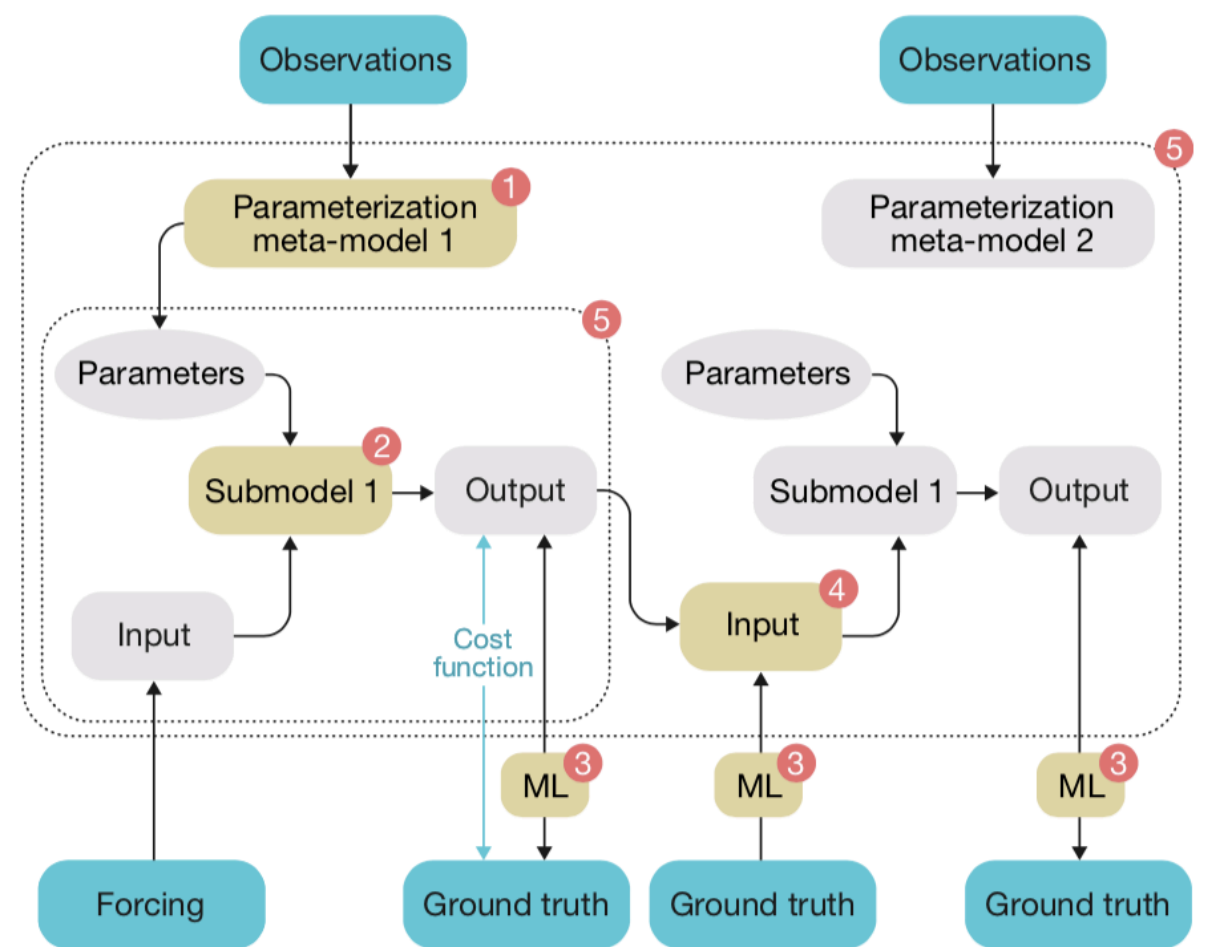


FIGURE 6.1 – Schéma de principe issue de Reichstein et al. (2019) montrant l'utilisation possible de méthode d'intelligence artificielle dans l'amélioration de modèle (cercle rouge) ou l'optimisation des sorties de modèles (sigle ML pour *Machine Learning*).

C'est une trajectoire que nous arpentons déjà dans le cadre de la thèse de Matthias Rocher où nous avons revu la manière de représenter la phénologie des cultures à l'échelle globale qui sont soit sur-paramétrisées à l'échelle locale soit ajustées de manière rudimentaire dans les modèles de surface globaux. Disposant de données satellitaires à haute résolution spatiale et temporelle sur plus de 10 ans, nous avons utilisé les statistiques (ici boosting et data-mining) pour élaborer des relations statistiques permettant de capturer le démarrage de la saison de croissance des cultures à l'échelle globale (Rocher et al., submitted). Notre approche améliore la modélisation

des cycles phénologiques des cultures sur les sites FluxNet (qui sont traités comme des données indépendantes).

Dans le cadre de ce projet de recherche, je souhaiterais progresser dans cette approche en collaborant avec des experts du *Max Planck Institute* tel que Peter Landschützer, notamment dans le but de revisiter les échanges air-mer de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre.

L'ajout de couplage entre les composantes du système Terre me semble être aussi une piste intéressante pour mieux explorer les incertitudes et les rétroactions du système climatique dans les projections futures tout en contraignant la complexité des modèles actuels. Dans CNRM-ESM2-1, seul le CO₂ présente un couplage « réaliste » avec des échanges entre les 3 grands réservoirs de carbone que sont l'océan, les surfaces continentales et l'atmosphère. L'idée ici serait de poursuivre l'intégration des couplages en rapport avec les aérosols et la chimie de l'atmosphère en collaboration avec Pierre Nabat, Martine Michou, David Saint-Martin et les équipes de chimie atmosphérique du CNRM.

Dans le cadre du projet Européen CRESCENDO, nous avons commencé avec Sarah Berthet à étudier l'intérêt du couplage aérosols-biogéochimie en termes de dépôt de poussières désertiques sur l'océan dans un modèle d'océan à haute résolution (25 km). En effet, la majeure partie des études ayant regardé cette question ont utilisé des modèles à basse résolution avec un couplage à relativement basse fréquence. Or, les observations comme les résultats de modèles océaniques à haute résolution suggèrent un rôle différent de la limitation des nutriments en zone tourbillonnaire (Yamamoto et al., 2018; Frenger et al., 2018).

Dans le cadre du projet LEFE PISCO (pilote par Olivier Aumont), nous avons prévu de développer une version de PISCES-gas disposant d'un module d'émission de composés organiques volatiles qui jouent un rôle important dans la chimie de l'atmosphère. Les travaux de Ludivine Conte (LSCE) sur le monoxyde de carbone vont dans ce sens (Conte et al., 2019). Il est donc envisageable à plus long terme d'envisager un couplage entre la chimie de l'atmosphère et le cycle du carbone.

Enfin, il me semble important que les processus anthropiques soient représentés de manière réaliste dans les modèles du système Terre, surtout si la résolution de ces derniers s'accroît dans les années à venir.

Dans la liste des processus anthropiques, je pense que les processus en lien avec l'usage des terres, l'économie de l'environnement et l'usage de l'eau sont fondamentaux pour évaluer au mieux les contraintes géophysiques des scénarios à bas niveau d'émissions. En effet, avec des politiques climatiques donnant une valeur économique aux émissions de gaz à effet de serre tels que le CO₂ (Sohngen and Sedjo, 2006) et aussi potentiellement à l'eau (Moore et al., 1994), les pratiques agricoles vont évoluer (e.g., Wise et al., 2009). En fonction des arbitrages économiques et des conditions climatiques et environnementales, des contraintes énergétiques et de la capacité de séquestration de CO₂, d'importants changements de pratiques agricoles sont à prévoir. L'élevage sera également impacté par une politique climatique, ce qui modifiera les changements d'usage des sols entre pâtures et cultures et les pratiques d'irrigation. Enfin, les flux de commerciaux seront modifiés, avec une redistribution de la production entre grandes régions (Tilman et al., 2002; Meijl et al., 2006). Ces modifications dans les usages des sols (incluant l'irrigation) à leur tour impactent le climat, le cycle hydrologique mais aussi le cycle du carbone (Alkama and Cescatti, 2016; DeFries and Eshleman, 2004; Naudts et al., 2016). Il est important de représenter ces évolutions de manière intégrée dans la future génération de modèles de surfaces continentales afin de pouvoir prendre en compte les rétroactions entre conditions de surface et changements

d'usage des sols et de pratiques agricoles. Dans le cadre de la thèse de Matthias Rocher, nous avons initié ce développement en collaboration avec Patrice Dumas du Centre International de Recherche en Environnement et Développement (CIRED). Nous avons fait dialoguer le modèle de surface continentales SURFEX et le modèle macro économique d'usage des sols NLU (Nexus Land-Use) dans le but d'étudier les interactions entre le climat, l'économie de l'environnement (arbitrage économique, coût du carbone, demande pour l'alimentation) et l'usage des sols.

À plus long terme l'intégration des villes dans les modèles du système Terre semble être pertinente pour faire le trait d'union avec les modèles macro-économiques d'évaluation intégrée (*Integrated Assessment Model*, IAM, en anglais). En effet, la plupart des IAM traitent la mitigation du changement climatique de manière globale ou, au mieux, sur de grandes régions. Pourtant, si une réponse des nations au changement climatique venait à se mettre en place, elle commencerait dans les villes où les leviers d'atténuation des émissions sont nombreux (toiture végétalisées, électrification des transports, isolation des bâtiments, etc.). Même si l'impact des villes sur le climat global reste modeste (Library et al., 2011; Daniel et al., 2018), leur effet sur les émissions de carbone peut être important (Blum, 2017). Il serait donc intéressant de disposer d'outils pour les évaluer. Ce travail sera initié avec l'équipe VILLE du CNRM qui développe un modèle de ville à l'état de l'art. Toutefois, ce genre de développement n'aura de sens que si les échelles spatiales résolues par les futures générations de modèle de climat sont pertinentes pour ce genre d'interactions. La littérature scientifique et les tests numériques avec les modèles régionaux du CNRM tels que AROME suggèrent qu'il faudrait atteindre une résolution kilométrique pour qu'une rétroaction des villes puissent se mettre en place dans un modèle de climat.

6.3 Modélisation du système Terre : de l'évaluation à la vérification

Je souhaiterais également développer une nouvelle approche d'évaluation des modèles du système Terre dans les futures années : la vérification. Elle consisterait à étendre l'approche utilisée de la prévision météorologique au système Terre.

La vérification des prévisions des variables du système Terre s'adosse à un système d'assimilation des variables du système Terre. Un tel système est encore à bâtir car à ma connaissance il n'existe aucune plateforme de prévision couplée assimilant des observations du système Terre et réalisant des prévisions couplées. En effet, les plateformes existantes dérivent généralement des systèmes de prévision semi-opérationnels focalisés sur des variables climatiques ou météorologiques. Dans le meilleur des cas, c'est l'assimilation de données climatiques qui permet d'ajuster des champs biogéochimiques comme dans l'étude que j'ai réalisée durant ma thèse avec le modèle de l'IPSL (Séférián et al., 2014a) ou celle faite par le MPI Hambourg quelques années après (Li et al., 2016).

Pour être mis en place, un tel système devrait dépasser certaines limites. La première concerne l'assimilation de données biogéochimiques, biologiques ou toutes autres variables du système Terre. Cela pose des questions de comparabilité entre les réservoirs ou variables d'état modélisés et ceux observés. Un des exemples les plus évidents de ce problème est la biomasse végétale. La biomasse totale aérienne est observée par satellite via des mesures de profondeur de végétation (Liu et al., 2015). Toutefois son allocation dans les différents réservoirs de biomasse d'un modèle de surface continentale tel que SURFEX demande de poser des hypothèses fortes en termes d'allocation de carbone. La seconde est plutôt un goulot d'étranglement technique et technologique. En effet, elle concerne plutôt le système de vérification elle-même car elle suppose

l'approvisionnement d'une quantité de données à des échéances très régulières et potentiellement le traitement de données climatiques essentielles à très haute résolution. Le dépassement de cette limite ne peut s'appréhender que par une approche séquentielle. C'est pourquoi je pense qu'il est nécessaire d'aborder la vérification des composantes du système Terre fluide par fluide avant de mettre en place une plateforme couplée. Cette approche « par fluide » ou domaine géophysique permettra de s'appuyer sur l'expertise existante chez MERCATOR-Océan (Coralie Perruche) ou au sein du CNRM.

Il est probable que d'autres facteurs limitants viennent à compliquer la mise en place d'une telle plateforme. C'est pourquoi les études de prévisibilité saisonnière à pluri-annuelle représentent une première étape importante d'évaluation fine des modèles permettant d'aller vers leur vérification. Dans cette perspective, je souhaite poursuivre les collaborations mise en place avec le CERFACS (Emilia Sachez-Gomez) et le MPI Hambourg (Tatiana Ilyina, Hongmei Li) dans le cadre des projets Européens TRIATLAS et CCICC. Ces projets visent à évaluer les capacités prédictives des modèles du système Terre de manière rétrospective et donc de vérifier les prévisions annuelles d'évolution du cycle du carbone ou de la biogéochimie marine face aux observations disponibles.

6.4 Vers un cycle du carbone opérationnel

En accord avec les pistes de recherche évoquées dans les sections précédentes, je souhaiterais aller plus loin dans la mise en place d'un cycle du carbone opérationnel.

Comme expliqué dans ce manuscrit, le cycle du carbone représente une variable géophysique qui fait l'interface entre le climat, les impacts et les mesures de mitigation/économie de l'environnement. L'utilisation des modèles du système Terre dans un contexte quasi-opérationnel serait un outil de choix pour aider à la mise en place de stratégies de mitigation et/ou d'adaptation aux changements climatiques.

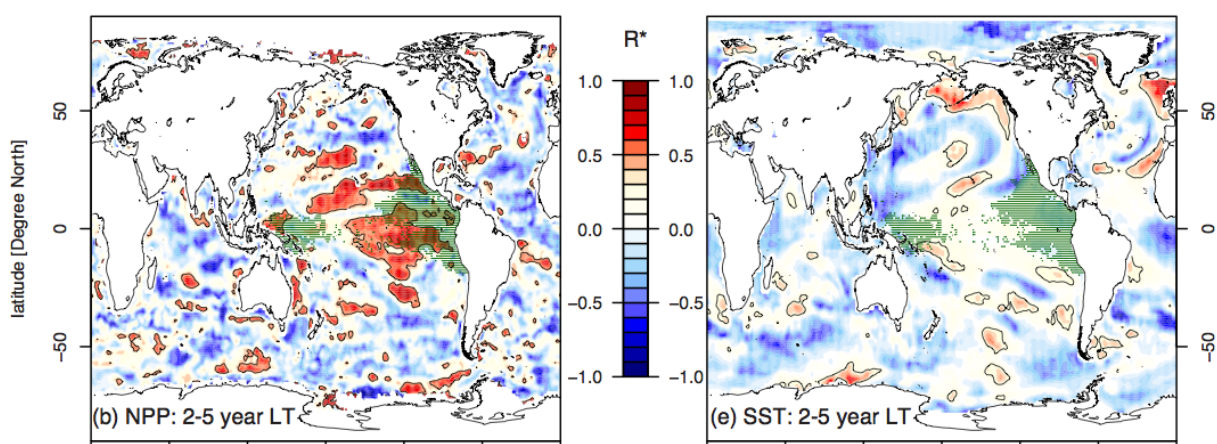


FIGURE 6.2 – Confrontation des capacités prédictives de IPSL-CM5A-LR pour la productivité primaire (gauche) et la température de surface de la mer (droite) en moyenne sur les années 2 à 5. Les aplats de couleurs représentent la corrélation carrée multipliée par le signe de la corrélation. Les zones hachurées représentent les principales zones de pêche du thon sur la période 1991-2011. Cette Figure est issue de (Séférian et al., 2014a).

Dans l'étude publiée en 2014 (Séférian et al., 2014a), nous avons évalué la capacité à prévoir les variations naturelles de la production primaire du phytoplancton (à la base de la chaîne trophique marine) dans le Pacifique équatorial (Figure 6.2). Même s'il ne s'agit que d'une démonstration conceptuelle réalisée avec un seul modèle, nos résultats ouvrent des perspectives qui n'avaient pas encore été explorées, plaidant pour la mise en place de stratégies de pêche raisonnée pluri-annuelles à partir des prévisions de modèles du système Terre.

Je souhaite poursuivre ce travail en allant plus loin dans la fourniture de variables pertinentes pour les décideurs. En particulier, le couplage avec des modules de ressources agricoles ou halieutiques et leur utilisation dans des cas de gestion globale du changement climatique (taxe carbone, géoingénierie) pourrait permettre de prévoir à des échelles de temps pertinentes des variables affectant l'homme directement.

Certaines actions sont déjà inscrites dans mon travail des 4 prochaines années avec mon implication dans le projet Européen TRIATLAS (piloté par Noel Keenlyside, Université de Bergen) dans lequel je coordonne avec Emilia Sanchez-Gomez (CERFACS) un thème de recherche sur la prévision saisonnière à décennale des ressources halieutiques. Dans ce projet nous prévoyons de nourrir des modèles d'écosystèmes comme APECOSM (développé par Olivier Maury à MARBEC) par des prévisions de CNRM-ESM2-1 (Figure 6.3).

J'envisage également de contribuer aux études de prévisibilité potentielle des flux de carbone menées par Tatiana Ilyina (MPI), Laurent Bopp (IPSL) et Raffaele Bernardelo (BSC) dans le cadre du projet H2020 CCICC (Piloté par Pierre Friedlingstein, Université d'Exeter). Ce projet vise à étudier la prévisibilité des flux de carbone simulés par des modèles du système Terre avec une approche comparable à celle que nous avons utilisé dans Séférian et al. (2018b).

La confrontation des prévisions issues de différentes plateformes de prévision représente une étape essentielle pour évaluer la robustesse des prévisions et raffiner les prévisions annuelles du *Global Carbon Project* (e.g., Le Quéré et al., 2018).

6.5 Modélisation du système Terre : vers la prise en compte des rétroactions activités humaines-climat

Dans cette dernière section, j'aimerais discuter de la place de la modélisation dans le contexte du changement climatique planétaire. La question qui sous-tend cette discussion est la suivante : pourquoi développons-nous des modèles du système Terre de plus en plus complexes et à des résolutions de plus en plus fines ?

En effet, le développement des réseaux d'observations internationaux, le déploiement de satellites ou de flotteurs instrumentés ces dernières années permettent de disposer d'une énorme quantité de données observées pour comprendre le climat récent et les grands équilibres climatiques qui le régissent sans avoir recours à l'utilisation de modèles.

Cependant, les modèles restent encore aujourd'hui des outils précieux pour aller plus loin que les observations disponibles. Ils permettent d'extraire des informations dans des milieux dont les observations sont encore rares (e.g., l'océan profond ou de la haute stratosphère) et de désenchevêtrer certains mécanismes ou téléconnexions climatiques afin de mieux comprendre leur rôle dans l'évolution du climat récent.

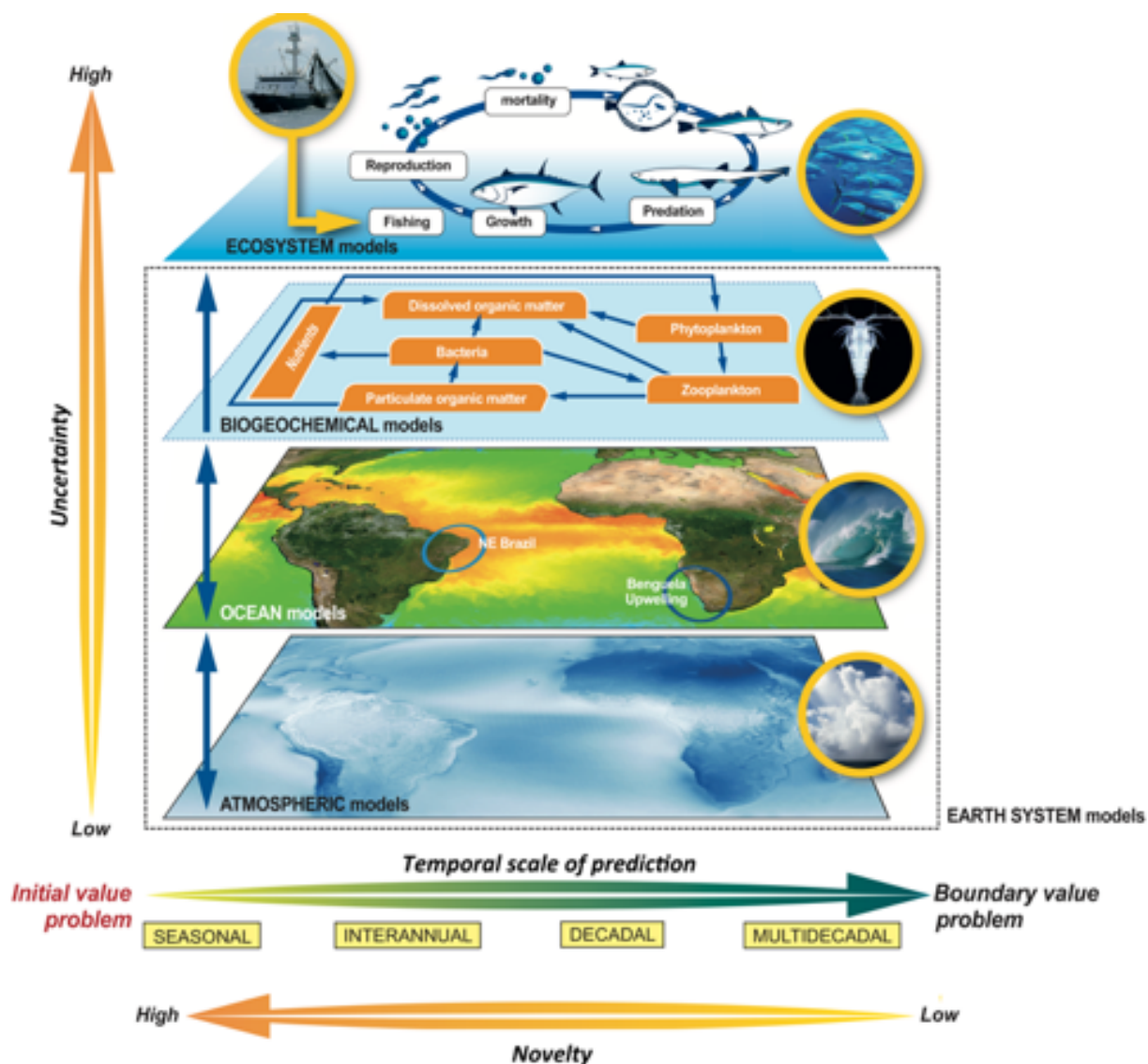


FIGURE 6.3 – Représentation schématique des différents objectifs et niveaux de complexité de modèles du projet Européen TRIATLAS.

D'autre part, les modèles restent également les seuls véhicules disponibles pour explorer les scénarios futurs de développement de nos sociétés et des émissions de gaz à effet de serre et aérosols associés. Je pense en effet qu'entre le 4ème et le 5ème rapport du GIEC, avec l'introduction des scénarios dits de « mitigation », le centre de gravité de l'étude du climat par l'analyse de résultats de modèles s'est déplacé de la compréhension des mécanismes du climat vers la compréhension des solutions et des *trade-offs*. Ici, je tiens à signaler que cela ne veut pas dire qu'il faut délaisser la compréhension des mécanismes mais qu'il faut les utiliser dans un autre contexte.

Par exemple, la mise à disposition de résultats de modèles basés sur des scénarios d'*overshoot* pour le reste de la communauté scientifique et société civile pose beaucoup de questions. Le système climatique est-il réversible? Peut-on contrer le réchauffement planétaire? Comment le système Terre pourrait-il réagir dans une situation où les émissions de CO₂ viendraient à diminuer? Combien d'années faudrait-il pour détecter les « bienfaits » de telles mesures de

réduction des émissions ? Même si un corpus de littérature est en train de se bâtir sur ces sujets (Zickfeld and MacDougall, 2016; Zickfeld et al., 2012; Krasting et al., 2014; Zickfeld et al., 2013; Boucher et al., 2012; Frölicher and Joos, 2010; Macdougall, 2013), il reste beaucoup de questions qui n'ont pas été défrichées ; certaines n'ont jamais été abordées avec des modèles du système Terre de nouvelle génération.

D'autre part, dans ce type de scénarios, l'utilisation massive de techniques d'émissions négatives sur continent comme sur océan reste un sujet relativement nouveau dans la littérature scientifique. Les mécanismes de grande échelle mis en jeu sont quasiment inconnus et ne peuvent s'étudier que par le biais de modèles du système Terre. Le déploiement de cultures de biomasse pour séquestrer du CO₂ ne risque-t-il pas de limiter les ressources en eau et en nutriments nécessaires pour le bon fonctionnement des écosystèmes naturels et des sociétés humaines ? De même, quelles sont les conséquences et limites des techniques d'alcalinisation de l'océan (Ilyina et al., 2013; Keller et al., 2014; Hauck et al., 2016) pour lesquelles aucun analogue passé (même aux échelles de temps paléo-climatique) n'est disponible ?

Ici la question n'est pas de savoir si l'on peut limiter le réchauffement climatique à 1,5°C ou 2°C mais de réellement comprendre :

- les tenants et les aboutissants de nos leviers d'actions pour lutter contre le réchauffement global sans avoir recours à des solutions radicales de géo-ingénierie.
- les bases physiques et chimiques de la mitigation climatique (incluant l'analyse des incertitudes).

À mon sens, une question importante n'a toutefois pas encore été abordée à ce jour : est-ce que nos modèles du système Terre actuels sont de taille à attaquer ces problématiques scientifiques ? De mon point de vue, on peut répondre à la fois « oui » et « non » à cette question car elle dépend du *fit for purpose* des modèles. En effet, pour certaines questions, la génération actuelle de modèles semble pertinente pour répondre aux questions sur la réversibilité du système climatique même si de nombreuses incertitudes de modélisation restent à contraindre. Poursuivre les développements des modèles du système Terre dans les directions discutées en première partie permettrait d'aller plus loin dans l'étude des solutions et de leurs conséquences climatiques.

Par contre, la génération actuelle de modèles de climat est incapable de représenter les interactions entre le climat et la sphère anthropique. En effet, l'homme et ses activités sont vus comme un forçage externe du système climatique. Pourtant, dans le cas de scénarios de « mitigation », les changements de trajectoires des émissions de gaz à effet de serre et aérosols supposent des changements profonds de nos sociétés et comportements qui sont implicitement liés à la perception du risque climatique. Prendre en compte de telles interactions demande un changement de paradigme dans notre manière de modéliser le climat et d'intégrer la sphère anthropique comme une composante interne du système. On parle alors de *Human-Earth interactions*.

Au CNRM, des travaux de ce type avaient été initiés au moment de la thèse d'Aurore Voldoire à travers l'étude de l'impact des changements d'usage des sols sur le climat simulé par un couplage entre le modèle de climat CNRM-CM3 et le modèle macroéconomique IMAGE2.2 (Voldoire et al., 2007). Les résultats avaient montré qu'un couplage à relativement basse fréquence entre le climat (simulé par CNRM-CM3) et la sphère anthropique (représentée par IMAGE2.2) n'avait qu'un faible impact sur la trajectoire des émissions de gaz à effet de serre et sur le climat global. Une des principales limitations mises en avant dans ce travail était qu'un couplage à basse fréquence ne permettait pas de prendre en compte l'occurrence d'évènements extrêmes,

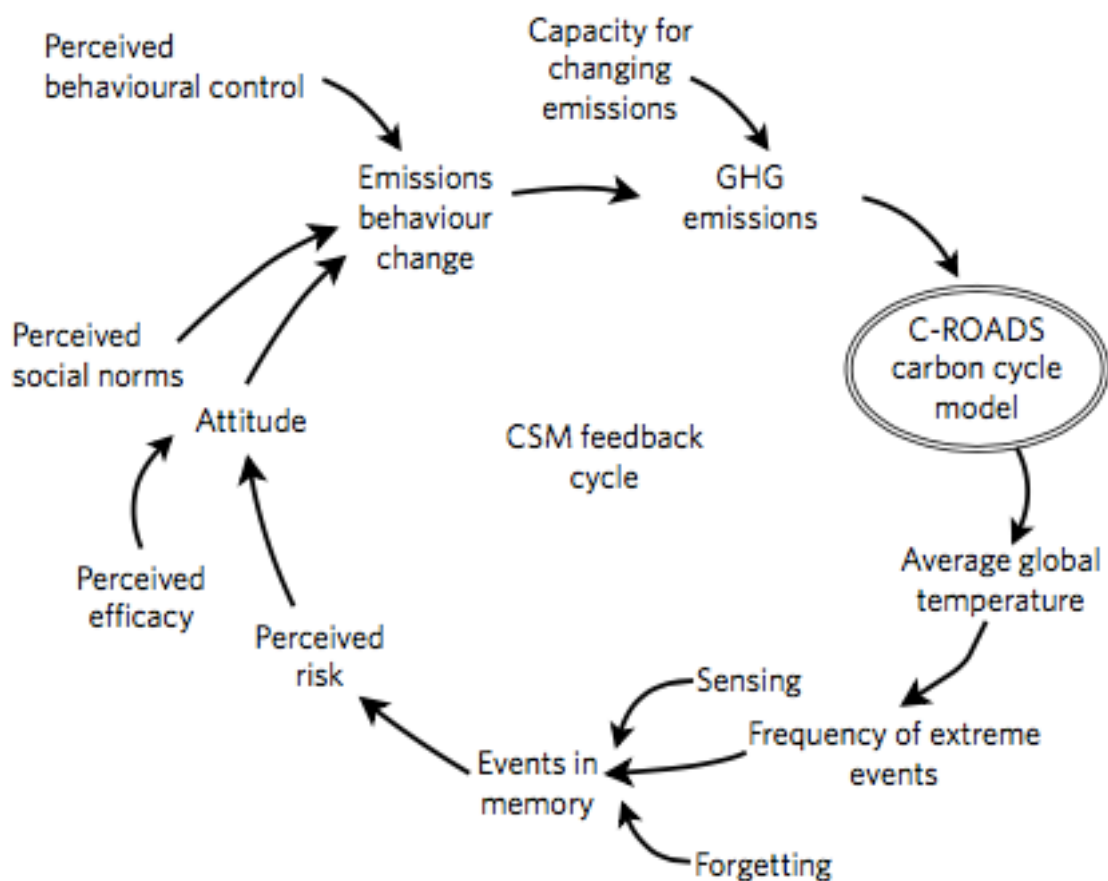


FIGURE 6.4 – Représentation mécaniste de la rétroaction société-climat-émissions telle que simulé par le premier modèle CSM décrit dans Beckage et al. (2017). On voit que la fenêtre de couplage entre les comportements et le climat provient de la manière de percevoir les changements de fréquence et d'intensité des événements extrêmes. Cette étude montre l'importance des travaux d'attribution d'événements extrêmes au changement climatique.

beaucoup plus délétère pour nos sociétés et nos moyens de productions agricoles et énergétiques. Des travaux similaires ont été réalisés plus récemment au *Department of Energy* aux États-Unis en couplant le modèle du NCAR avec le modèle macro-économique GCAM (e.g., Collins et al., 2015). Ces derniers ne contredisent pas les résultats de Voltaire et al. (2007) mais suggèrent que certaines interactions entre le climat et la sphère anthropique sont pertinentes aux échelles décennales et centennales (agriculture, irrigation, infrastructures etc...). Ces travaux suggèrent toutefois que le couplage entre le climat et la sphère anthropique simulé par ce genre de modèles reste modeste.

Un travail pionnier en la matière de Beckage et al. (2017) a permis de montrer qu'un couplage plus fort se met en place lors de la prise en compte des comportements sociaux qui modifient l'équilibre entre la demande et la fourniture d'énergie représenté dans les modèles macroéconomiques. Les auteurs de cette étude montrent comment l'impact et la fréquence des événements extrêmes sur les sociétés peuvent rétroagir sur les émissions de gaz à effet de serre (Figure 6.4). Beckage et al. (2017) suggèrent que les incertitudes sociétales liées aux comportements humains face aux risques climatiques (principalement les extrêmes climatiques) sont d'un ordre de

grandeur comparable aux incertitudes physiques du système climatique : 3.4–6.2°C pour les incertitudes sociétales et 2.8-3.5°C pour les incertitudes physiques.

L'inclusion de modèles sociaux pourrait permettre de fournir une évaluation comparée des scénarios futurs et sans doute d'arriver à assigner des niveaux de probabilité sur l'occurrence de tel ou tel scénario futur. Tenir compte de ces interactions entre le climat et la sphère anthropique pourrait permettre d'évaluer les échelles de temps nécessaires pour que nos émissions de gaz à effet de serre commencent à décliner compte tenu de nos normes sociales et de notre système macro-économique.

Cette partie représente bien sûr une perspective de très long terme, mais ce changement de paradigme me semble être une piste de recherche intéressante du point de vue de sa transversalité. La mise en place de ce projet demanderait de nombreuses collaborations et partenariats à l'échelle nationale mais pourrait également s'aligner avec les objectifs d'une structure internationale comme *Future Earth*.

De manière plus pragmatique, l'inclusion de composantes anthropiques dans les modèles du système Terre constitue la première étape de ce projet. Pour cela, il faudrait d'abord poursuivre le travail de Matthias Rocher sur le couplage entre SURFEX et NLU. Les travaux sur la représentation de l'irrigation permettraient de mieux modéliser la composante anthropique en rapport avec l'agriculture. Dans un second temps, l'inclusion d'un modèle de ville permettrait par exemple d'évaluer la demande énergétique des villes en réponse au changement climatique compte tenu des normes sociales et des infrastructures. Il s'agit d'une information pertinente qui permettrait d'évaluer le potentiel d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre des villes. Dans ce contexte, une meilleure collaboration avec les experts du climat urbain au CNRM pourrait être un atout de taille.

À plus long terme, il serait envisageable d'avancer sur ce thème à travers un projet de science participative relayé par les centres météorologiques permettant de collecter des données sur la perception d'un événement climatique marquant (vagues de chaleur, sécheresse, etc. . .). Il serait utile de quantifier comment des personnes perçoivent ces événements en l'attribuant (à tort ou à raison) au changement climatique. Chiffrer de manière qualitative l'effort potentiel et effectif des personnes sondées permettrait d'évaluer la force de la rétroaction entre la sphère anthropique et le climat.

Ces perspectives de recherche me conduisent ainsi à remettre en question le paradigme dominant en modélisation climatique selon lequel l'humanité et ses activités constituent un forçage externe du système Terre. Au contraire, il faut maintenant considérer que l'humanité et ses activités ne sont pas exogènes au système Terre mais représentent une de ses composantes capable de répondre aux variations climatiques. Un tel changement de paradigme demanderait d'importantes modifications de nos outils de modélisation en intégrant petit à petit un volet de modélisation sociétale des activités humaines dont l'impact sur l'environnement définit l'Anthropocène.

Curriculum Vitae Détaillé

Sommaire

7.1	Parcours Professionnel	78
7.2	Parcours scolaire	78
7.3	Enseignements	78
7.4	Encadrements	79
7.5	Administration de la recherche	79
7.6	Publications	79
7.7	Conférences	86

ROLAND SÉFÉRIAN

Birthdate : December 4, 1982

Citizenship : French

Address : Centre National de Recherches Météorologiques

42 Av Gaspard Coriolis, 31057 Toulouse, France.

Telephone : +33 (0)5 61 07 99 32

E-mail : roland.seferian@meteo.fr, rseferian.cnrm@gmail.com

7.1 Parcours Professionnel

Sep 2013–present : Researcher in Earth System modelling; carbon cycle modelling at CNRM, Climate dep. Toulouse, France.

Jul 2013–Oct 2016 : Visiting scientist at Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement, Department of Marine Biogeochemistry and Climate, Gif-sur-Yvette, France.

Sep 2010–Jul 2013 : PhD candidates at Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement, Department of Marine Biogeochemistry and Climate, Gif-sur-Yvette, France. (advisor : Laurent Bopp)

Feb 2010–Mai 2010 : Internship at Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement, Department of Marine Biogeochemistry and Climate, Gif-sur-Yvette, France. (advisor : Laurent Bopp)

7.2 Parcours scolaire

Sep 2010–Jul 2013 : PhD, Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement, Department of Marine Biogeochemistry and Climate, Gif-sur-Yvette, France. Supervisor : Laurent Bopp.

Sep 2009–Aug 2010 : Master Degree in Oceanography, Marine biogeochemistry and Climatology at Paul Sabatier University - Toulouse III, Toulouse, France.

Sep 2008–Aug 2010 : Engineer degree in Meteorology and oceanography from Ecole Nationale de la Météorologie, Toulouse, France.

Sep 2007–Aug 2008 : Master Degree in Oceanography and Mathematical ecology at Centre d'Océanologie de Marseille – Aix-Marseille II, Marseille, France.

7.3 Enseignements

2016-present : Lecturer in Climate Simulation at Paul Sabatier University, Toulouse, France.

2014 : Lecturer in Climate at Ocean-Education summer school, IUEM and Brest University, Brest, France.

2011-2012 : Lecturer in Oceanography and Climate, Master MSETTE, University de Versailles Saint-Quentin (UVSQ), Versailles, France

7.4 Encadrements

Post-docs :

- 2018-2019** : Emilie Joetzjer (post-doctoral at CNRM) : Assessing the response of land vegetation to climate change. Co-advising with C. Delire (CNRM).
- 2017-2019** : Sarah Berthet (post-doctoral at CNRM) : Development of an high-resolution ocean-biogeochemical model.
- 2017-2018** : Samuel Quesada (post-doctoral at CNRM) : Evaluation of atmospheric CO₂ as simulated by Earth system models. Co-advising with P. Ricaud (CNRM).
- 2013-2015** : Sunghye BAEK (post-doctoral at IPSL, Paris, France) : Development of an ocean surface albedo parameterization for Earth system models. Co-advising with O. Boucher (IPSL, France).

PhD :

- 2016-2019** : Matthias ROCHER (PhD of Toulouse University) : Assessing the role of agricultural practices to mitigate climate change within global modelling.
- 2015-2018** : Maxime PLAZZOTTA (PhD of Toulouse University) : Impacts of solar radiation management on the Earth system : Focus on carbon and water cycles.

Master :

- 2016** : Matthias ROCHER (MS Thesis of Engineer School ENM) : Impact of mitigation strategies on future climate projections.
- 2015** : Adrien COLOMB (MS Thesis of Engineer School ENM) : The seasonal response of the land and ocean carbon cycles to solar radiation management. Co-advising with A. Lenton (CSIRO, Australia).
- 2015** : Cécile PORCHIER (MS Thesis of Toulouse University) : Development of a semi-empirical wild fire module, response to climate change.

7.5 Administration de la recherche

Language skills : Fluent English, notions of German.

Active Grants : European H2020 CRESCENDO project (2015-2020).
European H2020 CONSTRAIN project (2019-2022).
European H2020 COMFORT project (2019-2022).
European BG08 TRIATLAS project (2019-2022).

Reviewer : Biogeosciences, Earth System Science Data, Geophysical Research Letters, Journal of Climate, Geoscientific Model Development, Global Biogeochemical Cycles, Journal of Geophysical Research - Oceans, Nature Climate Change, Nature, Science, PNAS, Research funding Agencies (NSERC, NSF, ANR).

Others : External collaborator for UK NERC.

7.6 Publications

Peer-review papers :

Published :

1. Rogelj, J., Forster, P.M., Kriegler, E., Smith, C.J., **Séférian, R.** : Estimating and tracking the remaining carbon budget for stringent climate targets. *Nature*, 10.1038/s41586-019-1368-z, 2019.
2. DeVries, T., Le Quéré, C., Andrews, O., Berthet, S., Hauck, J., Ilyina, T., Landschützer, P., Lenton, A., Lima, I. D., Nowicki, M., Schwinger, J., **Séférian, R.** : Decadal trends in

- the ocean carbon sink. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 201900371, doi :10.1073/pnas.1900371116, 2019.
3. Plazzotta, M., **Séférian, R.** and Douville, H. : Impact of Solar Radiation Modification on allowable CO₂ emissions : what can we learn from multi-model simulations?. *Earth's Future*, 7., <https://doi.org/10.1029/2019EF001165>, 2019.
 4. Voldoire, A., Saint-Martin, D., Sénési, S., Decharme, B., Alias, A., Chevallier, M., Colin, J., Guérémy, J.-F., Michou, M., Moine, M.-P., Nabat, P., Roehrig, R., Salas y Mélia, D., **Séférian, R.**, Valcke, S., Beau, I., Belamari, S., Berthet, S., Cassou, C., Cattiaux, J., Deshayes, J., Douville, H., Ethé, C., Franchisteguy, L., Geoffroy, O., Lévy, C., Madec, G., Meurdesoif, Y., Msadek, R., Ribes, A., Sanchez-Gomez, E., Terray, L., Waldman, R. : Evaluation of CMIP6 DECK experiments with CNRM-CM6-1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11. <https://doi.org/10.1029/2019MS001683>, 2019.
 5. Berthet, S., **Séférian, R.**, Bricaud, C., Chevallier, M., Voldoire, A. and Ethé, C. : Evaluation of an online grid-coarsening algorithm in a global eddy-admitting ocean-biogeochemical model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11. <https://doi.org/10.1029/2019MS001644>, 2019.
 6. Decharme, B., Delire, C., Minvielle, M., Colin, J., Vergnes, J.-P., Alias, A., Saint-Martin, D., **Séférian, R.**, Sénési, S., Voldoire, A. : Recent changes in the ISBA-CTRIP land surface system for use in the CNRM-CM6 climate model and in global off-line hydrological applications. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11. <https://doi.org/10.1029/2018MS001545>, 2019.
 7. Conte, L., Szopa, S., **Séférian, R.**, and Bopp, L. : The oceanic cycle of carbon monoxide and its emissions to the atmosphere, *Biogeosciences*, 16, 881-902, <https://doi.org/10.5194/bg-16-881-2019>, 2019.
 8. Bastos, A., Friedlingstein, P., Sitch, S., Chen, C., Mialon, A., Wigneron, J.-P., Arora, V. K., Briggs, P. R., Canadell, J. G., Ciais, P., Chevallier, F., Cheng, L., Delire, C., Haverd, V., Jain, A. K., Joos, F., Kato, E., Lienert, S., Lombardozzi, D., Melton, J. R., Myneni, R., Nabel, J. E. M. S., Pongratz, J., Poulter, B., Rödenbeck, C., **Séférian, R.**, Tian, H., van Eck, C., Viovy, N., Vuichard, N., Walker, A. P., Wiltshire, A., Yang, J., Zaehle, S., Zeng, N., Zhu, D. : Impact of the 2015/2016 El Niño on the terrestrial carbon cycle constrained by bottom-up and top-down approaches. *Philosophical Transactions of the Royal Society. B, Biological Sciences*, 373 (1760), 1-11. , DOI : 10.1098/rstb.2017.0304, 2018.
 9. Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Hauck, J., Pongratz, J., Pickers, P. A., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Canadell, J. G., Arneeth, A., Arora, V. K., Barbero, L., Bastos, A., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Doney, S. C., Gkritzalis, T., Goll, D. S., Harris, I., Haverd, V., Hoffman, F. M., Hoppema, M., Houghton, R. A., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A. K., Johannessen, T., Jones, C. D., Kato, E., Keeling, R. F., Goldewijk, K. K., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lienert, S., Liu, Z., Lombardozzi, D., Metzl, N., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S.-I., Neill, C., Olsen, A., Ono, T., Patra, P., Peregon, A., Peters, W., Peylin, P., Pfeil, B., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rocher, M., Rödenbeck, C., Schuster, U., Schwinger, J., **Séférian, R.**, Skjelvan, I., Steinhoff, T., Sutton, A., Tans, P. P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F. N., van der Laan-Luijkx, I. T., van der Werf, G. R., Viovy, N., Walker, A. P., Wiltshire, A. J., Wright, R., Zaehle, S., and Zheng, B. : Global Carbon Budget 2018, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 2141-2194, <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018>, 2018.
 10. Seneviratne, S. I., Rogelj, J., **Séférian, R.**, Wartenburger, R., Allen, M. R., Cain, M., Millar, R. J., Ebi, K. L., Ellis, N., Hoegh-Guldberg, O., Payne, A. J., Schleussner, C.-F.,

- Tschakert, P., Warren, R. F. : The many possible climates from the Paris Agreement's aim of 1.5 °C warming. *Nature* 06/2018 ; 558(7708)., DOI :10.1038/s41586-018-0181-4, 2018.
11. Plazzotta, M., **Séférian, R.**, Douville, H., Kravitz, B., Tjiputra, J. : Land surface cooling induced by sulfate geoengineering constrained by major volcanic eruptions. *Geophysical Research Letters*, 45, 5663–5671. <https://doi.org/10.1029/2018GL077583>, 2018.
 12. Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Pongratz, J., Manning, A. C., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Boden, T. A., Tans, P. P., Andrews, O. D., Arora, V. K., Bakker, D. C. E., Barbero, L., Becker, M., Betts, R. A., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Cosca, C. E., Cross, J., Currie, K., Gasser, T., Harris, I., Hauck, J., Haverd, V., Houghton, R. A., Hunt, C. W., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A. K., Kato, E., Kautz, M., Keeling, R. F., Klein Goldewijk, K., Körtzinger, A., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lima, I., Lombardozzi, D., Metzl, N., Millero, F., Monteiro, P. M. S., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S.-I., Nojiri, Y., Padin, X. A., Pregon, A., Pfeil, B., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Reimer, J., Rödenbeck, C., Schwinger, J., **Séférian, R.**, Skjelvan, I., Stocker, B. D., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F. N., van der Laan-Luijkx, I. T., van der Werf, G. R., van Heuven, S., Viovy, N., Vuichard, N., Walker, A. P., Watson, A. J., Wiltshire, A. J., Zaehle, S., and Zhu, D. : Global Carbon Budget 2017, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 405-448, <https://doi.org/10.5194/essd-10-405-2018>, 2018.
 13. **Séférian, R.**, Baek, S., Boucher, O., Dufresne, J.-L., Decharme, B., Saint-Martin, D., Roehrig, R. : An interactive ocean surface albedo scheme (OSAv1.0) : formulation and evaluation in ARPEGE-Climat (V6.1) and LMDZ (V5A), *Geosci. Model Dev.*, 11, 321-338, <https://doi.org/10.5194/gmd-11-321-2018>, 2018a.
 14. **Séférian, R.**, Berthet, S., Chevallier, M. : Assessing the decadal predictability of land and ocean carbon uptake. *Geophysical Research Letters*, 45, 2455–2466. <https://doi.org/10.1002/2017GL076092>, 2018b.
 15. **Séférian, R.**, Rocher, M., Guivarch, C., Colin, J. : Constraints on biomass energy deployment in mitigation pathways : The case of water scarcity. *Environmental Research Letters*, 13(5)., DOI :10.1088/1748-9326/aabcd7, 2018c.
 16. Kwiatkowski, L., Bopp, L., Aumont, O., Ciais, P., Cox, P. M., Laufkotter, C., Li, Y. and **Séférian, R.** : Emergent constraints on projections of declining primary production in the tropical oceans, *Nature Climate change*, advance online publication SP - EP -, doi :10.1038/nclimate3265, 2017.
 17. Henson, S. A., Beaulieu, C., Ilyina, T., John, J. G., Long, M., **Séférian, R.**, Tjiputra, J. and Sarmiento, J. L. : Rapid emergence of climate change in environmental drivers of marine ecosystems, *Nature Comm*, 8, 14682 EP -, doi :10.1038/ncomms14682, 2017.
 18. Napoly, A., Boone, A., Samuelsson, P., Gollvik, S., Martin, E., **Séférian, R.**, Carrer, D., Decharme, B. and Jarlan, L. : The interactions between soil–biosphere–atmosphere (ISBA) land surface model multi-energy balance (MEB) option in SURFEXv8 – Part 2 : Introduction of a litter formulation and model evaluation for local-scale forest sites, *Geosci. Model Dev*, 10(4), 1621–1644, 2017.
 19. Tommasi, D., Stock, C. A., Hobday, A. J., Methot, R., Kaplan, I. C., Eveson, J. P., Holsman, K., Miller, T. J., Gaichas, S., Gehlen, M., Pershing, A., Vecchi, G. A., Msadek, R., Delworth, T., Eakin, C. M., Haltuch, M. A., **Séférian, R.**, Spillman, C. M., Hartog, J. R., Siedlecki, S., Samhouri, J. F., Muhling, B., Asch, R. G., Pinsky, M. L., Saba, V. S., Kapnick, S. B., Gaitan, C. F., Rykaczewski, R. R., Alexander, M. A., Xue, Y., Pegion, K. V., Lynch, P., Payne, M. R., Kristiansen, T., Lehodey, P. and Werner, F. E. : Managing

- living marine resources in a dynamic environment : The role of seasonal to decadal climate forecasts, *Progress in Oceanography*, 152, 15–49, doi :10.1016/j.pocean.2016.12.011, 2017.
20. Lee, Y. J., Matrai, P. A., Friedrichs, M. A. M., Saba, V. S., Aumont, O., Babin, M., Buitenhuis, E. T., Chevallier, M., de Mora, L., Dessert, M., Dunne, J. P., Ellingsen, I., Feldman, D., Frouin, R., Gehlen, M., Gorgues, T., Ilyina, T., Jin, M., John, J. G., Lawrence, J., Manizza, M., Menkes, C. E., Perruche, C., Le Fouest, V., Popova, E., Romanou, A., Samuelsen, A., Schwinger, J., **Séférian, R.**, Stock, C. A., Tjiputra, J., Bruno Tremblay, L., Ueyoshi, K., Vichi, M., Yool, A. and Zhang, J. : Net primary productivity estimates and environmental variables in the Arctic Ocean : An assessment of coupled physical-biogeochemical models, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, n/a–n/a, doi :10.1002/2016JC011993, 2016.
 21. Le Quéré, C., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Sitch, S., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Manning, A. C., Boden, T. A., Tans, P. P., Houghton, R. A., Keeling, R. F., Alin, S., Andrews, O. D., Anthoni, P., Barbero, L., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Currie, K., Delire, C., Doney, S. C., Friedlingstein, P., Gkritzalis, T., Harris, I., Hauck, J., Haverd, V., Hoppema, M., Klein Goldewijk, K., Jain, A. K., Kato, E., Körtzinger, A., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lombardozzi, D., Melton, J. R., Metzl, N., Millero, F., Monteiro, P. M. S., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S.-I., O'Brien, K., Olsen, A., Omar, A. M., Ono, T., Pierrot, D., Poulter, B., Rödenbeck, C., Salisbury, J., Schuster, U., Schwinger, J., **Séférian, R.**, Skjelvan, I., Stocker, B. D., Sutton, A. J., Takahashi, T., Tian, H., Tilbrook, B., van der Laan-Luijkx, I. T., van der Werf, G. R., Viovy, N., Walker, A. P., Wiltshire, A. J., and Zaehle, S. : Global Carbon Budget 2016, *Earth Syst. Sci. Data*, 8, 605–649, <https://doi.org/10.5194/essd-8-605-2016>, 2016.
 22. Boucher, O., Bellassen, V., Benveniste, H., Ciais, P., Criqui, P., Guivarch, C., Le Treut, H., Mathy, S., **Séférian, R.** : Opinion : In the wake of Paris Agreement, scientists must embrace new directions for climate change research. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(27), 7287–7290, 10.1073/pnas.1607739113, 2016.
 23. Laufkötter, C., Vogt, M., Gruber, N., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S. C., Dunne, J. P., Hauck, J., John, J. G., Lima, I. D., **Séférian, R.**, and Völker, C. : Projected decreases in future marine export production : the role of the carbon flux through the upper ocean ecosystem. *Biogeosciences*, 13(13), 4023–4047, doi :10.5194/bg-13-4023-2016, 2016.
 24. Mao, J., Ribes, A., Yan, B., Shi, X., **Séférian, R.**, Ciais, P., Dai, Y., Dickinson, R. E., Douville, E., Gullede, J., Hoffman, F. M., Jin, M., Piao, S., Ricciuto, D. M., Thornton, P. E., Wang, B., Zhu, Z. Human-induced greening of the northern extratropical land surface. *Nature Climate Change* 06/2016 ; 6(10), DOI :10.1038/nclimate3056
 25. **Séférian, R.**, Gehlen, M., Bopp, L., Resplandy, L., Orr, J. C., Marti, O., Dunne, J. P., Christian, J. R., Doney, S. C., Ilyina, T., Lindsay, K., Halloran, P., Heinze, C., Segsneider, J., and Tjiputra, J. : Inconsistent strategies to spin up models in CMIP5 : implications for ocean biogeochemical model performance assessment, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1827–1851, doi :10.5194/gmd-9-1827-2016, 2016b.
 26. **Séférian, R.**, Delire, C., Decharme, B., Voldoire, A., Salas y Melia, D., Chevallier, M., Saint-Martin, D., Aumont, O., Calvet, J.-C., Carrer, D., Douville, H., Franchistéguy, L., Joetzjer, E., and Sénési, S. : Development and evaluation of CNRM Earth system model – CNRM-ESM1, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1423–1453, doi :10.5194/gmd-9-1423-2016, 2016a.
 27. Le Mézo, P., Lefort, S., **Séférian, R.**, Aumont, O., Maury, O., Murtugudde, R. and Bopp, L. : Natural variability of marine ecosystems inferred from a coupled climate to ecosystem

- simulation, *Journal of Marine Systems*, 153(C), 55-66. doi :10.1016/j.jmarsys.2015.09.004, 2016.
28. Le Quéré, C., Moriarty, R., Andrew, R. M., Peters, G. P., Ciais, P., Friedlingstein, P., Jones, S. D., Sitch, S., Tans, P., Arneeth, A., Boden, T. A., Bopp, L., Bozec, Y., Canadell, J. G., Chini, L. P., Chevallier, F., Cosca, C. E., Harris, I., Hoppema, M., Houghton, R. A., House, J. I., Jain, A. K., Johannessen, T., Kato, E., Keeling, R. F., Kitidis, V., Klein Goldewijk, K., Koven, C., Landa, C. S., Landschützer, P., Lenton, A., Lima, I. D., Marland, G., Mathis, J. T., Metzl, N., Nojiri, Y., Olsen, A., Ono, T., Peng, S., Peters, W., Pfeil, B., Poulter, B., Raupach, M. R., Regnier, P., Rödenbeck, C., Saito, S., Salisbury, J. E., Schuster, U., Schwinger, J., **Séférian, R.**, Segschneider, J., Steinhoff, T., Stocker, B. D., Sutton, A. J., Takahashi, T., Tilbrook, B., van der Werf, G. R., Viovy, N., Wang, Y. P., Wanninkhof, R., Wiltshire, A. and Zeng, N. : Global Carbon Budget 2015, *Earth Syst. Sci. Data*, 7(2), 349–396, doi :10.5194/essd-7-349-2015, 2015.
 29. Laufkötter, C., Vogt, M., Gruber, N., Aita-Noguchi, M., Aumont, O., Bopp, L., Buitenhuis, E., Doney, S. C., Dunne, J., Hashioka, T., Hauck, J., Hirata, T., John, J., Le Quéré, C., Lima, I. D., Nakano, H., **Séférian, R.**, Totterdell, I., Vichi, M. and Völker, C. : Drivers and uncertainties of future global marine primary production in marine ecosystem models, *Biogeosciences*, 12(23), 6955–6984, doi :10.5194/bg-12-6955-2015, 2015.
 30. Hauck, J., Völker, C., Wolf-Gladrow, D. A., Laufkötter, C., Vogt, M., Aumont, O., Bopp, L., Buitenhuis, E., Doney, S. C., Dunne, J., Gruber, N., Hashioka, T., John, J., Le Quéré, C., Lima, I. D., Nakano, H., **Séférian, R.** and Totterdell, I. : On the Southern Ocean CO₂ uptake and the role of the biological carbon pump in the 21st century, *Global Biogeochem. Cycles*, 29, doi :10.1002/2015GB005140, 2015.
 31. Le Quéré, C., Moriarty, R., Andrew, R. M., Peters, G. P., Ciais, P., Friedlingstein, P., Jones, S. D., Sitch, S., Tans, P., Arneeth, A., Boden, T. A., Bopp, L., Bozec, Y., Canadell, J. G., Chini, L. P., Chevallier, F., Cosca, C. E., Harris, I., Hoppema, M., Houghton, R. A., House, J. I., Jain, A. K., Johannessen, T., Kato, E., Keeling, R. F., Kitidis, V., Klein Goldewijk, K., Koven, C., Landa, C. S., Landschützer, P., Lenton, A., Lima, I. D., Marland, G., Mathis, J. T., Metzl, N., Nojiri, Y., Olsen, A., Ono, T., Peng, S., Peters, W., Pfeil, B., Poulter, B., Raupach, M. R., Regnier, P., Rödenbeck, C., Saito, S., Salisbury, J. E., Schuster, U., Schwinger, J., **Séférian, R.**, Segschneider, J., Steinhoff, T., Stocker, B. D., Sutton, A. J., Takahashi, T., Tilbrook, B., van der Werf, G. R., Viovy, N., Wang, Y. P., Wanninkhof, R., Wiltshire, A. and Zeng, N. : Global carbon budget 2014, *Earth Syst. Sci. Data*, 7(1), 47–85, doi :10.5194/essd-7-47-2015, 2015.
 32. Middag, R., **Séférian, R.**, Conway, T. M., John, S. G., Bruland, K. W. and de Baar, H. J. W. : Intercomparison of dissolved trace elements at the Bermuda Atlantic Time Series station, *Marine Chemistry VL -*, (0 SP - EP - PY - T2 -), 2015.
 33. Resplandy, L., **Séférian, R.** and Bopp, L. : Natural variability of CO₂ and O₂ fluxes : What can we learn from centuries-long climate models simulations? *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 120(1), 384–404, doi :10.1002/2014JC010463, 2015.
 34. Swingedouw, D., Ortega, P., Mignot, J., Guilyardi, E., Masson-Delmotte, V., Butler, P. G., Khodri, M. and **Séférian, R.** : Bidecadal North Atlantic ocean circulation variability controlled by timing of volcanic eruptions, *Nat Commun*, 6 :6545, doi :10.1038/ncomms7545, 2015.
 35. Gehlen, M., **Séférian, R.**, Jones, D. O. B., Roy, T., Roth, R., Barry, J., Bopp, L., Doney, S. C., Dunne, J. P., Heinze, C., Joos, F., Orr, J. C., Resplandy, L., Segschneider, J. and Tjiputra, J. : Projected pH reductions by 2100 might put deep North Atlantic biodiversity at risk, *Biogeosciences*, 11(23), 6955–6967, 2014.

36. Schwinger, J., Tjiputra, J. F., Heinze, C., Bopp, L., Christian, J. R., Gehlen, M., Ilyina, T., Jones, C. D., Salas-Méla, D., Segsneider, J., **Séférian, R.** and Totterdell, I. : Non-linearity of Ocean Carbon Cycle Feedbacks in CMIP5 Earth System Models, *J. Climate*, 27(11), 3869–3888, doi :10.1175/JCLI-D-13-00452.1, 2014.
37. Servonnat, J., Mignot, J., Guilyardi, E., Swingedouw, D., **Séférian, R.** and Labetoulle, S. : Reconstructing the subsurface ocean decadal variability using surface nudging in a perfect model framework, *Clim Dyn*, 44(1-2), 1–24–24, doi :10.1007/s00382-014-2184-7, 2014.
38. **Séférian, R.**, Bopp, L., Gehlen, M., Swingedouw, D., Mignot, J., Guilyardi, E. and Servonnat, J. : Multiyear predictability of tropical marine productivity, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(32), 11646–11651, 2014a.
39. **Séférian, R.**, Ribes, A. and Bopp, L. : Detecting the anthropogenic influences on recent changes in ocean carbon uptake, *Geophys. Res. Lett.*, 41(16), 5968–5977, doi :10.1002/2014GL061223, 2014b.
40. Bopp, L., Resplandy, L., Orr, J. C., Doney, S. C., Dunne, J. P., Gehlen, M., Halloran, P., Heinze, C., Ilyina, T., **Séférian, R.**, Tjiputra, J. and Vichi, M. : Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century : projections with CMIP5 models, *Biogeosciences*, 10(10), 6225–6245, doi :10.5194/bg-10-6225-2013, 2013.
41. Mignot, J., Swingedouw, D., Deshayes, J., Marti, O., Talandier, C., **Séférian, R.**, Lengaigne, M. and Madec, G. : On the evolution of the oceanic component of the IPSL climate models from CMIP3 to CMIP5 : A mean state comparison, *Ocean Modelling*, 72 IS -(0 SP - EP - PY - T2 -), 167–184, 2013.
42. **Séférian, R.**, Bopp, L., Gehlen, M., Orr, J., Ethé, C., Cadule, P., Aumont, O., Salas y Méla, D., Voldoire, A. and Madec, G. : Skill assessment of three earth system models with common marine biogeochemistry, *Climate Dynamics*, 40(9-10), 2549–2573, doi :10.1007/s00382-012-1362-8, 2013b.
43. **Séférian, R.**, Bopp, L., Swingedouw, D. and Servonnat, J. : Dynamical and biogeochemical control on the decadal variability of ocean carbon fluxes, *Earth Syst. Dynam.*, 4(1), 109–127, doi :10.5194/esd-4-109-2013, 2013a.
44. **Séférian, R.**, Iudicone, D., Bopp, L., Roy, T. and Madec, G. : Water Mass Analysis of Effect of Climate Change on Air–Sea CO₂ Fluxes : The Southern Ocean, *J. Climate*, 25(11), 3894–3908, doi :10.1175/JCLI-D-11-00291.1, 2012.

In discussion or revision :

1. Jones, C. D., Frölicher, T. L., Koven, C., MacDougall, A. H., Matthews, H. D., Zickfeld, K., Rogelj, J., Tokarska, K. B., Gillett, N., Ilyina, T., Meinshausen, M., Mengis, N., **Séférian, R.**, and Eby, M. : The Zero Emission Commitment Model Intercomparison Project (ZECMIP) contribution to CMIP6 : Quantifying committed climate changes following zero carbon emissions, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/gmd-2019-153>, in review, 2019.
2. **Séférian, R.**, Nabat, P., Michou, M., Saint-Martin, D., Voldoire, A., Colin, J., Decharme, B., Delire, C., Berthet, S., Chevallier, M., Sénési, S., Franchisteguy, L., Vial, J., Mallet, M., Joetzjer, E., Geoffroy, O., Guérémy, J.-F., Moine, M.-P., Msadek, R., Ribes, A., Rocher, M., Roehrig, R., Salas-y-Méla, D., Sanchez, E., Terray, L., Valcke, S., Waldman, R., Aumont, O., Bopp, L., Deshayes, J., Éthé, C., and Madec, G. : Evaluation of CNRM Earth-System model , CNRM-ESM2-1 : role of Earth system processes in present-day and future climate, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, pp. 1–91, in review.

Book Chapters :

1. M. R. Allen, H. de Coninck, O. P. Dube, O. Hoegh-Guldberg, D. Jacob, K. Jiang, A. Revi, J. Rogelj, J. Roy, D. Shindell, W. Solecki, M. Taylor, P. Tschakert, H. Waisman, S. A. Halim, P. Antwi-Agyei, F. Aragón-Durand, M. Babiker, P. Bertoldi, M. Bindi, S. Brown, M. Buckeridge, I. Camilloni, A. Cartwright, W. Cramer, P. Dasgupta, A. Diedhiou, R. Djalante, W. Dong, K. L. Ebi, F. Engelbrecht, S. Fifita, J. Ford, P. Forster, S. Fuss, B. Hayward, J.-C. Hourcade, V. Ginzburg, J. Guiot, C. Handa, Y. Hijioka, S. Humphreys, M. Kainuma, J. Kala, M. Kanninen, H. Kheshgi, S. Kobayashi, E. Kriegler, D. Ley, D. Liverman, N. Mahowald, R. Mechler, S. Mehrotra, Y. Mulugetta, L. Mundaca, P. Newman, C. Okereke, A. Payne, R. Perez, P. F. Pinho, A. Revokatova, K. Riahi, S. Schultz, **R. Séférian**, S. I. Seneviratne, L. Steg, A. G. Suarez Rodriguez, T. Sugiyama, A. Thomas, M. V. Vilariño, M. Wairiu, R. Warren, G. Zhou, K. Zickfeld, 2018, Technical Summary. In : Global warming of 1.5 °C . An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. In Press.
2. M. R. Allen, O. P. Dube, W. Solecki, F. Aragón-Durand, W. Cramer, S. Humphreys, M. Kainuma, J. Kala, N. Mahowald, Y. Mulugetta, R. Perez, M. Wairiu, K. Zickfeld, 2018, Framing and Context. In : Global warming of 1.5 °C . An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. In Press.
3. J. Rogelj, D. Shindell, K. Jiang, S. Fifita, P. Forster, V. Ginzburg, C. Handa, H. Kheshgi, S. Kobayashi, E. Kriegler, L. Mundaca, **R. Séférian**, M. V. Vilariño, 2018, Mitigation pathways compatible with 1.5 °C in the context of sustainable development. In : Global warming of 1.5 °C . An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. In Press.
4. O. Hoegh-Guldberg, D. Jacob, M. Taylor, M. Bindi, S. Brown, I. Camilloni, A. Diedhiou, R. Djalante, K. Ebi, F. Engelbrecht, J. Guiot, Y. Hijioka, S. Mehrotra, A. Payne, S. I. Seneviratne, A. Thomas, R. Warren, G. Zhou, 2018, Impacts of 1.5 °C Global Warming on Natural and Human Systems. In : Global Warming of 1.5 °C . An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. In Press.
5. H. de Coninck, A. Revi, M. Babiker, P. Bertoldi, M. Buckeridge, A. Cartwright, W. Dong,

J. Ford, S. Fuss, J.C. Hourcade, D. Ley, R. Mechler, P. Newman, A. Revokatova, S. Schultz, L. Steg, T. Sugiyama, 2018, Strengthening and implementing the global response. In : Global warming of 1.5 °C . An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson- Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. In Press.

6. Garçon, V., Bell, T., Wallace, D., Arnold, S., Baker, A., Bakker, D. E., Bange, H., Bates, N., Bopp, L., Boutin, J., Boyd, P., Bracher, A., Burrows, J., Carpenter, L., de Leeuw, G., Fennel, K., Font, J., Friedrich, T., Garbe, C., Gruber, N., Jaeglé, L., Lana, A., Lee, J., Liss, P., Miller, L., Olgun, N., Olsen, A., Pfeil, B., Quack, B., Read, K., Reul, N., Rödenbeck, C., Rohekar, S., Saiz-Lopez, A., Saltzman, E., Schneising, O., Schuster, U., **Séférian, R.**, Steinhoff, T., Traon, P.-Y. and Ziska, F. : Perspectives and Integration in SOLAS Science, in Springer Earth System Sciences, edited by P. S. Liss and M. T. Johnson, pp. 247–306, Springer Berlin Heidelberg. 2014.

Other Publications :

1. **Roland Séférian**, Matthias Rocher, Nicolas Metzl, Philippe Ciais : Évolution récente du cycle du carbone planétaire : facteurs humains et naturels. *La Météorologie* ; 8(93) :3. DOI :10.4267/2042/59931, 2016.
2. Olivier Boucher, Patrick Criqui, Hervé Le Treut, Valentin Bellassen, Hélène Benveniste, Francois-Marie Breon, Philippe Ciais, Thomas Gasser, Céline Guivarch, Franck Lecocq, Sandrine Mathy, Emmanuel Prados, David Salas y Mélia, **Roland Séférian** : Les contributions nationales soumises à la COP21 appellent à une révision et un suivi des émissions. *Huffington Post*, 2015.
3. Hervé Le Treut, Olivier Boucher, Valentin Bellassen, Hélène Benveniste, Francois-Marie Breon, Philippe Ciais, Patrick Criqui, Thomas Gasser, Céline Guivarch, Franck Lecocq, Sandrine Mathy, Emmanuel Prados, David Salas y Mélia, **Roland Séférian** : COP21 : Pour rejoindre rapidement une trajectoire limitant le réchauffement à 2°C. *Le Monde.fr*, 2015.

7.7 Conférences

Highlighted Scientific Conferences :

- Oct 2010** : Apport de l'analyse en masse d'eau sur la compréhension de la biogéochimie marine. Forum des Océanographes. Wimereux, France. Prix de la meilleure communication étudiante.
- Jan 2011** : Ocean Surface Albedo : a step forward in understanding the potential role of the biogeochemistry on the SOLAS interactions. Ocean Colour Workshop GISS-COOC, CNES, Paris, France.
- Avr 2011** : Impact of climate change on air-sea carbon fluxes : analysis in a water-mass framework : The Southern Ocean. European Geophysical Union Conference (EGU). Vienne, Autriche.
- Fev 2012** : Predictability of Marine ecosystem. GODAE Meeting. MetOffice, Exeter, UK.
- Mai 2012** : Skill assessment of marine biogeochemistry. NEMO users meeting. Met Office, Exeter, UK.
- Juin 2013** : Detecting the anthropogenic influences on recent changes in ocean carbon uptake. International Carbon dioxide Conference 9. Beijing, Chine.
- Dec 2015** : Vers l'utilisation des modèles système Terre comme outil de prévision pour les écosystèmes marins. Journée Scientifique du Ministère de l'Environnement. MEDE, Paris, France.
- Mar 2016** : Contraintes géophysiques des scénarios climatiques à faible niveau d'émissions. Journée Scientifique de la Chair Energie Environnement de Polytechnique. Paris, France.
- Sep 2016** : Investigating the mechanisms behind the reinvigoration of the Southern ocean carbon sink. Clivar Meeting. Qingdao, Chine.
- Dec 2016** : Inconsistent strategies to spin up models in CMIP5 : implications for ocean biogeochemical model performance assessment. American Geophysical Union Conference (AGU). San Francisco, USA.
- Oct 2018** : What can be learnt from current records in surface atmospheric CO₂? Land-MIP meeting. Toulouse, France.
- Mar 2019** : Tracking the impact of climate model complexity in future climate projections using CNRM-ESM2-1 and CNRM-CM6-1. Workshop WCRP/CMIP6. Barcelone, Espagne.
- Jun 2019** : Point sur les connaissances actuelles : Quelles sont les conclusions du Rapport Spécial du GIEC sur 1,5°C de réchauffement planétaire. Rendez-vous des Sciences, Plan national de formation de l'Éducation Nationale. Paris, France.

General Public Conferences :

Participation au « Train du Climat », tournée nationale d'octobre 2015, Gare d'Austerlitz en mars 2017 et Gare de l'Est en décembre 2017.

2 conférences grand public en 2016 en lien avec l'impact du changement climatique sur les écosystèmes marins, 3 conférences grand public en 2017 en lien avec le cycle du carbone, 8 conférences grand public en lien avec la publication du rapport Spécial 1,5°C du GIEC sur 2018-2019 (dont Alternatiba Bayonne), participation à 3 tables rondes en lien avec les questions de changements climatiques et d'adaptation.

Conférence de presse le 8 octobre 2018 pour la publication du rapport Spécial 1,5°C du GIEC.

Sélection de 5 Publications

Sommaire

-
- | | | |
|-----|--|----|
| 8.1 | Séférian, R. , Bopp, L., Gehlen, M., Swingedouw, D., Mignot, J., Guilyardi, E. and Servonnat, J. : Multiyear predictability of tropical marine productivity, <i>Proceedings of the National Academy of Sciences</i> , 111(32), 11646–11651, 2014a. | 90 |
| 8.2 | Séférian, R. , Gehlen, M., Bopp, L., Resplandy, L., Orr, J. C., Marti, O., Dunne, J. P., Christian, J. R., Doney, S. C., Ilyina, T., Lindsay, K., Halloran, P., Heinze, C., Segschneider, J., and Tjiputra, J. : Inconsistent strategies to spin up models in CMIP5 : implications for ocean biogeochemical model performance assessment, <i>Geosci. Model Dev.</i> , 9, 1827-1851, doi :10.5194/gmd-9-1827-2016, 2016b. | 92 |
| 8.3 | Séférian, R., Delire, C., Decharme, B., Voldoire, A., Salas y Melia, D., Chevallier, M., Saint-Martin, D., Aumont, O., Calvet, J.-C., Carrer, D., Douville, H., Franchistéguy, L., Joetzjer, E., and Sénési, S. : Development and evaluation of CNRM Earth system model – CNRM-ESM1, <i>Geosci. Model Dev.</i> , 9, 1423-1453, doi :10.5194/gmd-9-1423-2016, 2016a. | 94 |
| 8.4 | Berthet, S., Séférian, R., Bricaud, C., Chevallier, M., Voldoire, A. and Ethé, C. : Evaluation of an online grid-coarsening algorithm in a global eddy-admitting ocean-biogeochemical model. <i>Journal of Advances in Modeling Earth Systems</i> , 11. https://doi.org/10.1029/2019MS001644 , 2019. | 96 |
| 8.5 | Plazzotta, M., Séférian, R. , Douville, H., Kravitz, B., Tjiputra, J. : Land surface cooling induced by sulfate geoengineering constrained by major volcanic eruptions. <i>Geophysical Research Letters</i> , 45, 5663–5671. https://doi.org/10.1029/2018GL077583 , 2018. | 98 |
-

- 8.1 Sférian, R. , Bopp, L., Gehlen, M., Swingedouw, D., Mignot, J., Guilyardi, E. and Servonnat, J. : Multiyear predictability of tropical marine productivity, Proceedings of the National Academy of Sciences, 111(32), 11646–11651, 2014a.**



Multiyear predictability of tropical marine productivity

Roland Séferian^{a,b,1}, Laurent Bopp^b, Marion Gehlen^b, Didier Swingedouw^{b,c}, Juliette Mignot^{d,e}, Eric Guilyardi^{d,f}, and Jérôme Servonnat^b

^aCentre National de Recherches Météorologiques–Groupe d'Etude de l'Atmosphère Météorologique/Groupe de Météorologie de Grande Echelle et Climat, 31100 Toulouse, France; ^bInstitut Pierre Simon Laplace/Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, 91191 Gif sur Yvette, France; ^cUniversité de Bordeaux/Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux, 33615 Pessac, France; ^dInstitut Pierre Simon Laplace/Laboratoire d'Océanographie et du Climat: Expérimentations et Approches Numériques, 75252 Paris, France; ^eClimate and Environmental Physics, Physics Institute and Oeschger Centre of Climate Change Research, University of Bern, CH-3012 Bern, Switzerland; and ^fNational Centre for Atmospheric Science Climate, University of Reading, Reading RG6 6BB, United Kingdom

Edited by David M. Karl, University of Hawaii, Honolulu, HI, and approved June 27, 2014 (received for review August 21, 2013)

With the emergence of decadal predictability simulations, research toward forecasting variations of the climate system now covers a large range of timescales. However, assessment of the capacity to predict natural variations of relevant biogeochemical variables like carbon fluxes, pH, or marine primary productivity remains unexplored. Among these, the net primary productivity (NPP) is of particular relevance in a forecasting perspective. Indeed, in regions like the tropical Pacific (30°N–30°S), NPP exhibits natural fluctuations at interannual to decadal timescales that have large impacts on marine ecosystems and fisheries. Here, we investigate predictions of NPP variations over the last decades (i.e., from 1997 to 2011) with an Earth system model within the tropical Pacific. Results suggest a predictive skill for NPP of 3 y, which is higher than that of sea surface temperature (1 y). We attribute the higher predictability of NPP to the poleward advection of nutrient anomalies (nitrate and iron), which sustain fluctuations in phytoplankton productivity over several years. These results open previously unidentified perspectives to the development of science-based management approaches to marine resources relying on integrated physical-biogeochemical forecasting systems.

forecast | ecosystem management | marine biogeochemistry

In 2010, global fisheries supplied the world with ~148 million tons of fish with a total value of 217.5 billion US dollars (1). Fisheries represent a strong anthropogenic pressure on marine ecosystems and an increasing fraction of commercially exploited fish stocks are on the verge of collapse (1). However, in some oceanic regions like the tropical Pacific, which hosts the largest world fisheries (1), the decline of fish stocks cannot be attributed solely to overfishing. It is suspected to result from the interplay between human foraging and regional natural fluctuations in food abundance at the base of the food web such as variations in net primary productivity (NPP) occurring at interannual-to-decadal timescales. These natural fluctuations impact marine ecosystems across large oceanic regions (2). In the tropical Pacific, these fluctuations are suggested to be driven by large-scale climate variations such as the Madden Julian Oscillation (3), the El Niño Southern Oscillation (4), or the Pacific Decadal Oscillation (5). These climate modes are potentially predictable between one and up to several years (6, 7). However, although past studies have investigated the predictive skill of physical variables such as sea surface temperature (SST) (8) or precipitation (9) in the tropical Pacific, none has explored the potential predictability of natural variations of biogeochemical variables like NPP. This is all of the more surprising as the ability to predict natural variations of NPP at interannual-to-decadal timescales may be of key relevance to fisheries management (10–12).

Predicting Natural Variations of NPP

NPP is estimated from several algorithms on the basis of satellite-derived chlorophyll, SST, and photosynthetically available radiation (13). Continuous time series of satellite-derived estimates of NPP are available since 1997 based on products of the

sea-viewing wide field-of-view sensor (SeaWiFS) (1997–2008) and the moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) (2003–2012). Despite substantial uncertainties in NPP mean state related to the different ocean color-based algorithms (14), the various algorithms show a good agreement for relative interannual-to-decadal variations (15). The overall spatial and temporal distributions of NPP are consistent with primary limitation by nutrients, and temperature (16), for which the largest interannual fluctuations are observed in the low-latitude oceans (17). Despite large differences in terms of spatial variability for NPP and SST in these regions, the temporal variations of NPP (with a SD of ~120 TgC·mo⁻¹) are tightly linked with low-latitude SST fluctuations, both being mainly associated to the El Niño Southern Oscillation (ENSO) variability (18). During ENSO phases, oscillations of NPP in the tropical Pacific prominently arise from changes in nutrient supply (4, 19, 20). In the eastern Pacific, the latter are injected from deeper layers to the upper ocean by the equatorial upwelling, the intensity of which is strongly modulated by changes in wind strength related to wind-SST Bjerknes feedbacks (21). In the central and western Pacific, the westward advection of nutrients in response to changes in zonal currents during the ENSO phases explains most of the variations in NPP with a time lag of several months (4, 20) to a decade (22, 23). Simultaneously to these first-order mechanisms, local limitation of specific nutrients plays an important role in setting the NPP variability. In particular, low iron levels are recognized to limit

Significance

Phytoplankton is at the base of the marine food web. Its carbon fixation, the net primary productivity (NPP), sustains most living marine resources. In regions like the tropical Pacific (30°N–30°S), natural fluctuations of NPP have large impacts on marine ecosystems including fisheries. The capacity to predict these natural variations would provide an important asset to science-based management approaches but remains unexplored yet. In this paper, we demonstrate that natural variations of NPP in the tropical Pacific can be forecasted several years in advance beyond the physical environment, whereas those of sea surface temperature are limited to 1 y. These results open previously unidentified perspectives for the future development of science-based management techniques of marine ecosystems based on multiyear forecasts of NPP.

Author contributions: R.S. designed research; R.S. performed research; R.S. analyzed data; L.B. and M.G. provided expertise on marine biogeochemistry; D.S., J.M., E.G., and J.S. provided expertise on decadal prediction; J.S. provided expertise on statistics; and R.S., L.B., M.G., D.S., J.M., E.G., and J.S. wrote the paper.

The authors declare no conflict of interest.

This article is a PNAS Direct Submission.

Freely available online through the PNAS open access option.

¹To whom correspondence should be addressed. Email: roland.seferian@meteo.fr.

This article contains supporting information online at www.pnas.org/lookup/suppl/doi:10.1073/pnas.1315855111/-/DCSupplemental.

- 8.2 Sférian, R. , Gehlen, M., Bopp, L., Resplandy, L., Orr, J. C., Marti, O., Dunne, J. P., Christian, J. R., Doney, S. C., Ilyina, T., Lindsay, K., Halloran, P., Heinze, C., Segschneider, J., and Tjiputra, J. : Inconsistent strategies to spin up models in CMIP5 : implications for ocean biogeochemical model performance assessment, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1827-1851, doi :10.5194/gmd-9-1827-2016, 2016b.

Geosci. Model Dev., 9, 1827–1851, 2016
www.geosci-model-dev.net/9/1827/2016/
doi:10.5194/gmd-9-1827-2016
© Author(s) 2016. CC Attribution 3.0 License.



Inconsistent strategies to spin up models in CMIP5: implications for ocean biogeochemical model performance assessment

Roland Séférian¹, Marion Gehlen², Laurent Bopp², Laure Resplandy^{3,2}, James C. Orr², Olivier Marti², John P. Dunne⁴, James R. Christian⁵, Scott C. Doney⁶, Tatiana Ilyina⁷, Keith Lindsay⁸, Paul R. Halloran⁹, Christoph Heinze^{10,11}, Joachim Segsneider¹², Jerry Tjiputra¹¹, Olivier Aumont¹³, and Anastasia Romanou^{14,15}

¹CNRM, Centre National de Recherches Météorologiques, Météo-France/CNRS, 42 Avenue Gaspard Coriolis, 31057 Toulouse, France

²LSCE/IPSL, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Orme des Merisiers, CEA/Saclay 91198 Gif-sur-Yvette CEDEX, France

³Scripps Institution of Oceanography, UCSD, La Jolla, CA, USA

⁴Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA, Princeton, NJ, USA

⁵Fisheries and Oceans Canada and Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Victoria, B.C., Canada

⁶Marine Chemistry and Geochemistry Department, Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA, USA

⁷Max Planck Institute for Meteorology, Bundesstraße 53, 20146 Hamburg, Germany

⁸Climate and Global Dynamics Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA

⁹College of Life and Environmental Sciences, University of Exeter, Exeter, EX4 4RJ, UK

¹⁰Geophysical Institute, University of Bergen, Bergen, Norway

¹¹Uni Research Climate, Bjerknes Centre for Climate Research, Bergen, Norway

¹²Department of Geosciences, University of Kiel, Kiel, Germany

¹³Sorbonne Universités (UPMC, Univ Paris 06)-CNRS-IRD-MNHN, LOCEAN-IPSL Laboratory, 4 Place Jussieu, 75005 Paris, France

¹⁴Dept. of Applied Math. and Phys., Columbia University, 2880 Broadway, New York, NY 10025, USA

¹⁵NASA-Goddard Institute for Space Studies at Columbia University, New York, NY, USA

Correspondence to: Roland Séférian (rseferian.cnrm@gmail.com)

Received: 31 August 2015 – Published in Geosci. Model Dev. Discuss.: 13 October 2015

Revised: 19 April 2016 – Accepted: 22 April 2016 – Published: 12 May 2016

Abstract. During the fifth phase of the Coupled Model Inter-comparison Project (CMIP5) substantial efforts were made to systematically assess the skill of Earth system models. One goal was to check how realistically representative marine biogeochemical tracer distributions could be reproduced by models. In routine assessments model historical hindcasts were compared with available modern biogeochemical observations. However, these assessments considered neither how close modeled biogeochemical reservoirs were to equilibrium nor the sensitivity of model performance to initial conditions or to the spin-up protocols. Here, we explore how the large diversity in spin-up protocols used for marine biogeochemistry in CMIP5 Earth system models (ESMs) contributes to model-to-model differences in the simulated

fields. We take advantage of a 500-year spin-up simulation of IPSL-CM5A-LR to quantify the influence of the spin-up protocol on model ability to reproduce relevant data fields. Amplification of biases in selected biogeochemical fields (O₂, NO₃, Alk-DIC) is assessed as a function of spin-up duration. We demonstrate that a relationship between spin-up duration and assessment metrics emerges from our model results and holds when confronted with a larger ensemble of CMIP5 models. This shows that drift has implications for performance assessment in addition to possibly aliasing estimates of climate change impact. Our study suggests that differences in spin-up protocols could explain a substantial part of model disparities, constituting a source of model-to-model uncertainty. This requires more attention in future

- 8.3** Sférian, R., Delire, C., Decharme, B., Voltaire, A., Salas y Melia, D., Chevallier, M., Saint-Martin, D., Aumont, O., Calvet, J.-C., Carrer, D., Douville, H., Franchistéguy, L., Joetzer, E., and Sénési, S. : Development and evaluation of CNRM Earth system model – CNRM-ESM1, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1423-1453, doi :10.5194/gmd-9-1423-2016, 2016a.

Geosci. Model Dev., 9, 1423–1453, 2016
www.geosci-model-dev.net/9/1423/2016/
doi:10.5194/gmd-9-1423-2016
© Author(s) 2016. CC Attribution 3.0 License.



Development and evaluation of CNRM Earth system model – CNRM-ESM1

Roland Séférian¹, Christine Delire¹, Bertrand Decharme¹, Aurore Voldoire¹, David Salas y Melia¹, Matthieu Chevallier¹, David Saint-Martin¹, Olivier Aumont², Jean-Christophe Calvet¹, Dominique Carrer¹, Hervé Douville¹, Laurent Franchistéguy¹, Emilie Joetzjer³, and Séphane Sénési¹

¹CNRM, Centre National de Recherches Météorologiques, Météo-France/CNRS, 42 Avenue Gaspard Coriolis, 31057 Toulouse, France

²Sorbonne Universités (UPMC, Univ Paris 06)-CNRS-IRD-MNHN, LOCEAN-IPSL Laboratory, 4 Place Jussieu, 75005 Paris, France

³Department of Ecology, Institute on Ecosystems, Montana State University, 111 AJM Johnson Hall, Bozeman, Montana 59717, USA

Correspondence to: Roland Séférian (rseferian.cnrm@gmail.com)

Received: 18 June 2015 – Published in Geosci. Model Dev. Discuss.: 22 July 2015

Revised: 27 February 2016 – Accepted: 29 March 2016 – Published: 19 April 2016

Abstract. We document the first version of the Centre National de Recherches Météorologiques Earth system model (CNRM-ESM1). This model is based on the physical core of the CNRM climate model version 5 (CNRM-CM5) model and employs the Interactions between Soil, Biosphere and Atmosphere (ISBA) and the Pelagic Interaction Scheme for Carbon and Ecosystem Studies (PISCES) as terrestrial and oceanic components of the global carbon cycle. We describe a preindustrial and 20th century climate simulation following the CMIP5 protocol. We detail how the various carbon reservoirs were initialized and analyze the behavior of the carbon cycle and its prominent physical drivers. Over the 1986–2005 period, CNRM-ESM1 reproduces satisfactorily several aspects of the modern carbon cycle. On land, the model captures the carbon cycling through vegetation and soil, resulting in a net terrestrial carbon sink of $2.2 \text{ Pg C year}^{-1}$. In the ocean, the large-scale distribution of hydrodynamical and biogeochemical tracers agrees with a modern climatology from the World Ocean Atlas. The combination of biological and physical processes induces a net CO_2 uptake of $1.7 \text{ Pg C year}^{-1}$ that falls within the range of recent estimates. Our analysis shows that the atmospheric climate of CNRM-ESM1 compares well with that of CNRM-CM5. Biases in precipitation and shortwave radiation over the tropics generate errors in gross primary productivity and ecosystem respiration. Compared to CNRM-CM5, the revised ocean–

sea ice coupling has modified the sea-ice cover and ocean ventilation, unrealistically strengthening the flow of North Atlantic deep water ($26.1 \pm 2 \text{ Sv}$). It results in an accumulation of anthropogenic carbon in the deep ocean.

1 Introduction

Earth system models (ESMs) are now recognized as the current state-of-the-art models (IPCC, 2013), expanding the numerical representation of the climate system of the 4th Assessment Report (IPCC, 2007). They enable the representation of subtle nonlinear interactions and feedbacks of different magnitude and signs of various biogeochemical and biophysical processes with the climate system. The latter contribute, in addition to the atmospheric radiative properties and global climate dynamics, to determining the Earth's climate variability (Arora et al., 2013; Cox et al., 2000; Friedlingstein and Prentice, 2010; Schwinger et al., 2014; Wetzel et al., 2006).

Although there is no uniformly accepted definition, ESMs generally bring together a global physical climate model and land and ocean biogeochemical modules (Bretherton, 1985; Flato, 2011). As such, they enable the representation of the global carbon cycle. The models of this class have played a larger role in the 5th IPCC report than in previous reports,

- 8.4 Berthet, S., Séférian, R., Bricaud, C., Chevallier, M., Vol-
doire, A. and Ethé, C. : Evaluation of an online grid-
coarsening algorithm in a global eddy-admitting ocean-
biogeochemical model. *Journal of Advances in Modeling
Earth Systems*, 11. <https://doi.org/10.1029/2019MS001644>,
2019.



RESEARCH ARTICLE

10.1029/2019MS001644

Special Section:

The CNRM Climate and Earth
System Models for CMIP6

Key Points:

- The eddy-admitting (0.25°) model replicates observed physical-biogeochemical coupling, whereas the 1° horizontal resolution model does not
- The computation cost of the eddy-admitting model is divided by 2.7 when using a coarse-grained grid for marine biogeochemistry
- The coarse-grained solution inherits the key features of the 0.25° solution, including the physical-biogeochemical coupling

Supporting Information:

- Supporting Information S1

Correspondence to:

S. Berthet,
sarah.berthet@meteo.fr

Citation:

Berthet, S., Sférian, R., Bricaud, C., Chevallier, M., Voldoire, A., & Ethé, C. (2019). Evaluation of an online grid-coarsening algorithm in a global eddy-admitting ocean biogeochemical model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11. <https://doi.org/10.1029/2019MS001644>

Received 1 FEB 2019

Accepted 6 MAY 2019

Accepted article online 13 MAY 2019

©2019. The Authors.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs License, which permits use and distribution in any medium, provided the original work is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.

Evaluation of an Online Grid-Coarsening Algorithm in a Global Eddy-Admitting Ocean Biogeochemical Model

 Sarah Berthet¹ , Roland Sférian¹ , Clément Bricaud², Matthieu Chevallier¹,
 Aurore Voldoire¹ , and Christian Ethé³
¹Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse, France, ²Mercator Ocean, Toulouse, France, ³Institut Pierre-Simon Laplace, Paris, France

Abstract In order to explore the effects of mesoscale eddies on marine biogeochemistry over climate timescales, global ocean biogeochemical general circulation models (OBGCMs) need at least to be run at a horizontal resolution of a 0.25°, the minimal resolution admitting eddies. However, their use is currently limited because of a prohibitive computational cost and storage requirements. To overcome this problem, an *online coarsening* algorithm is evaluated in the oceanic component (NEMO-GELATO-PISCES) of CNRM-ESM2-1. This algorithm allows to compute biogeochemical processes at a coarse resolution (0.75°) while inheriting most of the dynamical characteristics of the eddy-admitting OBGCM (0.25°). Through the coarse-graining process, the effective resolution of the ocean dynamics *seen* by the biogeochemical model is higher than that which would be obtained from an OBGCM run at 0.75°. In this context, we assess how much the increase from low (1°) to *coarse-grained* horizontal resolution impacts the ocean dynamics and the marine biogeochemistry over long-term climate simulations. The online coarsening reduces the computational cost by 60% with respect to that of the eddy-admitting OBGCM. In addition, it improves the representation of chlorophyll, nutrients, oxygen, and sea-air carbon fluxes over more than half of the open ocean area compared to the 1° OBGCM. Most importantly, the coarse-grained OBGCM captures the physical-biogeochemical coupling between sea-air carbon fluxes and sea surface height and between oxygen minimum zone boundaries and eddies, as produced by the eddy-admitting OBGCM. Such a cost-efficient coarsening algorithm offers a good trade-off to conduct process-based studies over centennial timescales at higher resolution.

1. Introduction

Over the recent decades, the oceans have stored ~93% of the anthropogenic heat (Fasullo & Trenberth, 2012) and 22% of the anthropogenic CO₂ emissions (Le Quéré et al., 2018), slowing down the climate change at multidecadal timescales. Recent observations have challenged this large-scale picture of the ocean by adding large fluctuations in ocean fluxes of carbon (Landschützer et al., 2015) and heat (e.g., Liu et al., 2016) at shorter timescales (season to decades). There are now robust evidences that eddies or mesoscale ocean structures also influence a number of biogeochemical processes across temporal and spatial scales (e.g., Bettencourt et al., 2015; Dufour et al., 2015; Gruber et al., 2011; Harrison et al., 2018; Lacour et al., 2017; Lévy & Martin, 2013; Mazloff et al., 2018; Munday et al., 2014; Oschlies, 2002; Resplandy et al., 2009; Resplandy et al., 2013; Sweeney et al., 2003; Villar et al., 2015).

For instance, observational process studies contribute to explain how eddy-induced local vertical motion may impact marine biogeochemistry and carbon cycle. In the Tasman Sea, the presence of a large number of eddies reinforces vertical mixing, which decreases the effective stratification and limits the winter phytoplankton and zooplankton populations (Tilburg et al., 2002). On the other side, Lacour et al. (2017) present observational evidences of unexpected winter phytoplankton blooms in the North Atlantic subpolar gyre. These blooms are triggered by intermittent restratification of the mixed layer in response to the eddy-driven transport of lighter water over denser layers. A similar phenomenon exists in the Southern Ocean, in the Agulhas region, where vertical mixing processes have been shown to alter the plankton transport (Villar et al., 2015). This strong vertical mixing has been suggested to shape the biogeochemical signatures in the Agulhas rings as the rings and associated plankton transit westward, emphasizing the role of mesoscale eddies on marine biogeochemistry.

- 8.5 Plazzotta, M., Sférian, R. , Douville, H., Kravitz, B., Tjiputra, J. : Land surface cooling induced by sulfate geoengineering constrained by major volcanic eruptions. *Geophysical Research Letters*, 45, 5663–5671. <https://doi.org/10.1029/2018GL077583>, 2018.

Earth's Future

RESEARCH ARTICLE

10.1029/2019EF001165

Key Points:

- The global carbon uptake is reinforced by 40 ± 19 GtC after 50 years of solar radiation modification
- Eighty-five percent of this global uptake is driven by the land carbon sink; only 15% is controlled by the ocean
- The largest model uncertainties consist in the response of the land carbon cycle to the stoppage of solar radiation modification

Correspondence to:

R. Séférian,
roland.seferian@meteo.fr

Citation:

Plazzotta, M., Séférian, R., & Douville, H. (2019). Impact of solar radiation modification on allowable CO₂ emissions: What can we learn from multimodel simulations? *Earth's Future*, 7. <https://doi.org/10.1029/2019EF001165>

Received 21 JAN 2019

Accepted 12 MAY 2019

Accepted article online 16 MAY 2019

©2019. The Authors.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs License, which permits use and distribution in any medium, provided the original work is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.

Impact of Solar Radiation Modification on Allowable CO₂ Emissions: What Can We Learn From Multimodel Simulations?

Maxime Plazzotta¹ , Roland Séférian¹ , and Hervé Douville¹ 

¹CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse, France

Abstract Solar radiation modification (SRM) is known to strengthen both land and ocean carbon uptake because of its impacts on surface temperature, solar radiation, and other potential drivers of the global carbon cycle. However, the magnitude and timing of the response of both land and ocean carbon uptake to SRM and its consequence on allowable CO₂ emissions remain poorly understood. Here we use the results of six Earth system models simulating a continuous stratospheric injection of 5 Tg of sulfur dioxide per year between 2020 and 2069 under the representative concentration pathways 4.5 to investigate the impact of SRM on land and ocean carbon uptake. We find that 50 years of SRM under this protocol increases the allowable CO₂ emissions by 40 ± 19 GtC; 85% of this additional uptake of carbon is stored in the land biosphere and 15% in the ocean. This increase in allowable CO₂ emissions is however not sustainable after the stoppage of SRM. Earth system models predict a mean release of 8 ± 11 GtC of the carbon back to the atmosphere 20 years after the stoppage which is dominated by large uncertainties in the response of the simulated land carbon cycle to rising temperature and solar radiation. We demonstrate that the time scales of carbon dioxide removal (CDR) potential of SRM are smaller than the time scales of the geological storage assumed in well-established CDR options. This shows that the CDR potential of SRM should be compared to well-established CDR options with caution.

1. Introduction

Due to an increase in carbon dioxide (CO₂) emissions, the global atmospheric CO₂ concentration reached 405 ± 0.1 ppm averaged over 2017 (Le Quéré et al., 2018). In order to halt global warming below 2 °C by 2100, global CO₂ emissions need to be reduced by about 20% in 2030 with respect to their 2010 level and reach net-zero emissions by 2070 (Rogelj et al., 2018). The Intergovernmental Panel on Climate Change special report on 1.5 °C global warming (Rogelj et al., 2018) suggests that it would probably be necessary to massively deploy global-scale negative emissions technologies such as bioenergy carbon capture and storage before the end of the century in order to halt global warming to well below 1.5 °C or 2 °C. The use of negative emissions technologies as future mitigation options is debated because of geophysical, ethical, and economical issues (de Coninck et al., 2018). In this context, the use of solar radiation modification (SRM, also called solar geoengineering or albedo modification) has become even more controversial because of its potential to limit the global temperature increase without reducing the atmospheric CO₂ concentration, thereby not addressing all the expected effects of SRM on the Earth system and raising serious concerns about the fate of the climate system in case of failure or deliberate termination of SRM.

However, recent studies such as Eliseev (2012) or Keith et al. (2017) suggest that SRM might be understood as a form of carbon dioxide removal (CDR) technique because of its impacts on the global carbon cycle. This statement is also supported by former studies (Eliseev, 2012; Govindasamy et al., 2002; Keller et al., 2014; Lauvset et al., 2017; Matthews & Caldeira, 2007; Muri et al., 2015; Sonntag et al., 2018) which suggest that SRM is likely to strengthen carbon uptake by both ocean and terrestrial ecosystems. This finding is also supported by the modeled response of the carbon cycle to major volcanic eruptions (Brovkin et al., 2010; MacMartin et al., 2016; Rothenberg et al., 2012; Tjiputra & Otterå, 2011). In both cases, the same mechanism is at play. Indeed, the global carbon cycle mainly responds to the thermal adjustment of the climate system after a decrease in incoming solar energy (e.g., Cao, 2018). Over land, SRM could cause a decrease in soil respiration driven by a reduction in surface temperature. The difference between photosynthesis and respiration then results in a potential increase of the net carbon uptake. In addition, the ocean carbon sink could also be enhanced because of an increase in CO₂ solubility induced by the cooling of sea surface

Bibliographie

- Alkama, R. and Cescatti, A. : Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover, *Science*, 351, 600–604, doi :10.1126/science.aac8083, URL <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.aac8083>, 2016.
- Anav, A., Friedlingstein, P., Kidston, M., Bopp, L., Ciais, P., Cox, P., Jones, C., Jung, M., Myneni, R., and Zhu, Z. : Evaluating the land and ocean components of the global carbon cycle in the CMIP5 earth system models, *Journal of Climate*, 26, 6801–6843, doi :10.1175/JCLI-D-12-00417.1, URL <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00417.1>, 2013.
- Andrews, O. D., Bindoff, N. L., Halloran, P. R., Ilyina, T., and Le Quéré, C. : Detecting an external influence on recent changes in oceanic oxygen using an optimal fingerprinting method, *Biogeosciences*, 10, 1799–1813, doi :10.5194/bg-10-1799-2013, URL <http://www.biogeosciences-discuss.net/9/12469/2012/bgd-9-12469-2012.pdf>, 2013.
- Arneeth, A., Harrison, S. P., Zaehle, S., Tsigaridis, K., Menon, S., Bartlein, P. J., Feichter, J., Korhola, A., Kulmala, M., O'Donnell, D., Schurgers, G., Sorvari, S., and Vesala, T. : Terrestrial biogeochemical feedbacks in the climate system, *Nature Geoscience*, 3, 525–532, doi :10.1038/ngeo905, URL <http://www.nature.com/articles/ngeo905>, 2010.
- Aumont, O. and Bopp, L. : Globalizing results from ocean in situ iron fertilization studies, *Global Biogeochemical Cycles*, 20, n/a–n/a, doi :10.1029/2005GB002591, URL <http://doi.wiley.com/10.1029/2005GB002591>, 2006.
- Bakker, D. C. E., Pfeil, B., Landa, C. S., Metzl, N., O'Brien, K. M., Olsen, A., Smith, K., Cosca, C., Harasawa, S., Jones, S. D., Nakaoka, S.-i., Nojiri, Y., Schuster, U., Steinhoff, T., Sweeney, C., Takahashi, T., Tilbrook, B., Wada, C., Wanninkhof, R., Alin, S. R., Balestrini, C. F., Barbero, L., Bates, N. R., Bianchi, A. A., Bonou, F., Boutin, J., Bozec, Y., Burger, E. F., Cai, W.-J., Castle, R. D., Chen, L., Chierici, M., Currie, K., Evans, W., Featherstone, C., Feely, R. A., Fransson, A., Goyet, C., Greenwood, N., Gregor, L., Hankin, S., Hardman-Mountford, N. J., Harlay, J., Hauck, J., Hoppema, M., Humphreys, M. P., Hunt, C. W., Huss, B., Ibáñez, J. S. P., Johannessen, T., Keeling, R., Kitidis, V., Körtzinger, A., Kozyr, A., Krasakopoulou, E., Kuwata, A., Landschützer, P., Lauvset, S. K., Lefèvre, N., Lo Monaco, C., Manke, A., Mathis, J. T., Merlivat, L., Millero, F. J., Monteiro, P. M. S., Munro, D. R., Murata, A., Newberger, T., Omar, A. M., Ono, T., Paterson, K., Pearce, D., Pierrot, D., Robbins, L. L., Saito, S., Salisbury, J., Schlitzer, R., Schneider, B., Schweitzer, R., Sieger, R., Skjelvan, I., Sullivan, K. F., Sutherland, S. C., Sutton, A. J., Tadokoro, K., Telszewski, M., Tuma, M., van Heuven, S. M. A. C., Vandemark, D., Ward, B., Watson, A. J., and Xu, S. : A multi-decade record of high-quality CO_2 data in version 3 of the Surface Ocean CO_2 Atlas (SOCAT), *Earth System Science Data*, 8, 383–413, doi :10.5194/essd-8-383-2016, URL <https://www.earth-syst-sci-data.net/8/383/2016/>, 2016.

- Bastos, A., Friedlingstein, P., Sitch, S., Chen, C., Mialon, A., Wigneron, J.-P., Arora, V. K., Briggs, P. R., Canadell, J. G., Ciais, P., Chevallier, F., Cheng, L., Delire, C., Haverd, V., Jain, A. K., Joos, F., Kato, E., Lienert, S., Lombardozzi, D., Melton, J. R., Myneni, R., Nabel, J. E. M. S., Pongratz, J., Poulter, B., Rödenbeck, C., Séférian, R., Tian, H., van Eck, C., Viovy, N., Vuichard, N., Walker, A. P., Wiltshire, A., Yang, J., Zaehle, S., Zeng, N., and Zhu, D. : Impact of the 2015/2016 El Niño on the terrestrial carbon cycle constrained by bottom-up and top-down approaches, *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 373, 20170304, doi :10.1098/rstb.2017.0304, URL <http://rstb.royalsocietypublishing.org/lookup/doi/10.1098/rstb.2017.0304>, 2018.
- Beckage, B., Gross, L. J., Lacasse, K., Metcalf, S. S., Franck, T., Winter, J. M., Hoffman, F. M., Kinzig, A., Fefferman, N., Howe, P. D., Carr, E., and Zia, A. : Linking models of human behaviour and climate alters projected climate change, *Nature Climate Change*, 8, 79–84, doi :10.1038/s41558-017-0031-7, URL <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-017-0031-7>, 2017.
- Berthet, S., Séférian, R., Bricaud, C., Chevallier, M., Voltaire, A., and Ethé, C. : Evaluation of an online grid-coarsening algorithm in a global eddy-admitting ocean-biogeochemical model, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, p. 2019MS001644, doi :10.1029/2019MS001644, URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019MS001644>, 2019.
- Blum, J. : Contribution of Ecosystem Services to Air Quality and Climate Change Mitigation Policies : The Case of Urban Forests in Barcelona, Spain, pp. 21–54, doi :10.1201/9781315366081-10, URL <https://www.taylorfrancis.com/books/e/9781771884266/chapters/10.1201/9781315366081-10>, 2017.
- Boé, J., Hall, A., and Qu, X. : September sea-ice cover in the Arctic Ocean projected to vanish by 2100, *Nature Geoscience*, 2, 341–343, doi :10.1038/ngeo467, URL <http://www.nature.com/doi/10.1038/ngeo467>, 2009.
- Bonan, G. B. and Doney, S. C. : Climate, ecosystems, and planetary futures : The challenge to predict life in Earth system models, *Science*, 359, doi :10.1126/science.aam8328, 2018.
- Bopp, L., Resplandy, L., Orr, J., Doney, S., Dunne, J., Gehlen, M., Halloran, P., Heinze, C., Ilyina, T., Séférian, R., Tjiputra, J., and Vichi, M. : Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century : Projections with CMIP5 models, *Biogeosciences*, 10, doi :10.5194/bg-10-6225-2013, 2013a.
- Bopp, L., Resplandy, L., Orr, J. C., Doney, S. C., Dunne, J. P., Gehlen, M., Halloran, P., Heinze, C., Ilyina, T., Séférian, R., Tjiputra, J., and Vichi, M. : Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century : Projections with CMIP5 models, *Biogeosciences*, 10, 6225–6245, doi :10.5194/bg-10-6225-2013, URL <http://www.biogeosciences.net/10/6225/2013/>, 2013b.
- Boucher, O., Halloran, P. R., Burke, E. J., Doutriaux-Boucher, M., Jones, C. D., Lowe, J., Ringer, M. A., Robertson, E., and Wu, P. : Reversibility in an Earth System model in response to CO₂ concentration changes, *Environmental Research Letters*, 7, 024013, doi :10.1088/1748-9326/7/2/024013, URL <http://stacks.iop.org/1748-9326/7/i=2/a=024013?key=crossref.eb2eeb26bbd2088c8ec21123358988c9>, 2012.
- Boucher, O., de Guillebon, B., Abbadie, L., Barré, P., Bekki, S., and Bensaude-Vincent, B. : Atelier de Réflexion Prospective REAGIR - Réflexion systémique sur les enjeux et méthodes de la géo-ingénierie de l'environnement, Tech. rep., Agence Nationale de la Recherche, Paris, France, URL <http://www.agence-nationale-recherche.fr/fileadmin/documents/2016/Rapport-final-ARP-REAGIR-mai-2014.pdf>, 2014.
- Boysen, L. R., Lucht, W., Gerten, D., and Heck, V. : Impacts devalue the potential of large-scale terrestrial CO₂ removal through biomass plantations, *Environmental Research Letters*, 11, 095010, doi :10.1088/1748-9326/11/9/095010, URL <http://stacks.iop.org/1748-9326/11/i=9/a=095010?key=crossref.244d75c1a47b210f79f0a1cb65588a46>, 2016.
- Boysen, L. R., Lucht, W., and Gerten, D. : Trade-offs for food production, nature conservation and climate limit the terrestrial carbon dioxide removal potential, *Global Change Biology*, 23, 4303–4317, doi :10.1111/gcb.13745, URL <http://doi.wiley.com/10.1111/gcb.13745>, 2017.

- Burke, E. J., Ekici, A., Huang, Y., Chadburn, S. E., Huntingford, C., Ciais, P., Friedlingstein, P., Peng, S., and Krinner, G. : Quantifying uncertainties of permafrost carbon-climate feedbacks, *Biogeosciences*, 14, 3051–3066, doi :10.5194/bg-14-3051-2017, 2017.
- Cadule, P., Bopp, L., and Friedlingstein, P. : A revised estimate of the processes contributing to global warming due to climate-carbon feedback, *Geophysical Research Letters*, 36, doi :10.1029/2009GL038681, URL <http://www.agu.org/pubs/crossref/2009/2009GL038681.shtml>, 2009.
- Chatterjee, A., Gierach, M. M., Sutton, A. J., Feely, R. A., Crisp, D., Eldering, A., Gunson, M. R., O'Dell, C. W., Stephens, B. B., and Schimel, D. S. : Influence of El Niño on atmospheric CO₂ over the tropical Pacific Ocean : Findings from NASA's OCO-2 mission, *Science*, 358, eaam5776, doi :10.1126/science.aam5776, URL <http://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.aam5776>, 2017.
- Cheung, W. W. L., Sarmiento, J. L., Dunne, J., Frölicher, T. L., Lam, V. W. Y., Deng Palomares, M. L., Watson, R., and Pauly, D. : Shrinking of fishes exacerbates impacts of global ocean changes on marine ecosystems, *Nature Climate Change*, 3, 254–258, doi :10.1038/nclimate1691, URL <http://www.nature.com/doi/10.1038/nclimate1691>, 2012.
- Chust, G., Allen, J. I., Bopp, L., Schrum, C., Holt, J., Tsiaras, K., Zavatarelli, M., Chifflet, M., Cannaby, H., Dadou, I., Daewel, U., Wakelin, S. L., Machu, E., Pushpadas, D., Butenschon, M., Artioli, Y., Petihakis, G., Smith, C., Garçon, V., Goubanova, K., Le Vu, B., Fach, B. A., Salihoglu, B., Clementi, E., and Irigoien, X. : Biomass changes and trophic amplification of plankton in a warmer ocean, *Global Change Biology*, 20, 2124–2139, doi :10.1111/gcb.12562, 2014.
- Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Quéré, C. L., Myneni, R., Piao, S., and Thornton, P. : Carbon and Other Biogeochemical Cycles, *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*, pp. 465–570, doi :10.1017/CBO9781107415324.015, URL <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9781107415324A023>, 2013.
- Collins, W. D., Craig, A. P., Truesdale, J. E., Di Vittorio, A. V., Jones, A. D., Bond-Lamberty, B., Calvin, K. V., Edmonds, J. A., Kim, S. H., Thomson, A. M., Patel, P., Zhou, Y., Mao, J., Shi, X., Thornton, P. E., Chini, L. P., and Hurtt, G. C. : The integrated Earth System Model (iESM) : formulation and functionality, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, 8, 381–427, doi :10.5194/gmdd-8-381-2015, URL <http://www.geosci-model-dev-discuss.net/8/381/2015/>, 2015.
- Comyn-Platt, E., Hayman, G., Huntingford, C., Chadburn, S. E., Burke, E. J., Harper, A. B., Collins, W. J., Webber, C. P., Powell, T., Cox, P. M., Gedney, N., and Sitch, S. : Carbon budgets for 1.5 and 2 °C targets lowered by natural wetland and permafrost feedbacks, *Nature Geoscience*, 11, 568–573, doi :10.1038/s41561-018-0174-9, URL <http://www.nature.com/articles/s41561-018-0174-9>, 2018.
- Conte, L., Szopa, S., Séférian, R., and Bopp, L. : The oceanic cycle of carbon monoxide and its emissions to the atmosphere, *Biogeosciences*, 16, 881–902, doi :10.5194/bg-16-881-2019, URL <https://www.biogeosciences.net/16/881/2019/>, 2019.
- Cox, P. M., Pearson, D., Booth, B. B., Friedlingstein, P., Huntingford, C., Jones, C. D., and Luke, C. M. : Sensitivity of tropical carbon to climate change constrained by carbon dioxide variability, *Nature*, 494, 341–344, doi :10.1038/nature11882, URL <http://www.nature.com/doi/10.1038/nature11882>, 2013.
- Dahan, A. : Putting the Earth System in a numerical box? The evolution from climate modeling toward global change, *Studies in History and Philosophy of Science Part B - Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 41, 282–292, doi :10.1016/j.shpsb.2010.08.002, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1355219810000511>, 2010.
- Daniel, M., Lemonsu, A., Déqué, M., Somot, S., Alias, A., and Masson, V. : Benefits of explicit urban parameterization in regional climate modeling to study climate and city interactions, *Climate*

- Dynamics, pp. 1–20, doi :10.1007/s00382-018-4289-x, URL <http://link.springer.com/10.1007/s00382-018-4289-x>, 2018.
- de Coninck, H., Revi, A., Babiker, M., Bertoldi, P., Buckeridge, M., Cartwright, A., Dong, W., Ford, J., Fuss, S., Hourcade, J., Ley, D., Mechler, R., Newman, P., Revokatova, A., Schultz, S., Steg, L., and Sugiyama, T. : Strengthening and Implementing the Global Response, Global warming of 1.5°C . An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, URL <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/15516/https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/11/SR15{ }Chapter4{ }Low{ }Res.pdf>, 2018.
- De Noblet-Ducoudré, N., Boisier, J. P., Pitman, A., Bonan, G. B., Brovkin, V., Cruz, F., Delire, C., Gayler, V., Van Den Hurk, B. J., Lawrence, P. J., Van Der Molen, M. K., Müller, C., Reick, C. H., Strengers, B. J., and Voldoire, A. : Determining robust impacts of land-use-induced land cover changes on surface climate over North America and Eurasia : Results from the first set of LUCID experiments, *Journal of Climate*, 25, 3261–3281, doi :10.1175/JCLI-D-11-00338.1, URL <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI-D-11-00338.1>, 2012.
- Decharme, B., Delire, C., Minvielle, M., Colin, J., Vergnes, J., Alias, A., Saint-Martin, D., Séférian, R., Sénési, S., and Voldoire, A. : Recent changes in the ISBA-CTRIP land surface system for use in the CNRM-CM6 climate model and in global off-line hydrological applications, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, p. 2018MS001545, doi :10.1029/2018MS001545, URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018MS001545>, 2019.
- DeFries, R. and Eshleman, K. N. : Land-use change and hydrologic processes : a major focus for the future, *Hydrological Processes*, 18, 2183–2186, doi :10.1002/hyp.5584, URL <http://doi.wiley.com/10.1002/hyp.5584>, 2004.
- Delire, C., Séférian, R., Decharme, B., Joetzjer, E., Morel, X., and Alkama, R. : The global land carbon cycle simulated with ISBA, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, pp. 1–41, submitted.
- DeVries, T., Holzer, M., Primeau, F., Sarmiento, J. L., Gloor, M., Ilyina, T., Landschützer, P., Lenton, A., Lima, I. D., Nowicki, M., Schwinger, J., and Séférian, R. : Recent increase in oceanic carbon uptake driven by weaker upper-ocean overturning, *Nature*, 542, 215–218, doi :10.1038/nature21068, URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28179663http://www.nature.com/articles/nature21068>, 2017.
- DeVries, T., Le Quéré, C., Andrews, O., Berthet, S., Hauck, J., Ilyina, T., Landschützer, P., Lenton, A., Lima, I. D., Nowicki, M., Schwinger, J., and Séférian, R. : Decadal trends in the ocean carbon sink, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, p. 201900371, doi :10.1073/pnas.1900371116, URL <http://www.pnas.org/lookup/doi/10.1073/pnas.1900371116>, 2019.
- Dlugokencky, E. and Tans, P. : NOAA/ESRL Global Monitoring Division - Global Greenhouse Gas Reference Network, URL www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/, 2016.
- Doney, S. C., Ruckelshaus, M., Emmett Duffy, J., Barry, J. P., Chan, F., English, C. A., Galindo, H. M., Grebmeier, J. M., Hollowed, A. B., Knowlton, N., Polovina, J., Rabalais, N. N., Sydeman, W. J., and Talley, L. D. : Climate Change Impacts on Marine Ecosystems, *Annual Review of Marine Science*, 4, 11–37, doi :10.1146/annurev-marine-041911-111611, URL <http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-marine-041911-111611>, 2012.
- Douville, H. and Plazzotta, M. : Midlatitude Summer Drying : An Underestimated Threat in CMIP5 Models?, *Geophysical Research Letters*, 44, 9967–9975, doi :10.1002/2017GL075353, URL <http://doi.wiley.com/10.1002/2017GL075353>, 2017.
- Douville, H., Voldoire, A., and Geoffroy, O. : The recent global warming hiatus : What is the role of Pacific variability ?, *Geophysical Research Letters*, 42, 880–888, doi :10.1002/2014GL062775, URL <http://dx.doi.org/10.1002/2014GL062775>, 2015.

- Epa, U. and Change Division, C. : Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions : 1990 -2030, URL https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-05/documents/epa_{ }global_{ }nonco2_{ }projections_{ }dec2012.pdf, 1990.
- Etminan, M., Myhre, G., Highwood, E. J., Shine, K. P., Burke, E. J., Harper, A. B., Collins, W. J., Webber, C. P., Powell, T., Cox, P. M., Gedney, N., and Sitch, S. : Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide : A significant revision of the methane radiative forcing, *Geophysical Research Letters*, 43, 12,614–12,623, doi :10.1002/2016GL071930, URL <http://doi.wiley.com/10.1002/2016GL071930>, 2016.
- Feely, R. A., Wanninkhof, R., Takahashi, T., and Tans, P. : Influence of El Niño on the equatorial Pacific contribution to atmospheric CO₂ accumulation, *Nature*, 398, 597–601, doi :10.1038/19273, URL <http://www.nature.com/articles/19273>, 1999.
- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Gleckler, P., Guilyardi, E., Jakob, C., Kattsov, V., Reason, C., and Rummukainen, M. : Climate Change 2013 - The Physical Science Basis, *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 741–866, doi :10.1017/CBO9781107415324, URL <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CB09781107415324>, 2014.
- Frenger, I., Münnich, M., and Gruber, N. : Imprint of Southern Ocean eddies on chlorophyll, *Biogeosciences Discussions*, 2018, 1–26, doi :10.5194/bg-2018-70, URL <https://www.biogeosciences-discuss.net/bg-2018-70/>, 2018.
- Friedlingstein, P. : Carbon cycle feedbacks and future climate change, *Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373, 20140421, doi : 10.1098/rsta.2014.0421, URL <http://rsta.royalsocietypublishing.org/lookup/doi/10.1098/rsta.2014.0421>, 2015.
- Friedlingstein, P., Dufrense, J.-L., Cox, P. M., and Rayner, P. : How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle?, *Tellus B*, 55, 692–700, doi :10.1034/j.1600-0889.2003.01461.x, URL <http://www.tellusb.net/index.php/tellusb/article/view/16765>, 2003.
- Friedlingstein, P., Cox, P., Betts, R., Bopp, L., von Bloh, W., Brovkin, V., Cadule, P., Doney, S., Eby, M., Fung, I., Bala, G., John, J., Jones, C., Joos, F., Kato, T., Kawamiya, M., Knorr, W., Lindsay, K., Matthews, H. D., Raddatz, T., Rayner, P., Reick, C., Roeckner, E., Schnitzler, K. G., Schnur, R., Strassmann, K., Weaver, A. J., Yoshikawa, C., and Zeng, N. : Climate-carbon cycle feedback analysis : Results from the C4MIP model intercomparison, *Journal of Climate*, 19, 3337–3353, doi : 10.1175/JCLI3800.1, URL <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI3800.1>, 2006.
- Friedlingstein, P., Meinshausen, M., Arora, V. K., Jones, C. D., Anav, A., Liddicoat, S. K., and Knutti, R. : Uncertainties in CMIP5 climate projections due to carbon cycle feedbacks, *Journal of Climate*, 27, 511–526, doi :10.1175/JCLI-D-12-00579.1, URL <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI-D-12-00579.1>, 2014.
- Frölicher, T. L. and Joos, F. : Reversible and irreversible impacts of greenhouse gas emissions in multi-century projections with the NCAR global coupled carbon cycle-climate model, *Climate Dynamics*, 35, 1439–1459, doi :10.1007/s00382-009-0727-0, URL <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s00382-009-0727-0>, 2010.
- Frölicher, T. L., Rodgers, K. B., Stock, C. A., and Cheung, W. W. L. : Sources of uncertainties in 21st century projections of potential ocean ecosystem stressors, *Global Biogeochemical Cycles*, 30, 1224–1243, doi :10.1002/2015GB005338, URL <http://doi.wiley.com/10.1002/2015GB005338>, 2016.
- Gasser, T., Kechiar, M., Ciais, P., Burke, E. J., Kleinen, T., Zhu, D., Huang, Y., Ekici, A., and Obersteiner, M. : Path-dependent reductions in CO₂ emission budgets caused by permafrost carbon release, *Nature Geoscience*, doi :10.1038/s41561-018-0227-0, URL <http://www.nature.com/articles/s41561-018-0227-0>, 2018.

- Gehlen, M., Séférian, R., Jones, D. O., Roy, T., Roth, R., Barry, J., Bopp, L., Doney, S. C., Dunne, J. P., Heinze, C., Joos, F., Orr, J. C., Resplandy, L., Segschneider, J., and Tjiputra, J. : Projected pH reductions by 2100 might put deep North Atlantic biodiversity at risk, *Biogeosciences*, 11, 6955–6967, doi :10.5194/bg-11-6955-2014, URL <http://www.biogeosciences.net/11/6955/2014/bg-11-6955-2014.pdf>, 2014.
- Gibelin, A. L., Calvet, J. C., and Viovy, N. : Modelling energy and CO₂ fluxes with an interactive vegetation land surface model-Evaluation at high and middle latitudes, *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 1611–1628, doi :10.1016/j.agrformet.2008.05.013, URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016819230800155X>, 2008.
- Gillett, N. P., Weaver, A. J., Zwiers, F. W., and Flannigan, M. D. : Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires, *Geophysical Research Letters*, 31, L18 211, doi :10.1029/2004GL020876, URL <http://doi.wiley.com/10.1029/2004GL020876>, 2004.
- Gillett, N. P., Arora, V. K., Matthews, D., and Allen, M. R. : Constraining the ratio of global warming to cumulative CO₂ emissions using CMIP5 simulations, *Journal of Climate*, 26, 6844–6858, doi :10.1175/JCLI-D-12-00476.1, URL <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI-D-12-00476.1>, 2013.
- Goodwin, P., Katavouta, A., Roussenov, V. M., Foster, G. L., Rohling, E. J., and Williams, R. G. : Pathways to 1.5 °C and 2 °C warming based on observational and geological constraints, *Nature Geoscience*, 11, 102–107, doi :10.1038/s41561-017-0054-8, URL <http://www.nature.com/articles/s41561-017-0054-8>, 2018.
- Gruber, N., Landschützer, P., and Lovenduski, N. S. : The Variable Southern Ocean Carbon Sink, *Annual Review of Marine Science*, 11, annurev-marine-121916-063407, doi : 10.1146/annurev-marine-121916-063407, URL <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-marine-121916-063407>, 2019.
- Hall, A. and Qu, X. : Using the current seasonal cycle to constrain snow albedo feedback in future climate change, *Geophysical Research Letters*, 33, L03 502, doi :10.1029/2005GL025127, URL <http://doi.wiley.com/10.1029/2005GL025127>, 2006.
- Hall, A., Cox, P., Huntingford, C., and Klein, S. : Progressing emergent constraints on future climate change, doi :10.1038/s41558-019-0436-6, URL <http://www.nature.com/articles/s41558-019-0436-6>, 2019.
- Hansen, J., Russel, G., Rind, D., Stone, P. H., Lacis, A., Lebedeff, S., Ruedy, R., and Travis, L. : Efficient three-dimensional global models for climate studies : models I and II., *Mon. Wea. Rev.*, 111, 609–662, doi :10.1175/1520-0493(1983)111<0609:ETDGMF>2.0.CO;2, URL <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493%7D281983%7D29111%7D3C0609%7D3AETDGMF%7D3E2.0.CO%7D3B2>, 1983.
- Hauck, J., Köhler, P., Wolf-Gladrow, D., and Völker, C. : Iron fertilisation and century-scale effects of open ocean dissolution of olivine in a simulated CO₂ removal experiment, *Environmental Research Letters*, 11, 024 007, doi :10.1088/1748-9326/11/2/024007, URL <http://stacks.iop.org/1748-9326/11/i=2/a=024007?key=crossref.7d5ab8a17f2b2687fa59e1d3b4b66cf6>, 2016.
- Hawkins, E. and Sutton, R. : Time of emergence of climate signals, *Geophysical Research Letters*, 39, n/a–n/a, doi :10.1029/2011GL050087, URL <http://www.agu.org/pubs/crossref/2012/2011GL050087.shtml>, 2012.
- Heck, V., Gerten, D., Lucht, W., and Boysen, L. R. : Is extensive terrestrial carbon dioxide removal a 'green' form of geoengineering? A global modelling study, *Global and Planetary Change*, 137, 123–130, doi :10.1016/j.gloplacha.2015.12.008, URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921818115301612>, 2016.

- Henson, S. A., Beaulieu, C., Ilyina, T., John, J. G., Long, M., Séférian, R., Tjiputra, J., and Sarmiento, J. L. : Rapid emergence of climate change in environmental drivers of marine ecosystems, *Nature Communications*, 8, 14682, doi :10.1038/ncomms14682, URL <http://www.nature.com/doi/10.1038/ncomms14682>, 2017.
- Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I., Diedhiou, A., Djalante, R., Ebi, K., Engelbrecht, F., Guangsheng, Z., Guiot, J., Hijioka, Y., Mehrotra, S., Payne, A., Seneviratne, S. I., Thomas, A., and Warren, R. : Chapter 3 - Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. In : *Global warming of 1.5°C*, Tech. rep., doi :10.1002/ejoc.201200111, URL <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/15518/https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/12/SR15{ }Chapter3{ }Low{ }Res.pdf>, 2018.
- Ilyina, T., Wolf-Gladrow, D., Munhoven, G., and Heinze, C. : Assessing the potential of calcium-based artificial ocean alkalization to mitigate rising atmospheric CO₂ and ocean acidification, *Geophysical Research Letters*, 40, 5909–5914, doi :10.1002/2013GL057981, URL <http://onlinelibrary.wiley.com/biblioplanets.gate.inist.fr/doi/10.1002/2013GL057981/full>, 2013.
- IPCC : Summary for Policymakers, in : *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by Stocker, T., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P., p. 33, Cambridge University Press, Cambridge, doi :10.1017/CBO9781107415324, 2013.
- IPCC : Summary for Policymakers, in : *Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., von Stechow, C., Zwickel, T., and Minx, J., pp. 1–30, Cambridge University Press, Cambridge, doi :10.1017/CBO9781107415324, 2014a.
- IPCC : Summary for policymakers, in : *Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J., 2014b.
- IPCC : *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*, IPCC, doi :10.1017/CBO9781107415324, URL <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CB09781107415324>, 2014c.
- Joint Research Centre : *Global Emissions EDGAR v4.2*, URL <http://edgar.jrc.ec.europa.eu>, 2011.
- Jones, C., Robertson, E., Arora, V., Friedlingstein, P., Shevliakova, E., Bopp, L., Brovkin, V., Hajima, T., Kato, E., Kawamiya, M., Liddicoat, S., Lindsay, K., Reick, C. H., Roelandt, C., Segsneider, J., and Tjiputra, J. : Twenty-first-century compatible co₂ emissions and airborne fraction simulated by cmip5 earth system models under four representative concentration pathways, *Journal of Climate*, 26, 4398–4413, doi :10.1175/JCLI-D-12-00554.1, URL <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI-D-12-00554.1>, 2013.
- Jones, C. D., Arora, V., Friedlingstein, P., Bopp, L., Brovkin, V., Dunne, J., Graven, H., Hoffman, F., Ilyina, T., John, J. G., Jung, M., Kawamiya, M., Koven, C., Pongratz, J., Raddatz, T., Randerson, J. T., and Zaehle, S. : C4MIP – The Coupled Climate–Carbon Cycle Model Intercomparison Project : experimental protocol for CMIP6, *Geoscientific Model Development*, 9, 2853–2880, doi :10.5194/gmd-9-2853-2016, URL <http://www.geosci-model-dev.net/9/2853/2016/>, 2016a.
- Jones, C. D., Ciais, P., Davis, S. J., Friedlingstein, P., Gasser, T., Peters, G. P., Rogelj, J., van Vuuren, D. P., Canadell, J. G., Cowie, A., Jackson, R. B., Jonas, M., Kriegler, E., Littleton, E., Lowe, J. A., Milne, J., Shrestha, G., Smith, P., Torvanger, A., and Wiltshire, A. : Simulating the Earth system response to negative emissions, *Environmental Research Letters*, 11, 095012, doi :10.1088/1748-9326/11/9/095012, URL <http://stacks.iop.org/1748-9326/11/i=9/a=095012?key=crossref.6b5747055a178d1c59ffa940adb33091>, 2016b.

- Jones, C. D., Frölicher, T. L., Koven, C., MacDougall, A. H., Matthews, H. D., Zickfeld, K., Rogelj, J., Tokarska, K. B., Gillett, N., Ilyina, T., Meinshausen, M., Mengis, N., Seferian, R., and Eby, M. : The Zero Emission Commitment Model Intercomparison Project (ZECMIP) contribution to CMIP6 : Quantifying committed climate changes following zero carbon emissions, *Geoscientific Model Development Discussions*, pp. 1–18, doi :10.5194/gmd-2019-153, URL <https://www.geosci-model-dev-discuss.net/gmd-2019-153/>, 2019.
- Jung, M., Reichstein, M., Margolis, H. A., Cescatti, A., Richardson, A. D., Arain, M. A., Arneth, A., Bernhofer, C., Bonal, D., Chen, J., Gianelle, D., Gobron, N., Kiely, G., Kutsch, W., Lasslop, G., Law, B. E., Lindroth, A., Merbold, L., Montagnani, L., Moors, E. J., Papale, D., Sottocornola, M., Vaccari, F., and Williams, C. : 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, G00J07, doi :10.1029/2010JG001566, URL <http://dx.doi.org/10.1029/2010JG001566>, 2011.
- Keith, D. W., Wagner, G., and Zabel, C. L. : Solar geoengineering reduces atmospheric carbon burden, *Nature Climate Change*, 7, 617–619, doi :10.1038/nclimate3376, URL <http://www.nature.com/doi/10.1038/nclimate3376>, 2017.
- Keller, D. P., Feng, E. Y., and Oeschler, A. : Potential climate engineering effectiveness and side effects during a high carbon dioxide-emission scenario, *Nature Communications*, 5, doi :10.1038/ncomms4304, URL <http://www.nature.com/doi/10.1038/ncomms4304>, 2014.
- Knutti, R., Masson, D., and Gettelman, A. : Climate model genealogy : Generation CMIP5 and how we got there, *Geophysical Research Letters*, 40, 1194–1199, doi :10.1002/grl.50256, URL <http://doi.wiley.com/10.1002/grl.50256>, 2013.
- Kosaka, Y. : Atmospheric science : Increasing wind sinks heat, *Nature Climate Change*, 4, 172–173, doi :10.1038/nclimate2138, URL <http://www.nature.com/doi/10.1038/nclimate2138>, 2014.
- Krasting, J. P., Dunne, J. P., Shevliakova, E., and Stouffer, R. J. : Trajectory sensitivity of the transient climate response to cumulative carbon emissions, *Geophysical Research Letters*, 41, 2520–2527, doi :10.1002/2013GL059141, URL <http://doi.wiley.com/10.1002/2013GL059141>, 2014.
- Kravitz, B., Robock, A., Boucher, O., Schmidt, H., Taylor, K. E., Stenchikov, G., and Schulz, M. : The Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP), *Atmospheric Science Letters*, 12, 162–167, doi :10.1002/asl.316, URL <http://doi.wiley.com/10.1002/asl.316>, 2011.
- Kwiatkowski, L., Bopp, L., Aumont, O., Ciais, P., Cox, P. M., Laufkötter, C., Li, Y., and Séférian, R. : Emergent constraints on projections of declining primary production in the tropical oceans, *Nature Climate Change*, 7, 355–358, doi :10.1038/nclimate3265, URL <http://www.nature.com/doi/10.1038/nclimate3265>, 2017.
- Landschützer, P., Gruber, N., Haumann, F. A., Rodenbeck, C., Bakker, D. C. E., van Heuven, S., Hoppema, M., Metzl, N., Sweeney, C., Takahashi, T., Tilbrook, B., and Wanninkhof, R. : The reinvigoration of the Southern Ocean carbon sink, *Science*, 349, 1221–1224, doi :10.1126/science.aab2620, URL <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.aab2620>, 2015.
- Landschützer, P., Gruber, N., and Bakker, D. C. : Decadal variations and trends of the global ocean carbon sink, *Global Biogeochemical Cycles*, 30, 1396–1417, doi :10.1002/2015GB005359, URL <http://dx.doi.org/10.1002/2015GB005359>, 2016.
- Laufkötter, C., Vogt, M., Gruber, N., Aita-Noguchi, M., Aumont, O., Bopp, L., Buitenhuis, E., Doney, S., Dunne, J., Hashioka, T., Hauck, J., Hirata, T., John, J., Le Quere, C., Lima, I., Nakano, H., Seferian, R., Totterdell, I., Vichi, M., and Volker, C. : Drivers and uncertainties of future global marine primary production in marine ecosystem models, *Biogeosciences*, 12, doi :10.5194/bg-12-6955-2015, 2015.
- Lawrence, M. G., Schäfer, S., Muri, H., Scott, V., Oeschler, A., Vaughan, N. E., Boucher, O., Schmidt, H., Haywood, J., and Scheffran, J. : Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals, *Nature Communications*, 9, 3734, doi :10.1038/s41467-018-05938-3, URL <http://www.nature.com/articles/s41467-018-05938-3>, 2018.

- Le Mézo, P., Lefort, S., Sférian, R., Aumont, O., Maury, O., Murtugudde, R., and Bopp, L. : Natural variability of marine ecosystems inferred from a coupled climate to ecosystem simulation, *Journal of Marine Systems*, 153, doi :10.1016/j.jmarsys.2015.09.004, 2016.
- Le Quere, C., Rodenbeck, C., Buitenhuis, E. T., Conway, T. J., Langenfelds, R., Gomez, A., Labuschagne, C., Ramonet, M., Nakazawa, T., Metzl, N., Gillett, N., and Heimann, M. : Saturation of the Southern Ocean CO₂ Sink Due to Recent Climate Change, *Science*, 316, 1735–1738, doi :10.1126/science.1136188, URL <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1136188>, 2007.
- Le Quéré, C., Moriarty, R., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Sitch, S., Korsbakken, J. I., Friedlingstein, P., Peters, G. P., Andres, R. J., Boden, T. A., Houghton, R. A., House, J. I., Keeling, R. F., Tans, P., Arneeth, A., Bakker, D. C., Barbero, L., Bopp, L., Chang, J., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Fader, M., Feely, R. A., Gkritzalis, T., Harris, I., Hauck, J., Ilyina, T., Jain, A. K., Kato, E., Kitidis, V., Klein Goldewijk, K., Koven, C., Landschützer, P., Lauvset, S. K., Lefèvre, N., Lenton, A., Lima, I. D., Metzl, N., Millero, F., Munro, D. R., Murata, A., S. Nabel, J. E., Nakaoka, S., Nojiri, Y., O'Brien, K., Olsen, A., Ono, T., Pérez, F. F., Pfeil, B., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Rödenbeck, C., Saito, S., Schuster, U., Schwinger, J., Sférian, R., Steinhoff, T., Stocker, B. D., Sutton, A. J., Takahashi, T., Tilbrook, B., Van Der Laan-Luijkx, I. T., Van Der Werf, G. R., Van Heuven, S., Vandemark, D., Viovy, N., Wiltshire, A., Zaehle, S., and Zeng, N. : Global Carbon Budget 2015, *Earth System Science Data*, 7, 349–396, doi :10.5194/essd-7-349-2015, URL <http://www.earth-syst-sci-data.net/7/349/2015/essd-7-349-2015.pdf>, 2015.
- Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Hauck, J., Pongratz, J., Pickers, P. A., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Canadell, J. G., Arneeth, A., Arora, V. K., Barbero, L., Bastos, A., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Doney, S. C., Gkritzalis, T., Goll, D. S., Harris, I., Haverd, V., Hoffman, F. M., Hoppema, M., Houghton, R. A., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A. K., Johannessen, T., Jones, C. D., Kato, E., Keeling, R. F., Klein Goldewijk, K., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lienert, S., Liu, Z., Lombardozzi, D., Metzl, N., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S.-I., Neill, C., Olsen, A., Ono, T., Patra, P., Peregón, A., Peters, W., Peylin, P., Pfeil, B., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rocher, M., Rödenbeck, C., Schuster, U., Schwinger, J., Sférian, R., Skjelvan, I., Steinhoff, T., Sutton, A., Tans, P. P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F. N., Van Der Laan-Luijkx, I. T., Van Der Werf, G. R., Viovy, N., Walker, A. P., Wiltshire, A. J., Wright, R., Zaehle, S., and Zheng, B. : Global Carbon Budget 2018, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 2141–2194, doi :10.5194/essd-10-2141-2018, URL <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018>, 2018.
- Lefort, S., Aumont, O., Bopp, L., Arsouze, T., Gehlen, M., and Maury, O. : Spatial and body-size dependent response of marine pelagic communities to projected global climate change, *Global Change Biology*, 21, 154–164, doi :10.1111/gcb.12679, URL <http://doi.wiley.com/10.1111/gcb.12679>, 2015.
- Lengaigne, M., Menkes, C., Aumont, O., Gorgues, T., Bopp, L., André, J. M., and Madec, G. : Influence of the oceanic biology on the tropical Pacific climate in a coupled general circulation model, *Climate Dynamics*, 28, 503–516, doi :10.1007/s00382-006-0200-2, URL <http://link.springer.com/10.1007/s00382-006-0200-2>, 2007.
- Lengaigne, M., Madec, G., Bopp, L., Menkes, C., Aumont, O., and Cadule, P. : Bio-physical feedbacks in the Arctic Ocean using an Earth system model, *Geophysical Research Letters*, 36, L21602–, doi :10.1029/2009GL040145, URL <http://www.agu.org/pubs/crossref/2009/2009GL040145.shtml>, 2009.
- Li, H., Ilyina, T., Müller, W. A., and Sienz, F. : Decadal predictions of the North Atlantic CO₂ uptake, *Nature Communications*, 7, 11076, doi :10.1038/ncomms11076, URL <http://www.nature.com/doi/10.1038/ncomms11076>, 2016.
- Library, W. O., Oleson, K. W., Bonan, G. B., Feddema, J., and Jackson, T. : An examination of urban heat island characteristics in a global climate model, *INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY Int. J. Climatol*, 31, 1848–1865, doi :10.1002/joc.2201, URL <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/joc.2201>, 2011.
- Liu, J., Bowman, K. W., Schimel, D. S., Parazoo, N. C., Jiang, Z., Lee, M., Bloom, A. A., Wunch, D., Frankenberg, C., Sun, Y., O'Dell, C. W., Gurney, K. R., Menemenlis, D., Gierach, M., Crisp, D., and

- Eldering, A. : Contrasting carbon cycle responses of the tropical continents to the 2015–2016 El Niño, *Science*, 358, eaam5690, doi :10.1126/science.aam5690, URL <http://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.aam5690>, 2017.
- Liu, Y. Y., van Dijk, A. I. J. M., de Jeu, R. A. M., Canadell, J. G., McCabe, M. F., Evans, J. P., and Wang, G. : Recent reversal in loss of global terrestrial biomass, *Nature Climate Change*, 5, 470–474, doi :10.1038/nclimate2581, URL <http://www.nature.com/doi/10.1038/nclimate2581>, 2015.
- Lowe, J. A. and Bernie, D. : The impact of Earth system feedbacks on carbon budgets and climate response, *Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376, 20170263, doi :10.1098/rsta.2017.0263, URL <http://rsta.royalsocietypublishing.org/lookup/doi/10.1098/rsta.2017.0263>, 2018.
- Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J.-M., Siegenthaler, U., Raynaud, D., Jouzel, J., Fischer, H., Kawamura, K., and Stocker, T. F. : High-resolution carbon dioxide concentration record 650 000–800 000 years before present, *Nature*, 453, 379–382, doi :10.1038/nature06949, URL <http://www.nature.com/doi/10.1038/nature06949>, 2008.
- Macdougall, A. H. : Reversing climate warming by artificial atmospheric carbon-dioxide removal : Can a Holocene-like climate be restored?, *Geophysical Research Letters*, 40, 5480–5485, doi :10.1002/2013GL057467, URL <http://dx.doi.org/10.1002/2013GL057467>, 2013.
- Malhi, Y., Rowland, L., Aragão, L. E. O. C., and Fisher, R. A. : New insights into the variability of the tropical land carbon cycle from the El Niño of 2015/2016, *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 373, 20170298, doi :10.1098/rstb.2017.0298, URL <http://rstb.royalsocietypublishing.org/lookup/doi/10.1098/rstb.2017.0298>, 2018.
- Mao, J., Ribes, A., Yan, B., Shi, X., Thornton, P. E., Séférian, R., Ciais, P., Myneni, R. B., Douville, H., Piao, S., Zhu, Z., Dickinson, R. E., Dai, Y., Ricciuto, D. M., Jin, M., Hoffman, F. M., Wang, B., Huang, M., and Lian, X. : Human-induced greening of the northern extratropical land surface, *Nature Climate Change*, 6, 959–963, doi :10.1038/nclimate3056, URL <http://www.nature.com/doi/10.1038/nclimate3056>, 2016.
- Masson, Moigne, P. L., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., Belamari, S., Barbu, A., Boone, A., Bouyssel, F., Brousseau, P., Brun, E., Calvet, J.-C., Carrer, D., Decharme, B., Delire, C., Donier, S., Essaouini, K., Gibelin, A.-L., Giordani, H., Habets, F., Jidane, M., Kerdraon, G., Kourzeneva, E., Lafaysse, M., Lafont, S., Brossier, C. L., Lemonsu, A., Mahfouf, J.-F., Marguinaud, P., Mokhtari, M., Morin, S., Pigeon, G., Salgado, R., Seity, Y., Taillefer, F., Tanguy, G., Tulet, P., Vincendon, B., Vionnet, V., and Voltaire, A. : The SURFEXv7.2 externalized platform for the simulation of Earth surface variables and fluxes., *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 929–960, doi :10.5194/gmd-6-929-2013-supplement, URL http://www.researchgate.net/publication/236456205_{_}The_{_}SURFEXv7.2_{_}externalized_{_}platform_{_}for_{_}the_{_}simulation_{_}of_{_}Earth_{_}surface_{_}variables_{_}and_{_}fluxes, 2012.
- Matthews, H. D. and Keith, D. W. : Carbon-cycle feedbacks increase the likelihood of a warmer future, *Geophysical Research Letters*, 34, doi :10.1029/2006GL028685, URL <http://www.agu.org/pubs/crossref/2007/2006GL028685.shtml>, 2007.
- Matthews, H. D., Gillett, N. P., Stott, P. A., and Zickfeld, K. : The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions, *Nature*, 459, 829–832, doi :10.1038/nature08047, URL <http://www.nature.com/doi/10.1038/nature08047>, 2009.
- Meijl, H. V., Rheenen, T. V., Tabeau, A., and Eickhout, B. : The impact of different policy environments on agricultural land use in Europe, *Scenario-Based Studies of Future Land Use in Europe*, 114, 21–38, doi :10.1016/j.agee.2005.11.006, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880905005323>, 2006.
- Millar, R. J., Fuglestedt, J. S., Friedlingstein, P., Rogelj, J., Grubb, M. J., Matthews, H. D., Skeie, R. B., Forster, P. M., Frame, D. J., and Allen, M. R. : Emission budgets and pathways consistent

- with limiting warming to 1.5°C, *Nature Geoscience*, 10, 741–747, doi :10.1038/NCEO3031, URL <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/ngeo3031>, 2017.
- Moore, M. R., Gollehon, N. R., and Carey, M. B. : Multicrop Production Decisions in Western Irrigated Agriculture - the Role of Water Price, *American Journal of Agricultural Economics*, 76, 859–874, doi :10.2307/1243747, URL <http://ajae.oxfordjournals.org/content/76/4/859.abstract>, 1994.
- Naudts, K., Chen, Y., McGrath, M. J., Ryder, J., Valade, A., Otto, J., and Luysaert, S. : Europe's forest management did not mitigate climate warming, *Science*, 351, 597–600, doi :10.1126/science.aad7270, URL <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.aad7270>, 2016.
- Orr, J. C., Najjar, R. G., Aumont, O., Bopp, L., Bullister, J. L., Danabasoglu, G., Doney, S. C., Dunne, J. P., Dutay, J.-C., Graven, H., Griffies, S. M., John, J. G., Joos, F., Levin, I., Lindsay, K., Matear, R. J., McKinley, G. A., Mouchet, A., Oschlies, A., Romanou, A., Schlitzer, R., Tagliabue, A., Tanhua, T., and Yool, A. : Biogeochemical protocols and diagnostics for the CMIP6 Ocean Model Intercomparison Project (OMIP), *Geoscientific Model Development*, 10, 2169–2199, doi :10.5194/gmd-10-2169-2017, URL <https://www.geosci-model-dev.net/10/2169/2017/>, 2017.
- Peters, G. P., Marland, G., Le Quéré, C., Boden, T., Canadell, J. G., and Raupach, M. R. : Rapid growth in CO₂ emissions after the 2008–2009 global financial crisis, *Nature Climate Change*, 2, 2–4, doi :10.1038/nclimate1332, URL <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nclimate1332>, 2011.
- Petit, R. J., Raynaud, D., Basile, I., Chappellaz, J., Ritz, C., Delmotte, M., Legrand, M., Lorius, C., and Pe, L. : Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica, *Nature*, 399, 429–413, doi :10.1038/20859, URL <http://www.daycreek.com/dc/images/1999.pdf>, 1999.
- Plazzotta, M., Séférian, R., Douville, H., Kravitz, B., and Tjiputra, J. : Land Surface Cooling Induced by Sulfate Geoengineering Constrained by Major Volcanic Eruptions, *Geophysical Research Letters*, 45, 5663–5671, doi :10.1029/2018GL077583, URL <http://doi.wiley.com/10.1029/2018GL077583>, 2018.
- Plazzotta, M., Séférian, R., and Douville, H. : Impact of Solar Radiation Modification on allowable CO₂ emissions : what can we learn from multi-model simulations?, *Earth's Future*, p. 2019EF001165, doi :10.1029/2019EF001165, URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019EF001165>, 2019.
- Raupach, M. R., Davis, S. J., Peters, G. P., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Ciais, P., Friedlingstein, P., Jotzo, F., Van Vuuren, D. P., and Le Quéré, C. : Sharing a quota on cumulative carbon emissions, *Nature Climate Change*, 4, 873–879, doi :10.1038/nclimate2384, URL <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nclimate2384>, 2014.
- Reichstein, M., Camps-Valls, G., Stevens, B., Jung, M., Denzler, J., Carvalhais, N., and Prabhat, &. : Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science, *Nature*, doi :10.1038/s41586-019-0912-1, URL www.nature.com/nature, 2019.
- Resplandy, L., Séférian, R., and Bopp, L. : Natural variability of CO₂ and O₂ fluxes : What can we learn from centuries-long climate models simulations?, *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 120, doi :10.1002/2014JC010463, 2015.
- Rocher, M., Séférian, R., Carrer, D., Meunier, S., and Delire, C. : A Global Scheme for predicting crop emergence, *Biogeosciences Discussions*, pp. 1–41, submitted.
- Rödenbeck, C., Bakker, D. C. E., Metzl, N., Olsen, A., Sabine, C., Cassar, N., Reum, F., Keeling, R. F., and Heimann, M. : Interannual sea–air CO₂ flux variability from an observation-driven ocean mixed-layer scheme, *Biogeosciences*, 11, 4599–4613, doi :10.5194/bg-11-4599-2014, URL <http://www.biogeosciences.net/11/4599/2014/>, 2014.
- Rödenbeck, C., Bakker, D. C., Gruber, N., Iida, Y., Jacobson, A. R., Jones, S., Landschützer, P., Metzl, N., Nakaoka, S., Olsen, A., Park, G. H., Peylin, P., Rodgers, K. B., Sasse, T. P., Schuster, U., Shutler,

- J. D., Valsala, V., Wanninkhof, R., and Zeng, J. : Data-based estimates of the ocean carbon sink variability - First results of the Surface Ocean pCO₂ Mapping intercomparison (SOCOM), *Biogeosciences*, 12, 7251–7278, doi :10.5194/bg-12-7251-2015, URL <http://www.biogeosciences-discuss.net/12/14049/2015/bgd-12-14049-2015.pdf>, 2015.
- Rogelj, J., Meinshausen, M., Schaeffer, M., Knutti, R., and Riahi, K. : Impact of short-lived non-CO₂ mitigation on carbon budgets for stabilizing global warming, *Environmental Research Letters*, doi : 10.1088/1748-9326/10/7/075001, 2015.
- Rogelj, J., Luderer, G., Pietzcker, R. C., Kriegler, E., Schaeffer, M., Krey, V., and Riahi, K. : Corrigendum : Energy system transformations for limiting end-of-century warming to below 1.5 °C , *Nature Climate Change*, 6, 538–538, doi :10.1038/nclimate2993, URL <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nclimate2993>, 2016a.
- Rogelj, J., Schaeffer, M., Friedlingstein, P., Gillett, N. P., van Vuuren, D. P., Riahi, K., Allen, M., and Knutti, R. : Differences between carbon budget estimates unravelled, *Nature Climate Change*, 6, 245–252, doi :10.1038/nclimate2868, URL <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nclimate2868>, 2016b.
- Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K. V., Luderer, G., Emmerling, J., Gernaat, D., Fujimori, S., Strefler, J., Hasegawa, T., Marangoni, G., Krey, V., Kriegler, E., Riahi, K., van Vuuren, D. P., Doelman, J., Drouet, L., Edmonds, J., Fricko, O., Harmsen, M., Havlík, P., Humpenöder, F., Stehfest, E., and Tavoni, M. : Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °C , *Nature Climate Change*, 8, 325–332, doi :10.1038/s41558-018-0091-3, URL <http://www.nature.com/articles/s41558-018-0091-3>, 2018a.
- Rogelj, J., Shindell, D., Jiang, K., Fifita, S., Forster, P., Ginzburg, V., Handa, C., Kheshgi, H., Kobayashi, S., Kriegler, E., Mundaca, L., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., and Tignor, M. : Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development, Global warming of 1.5°C . An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, 2018b.
- Rogelj, J., Forster, P. M., Kriegler, E., Smith, C. J., and Séférian, R. : Estimating and tracking the remaining carbon budget for stringent climate targets, doi :10.1038/s41586-019-1368-z, 2019.
- Salas Mélia, D. : A global coupled sea ice–ocean model, *Ocean Modelling*, 4, 137–172, doi : 10.1016/S1463-5003(01)00015-4, URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1463500301000154>, 2002.
- Schädel, C., Schuur, E. A., Bracho, R., Elberling, B., Knoblauch, C., Lee, H., Luo, Y., Shaver, G. R., and Turetsky, M. R. : Circumpolar assessment of permafrost C quality and its vulnerability over time using long-term incubation data, *Global Change Biology*, 20, 641–652, doi :10.1111/gcb.12417, 2014.
- Schwalm, C. R., Huntzinger, D. N., Fisher, J. B., Michalak, A. M., Bowman, K., Ciais, P., Cook, R., El-Masri, B., Hayes, D., Huang, M., Ito, A., Jain, A., King, A. W., Lei, H., Liu, J., Lu, C., Mao, J., Peng, S., Poulter, B., Ricciuto, D., Schaefer, K., Shi, X., Tao, B., Tian, H., Wang, W., Wei, Y., Yang, J., and Zeng, N. : Toward "optimal" integration of terrestrial biosphere models, *Geophysical Research Letters*, 42, 4418–4428, doi :10.1002/2015GL064002, URL <http://dx.doi.org/10.1002/2015GL064002>, 2015.
- Schwinger, J., Tjiputra, J., Heinze, C., Bopp, L., Christian, J., Gehlen, M., Ilyina, T., Jones, C., Salas-Mélia, D., Segschneider, J., Séférian, R., and Totterdell, I. : Nonlinearity of ocean carbon cycle feedbacks in CMIP5 earth system models, *Journal of Climate*, 27, doi :10.1175/JCLI-D-13-00452.1, 2014.
- Schwinger, J., Tjiputra, J., Goris, N., Six, K., Kirkevåg, A., Seland, Ø., Heinze, C., and Ilyina, T. : Amplification of global warming through pH-dependence of DMS-production simulated with a fully coupled Earth system model, *Biogeosciences Discussions*, 2017, 1–26, doi :10.5194/bg-2017-33, URL <https://www.biogeosciences-discuss.net/bg-2017-33/>, 2017.

- Séférian, R., Bopp, L., Swingedouw, D., and Servonnat, J. : Dynamical and biogeochemical control on the decadal variability of ocean carbon fluxes, *Earth System Dynamics*, 4, 109–127, doi :10.5194/esd-4-109-2013, URL <http://www.earth-syst-dynam.net/4/109/2013/>, 2013.
- Séférian, R., Bopp, L., Gehlen, M., Swingedouw, D., Mignot, J., Guilyardi, E., and Servonnat, J. : Multiyear predictability of tropical marine productivity, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 11 646–11 651, doi :10.1073/pnas.1315855111, URL <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1315855111>, 2014a.
- Séférian, R., Ribes, A., and Bopp, L. : Detecting the anthropogenic influences on recent changes in ocean carbon uptake, *Geophysical Research Letters*, 41, 5968–5977, doi :10.1002/2014GL061223, URL <http://dx.doi.org/10.1002/2014GL061223>, 2014b.
- Séférian, R., Delire, C., Decharme, B., Voldoire, A., Salas y Melia, D., Chevallier, M., Saint-Martin, D., Aumont, O., Calvet, J.-C., Carrer, D., Douville, H., Franchistéguy, L., Joetzjer, E., and Sénési, S. : Development and evaluation of CNRM Earth system model – CNRM-ESM1, *Geoscientific Model Development*, 9, 1423–1453, doi :10.5194/gmd-9-1423-2016, URL <http://www.geosci-model-dev.net/9/1423/2016/>, 2016a.
- Séférian, R., Gehlen, M., Bopp, L., Resplandy, L., Orr, J. C., Marti, O., Dunne, J. P., Christian, J. R., Doney, S. C., Ilyina, T., Lindsay, K., Halloran, P. R., Heinze, C., Segschneider, J., Tjiputra, J., Aumont, O., and Romanou, A. : Inconsistent strategies to spin up models in CMIP5 : implications for ocean biogeochemical model performance assessment, *Geoscientific Model Development*, 9, 1827–1851, doi : 10.5194/gmd-9-1827-2016, URL <http://www.geosci-model-dev.net/9/1827/2016/>, 2016b.
- Séférian, R., Baek, S., Boucher, O., Dufresne, J.-L., Decharme, B., Saint-Martin, D., and Roehrig, R. : An interactive ocean surface albedo scheme (OSAv1.0) : Formulation and evaluation in ARPEGE-Climat (V6.1) and LMDZ (V5A), *Geoscientific Model Development*, 11, doi :10.5194/gmd-11-321-2018, 2018a.
- Séférian, R., Berthet, S., and Chevallier, M. : Assessing the Decadal Predictability of Land and Ocean Carbon Uptake, *Geophysical Research Letters*, 45, doi :10.1002/2017GL076092, 2018b.
- Séférian, R., Rocher, M., Guivarch, C., and Colin, J. : Constraints on biomass energy deployment in mitigation pathways : The case of water scarcity, *Environmental Research Letters*, 13, doi :10.1088/1748-9326/aabcd7, 2018c.
- Seferian, R., Rocher, M., Guivarch, C., and Colin, J. : Constraints on biomass energy deployment in mitigation pathways : the case of water scarcity OPEN ACCESS Constraints on biomass energy deployment in mitigation pathways : the case of water scarcity, *Environmental Research Letters*, 13, URL <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabcd7>, 2018.
- Séférian, R., Nabat, P., Michou, M., Saint-Martin, D., Voldoire, A., Colin, J., Decharme, B., Delire, C., Berthet, S., Chevallier, M., Sénési, S., Franchistéguy, L., Vial, J., Mallet, M., Joetzjer, E., Geoffroy, O., Guérémy, J.-F., Moine, M.-P., Msadek, R., Ribes, A., Rocher, M., Roehrig, R., Salas-y Mélia, D., Sanchez, E., Terray, L., Valcke, S., Waldman, R., Aumont, O., Bopp, L., Deshayes, J., Éthé, C., and Madec, G. : Evaluation of CNRM Earth-System model , CNRM-ESM2-1 : role of Earth system processes in present-day and future climate, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, pp. 1–91, submitted.
- Seneviratne, S. I., Donat, M. G., Pitman, A. J., Knutti, R., and Wilby, R. L. : Allowable CO2 emissions based on regional and impact-related climate targets, *Nature*, 529, 477–483, doi :10.1038/nature16542, URL <http://www.nature.com/articles/nature16542>, 2016.
- Smith, P., Davis, S. J., Creutzig, F., Fuss, S., Minx, J., Gabrielle, B., Kato, E., Jackson, R. B., Cowie, A., Kriegler, E., van Vuuren, D. P., Rogelj, J., Ciais, P., Milne, J., Canadell, J. G., McCollum, D., Peters, G., Andrew, R., Krey, V., Shrestha, G., Friedlingstein, P., Gasser, T., Grubler, A., Heidug, W. K., Jonas, M., Jones, C. D., Kraxner, F., Littleton, E., Lowe, J., Moreira, J. R., Nakicenovic, N., Obersteiner, M., Patwardhan, A., Rogner, M., Rubin, E., Sharifi, A., Torvanger, A., Yamagata, Y., Edmonds, J., and Yongsung, C. : Biophysical and economic limits to negative CO2 emissions, *Nature*

- Climate Change, 6, 42–50, doi :10.1038/nclimate2870, URL <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nclimate2870>, 2015.
- Sohnngen, B. and Sedjo, R. : Carbon Sequestration in Global Forests Under Different Carbon Price Regimes, *The Energy Journal*, 27, 109, URL <http://www.iaee.org/en/publications/ejarticle.aspx?id=2188{%}5Cnhttp://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true{%}&db=buh{%}&AN=23714770{%}&site=ehost-live>, 2006.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., and Meehl, G. A. : An overview of CMIP5 and the experiment design, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 485–498, doi :10.1175/BAMS-D-11-00094.1, URL <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>, 2012.
- Thonicke, K., Venevsky, S., Sitch, S., and Cramer, W. : The role of fire disturbance for global vegetation dynamics : Coupling fire into a dynamic global vegetation model, *Global Ecology and Biogeography*, 10, 661–677, doi :10.1046/j.1466-822X.2001.00175.x, URL <http://dx.doi.org/10.1046/j.1466-822X.2001.00175.x>, 2001.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., and Polasky, S. : Agricultural sustainability and intensive production practices, *Nature*, 418, 671–677, doi :10.1038/nature01014, URL <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nature01014>, 2002.
- Tilmes, S., Sanderson, B. M., and O’Neill, B. C. : Climate impacts of geoengineering in a delayed mitigation scenario, *Geophysical Research Letters*, 43, 8222–8229, doi :10.1002/2016GL070122, URL <http://onlinelibrary.wiley.com/biblioplanets.gate.inist.fr/doi/10.1002/2016GL070122/full>, 2016.
- Tjiputra, J. F., Grini, A., and Lee, H. : Impact of idealized future stratospheric aerosol injection on the large-scale ocean and land carbon cycles, *Journal of Geophysical Research G : Biogeosciences*, 121, 2–27, doi :10.1002/2015JG003045, URL <http://dx.doi.org/10.1002/2015JG003045>, 2016.
- Tokarska, K. B. and Gillett, N. P. : Cumulative carbon emissions budgets consistent with 1.5 °C global warming, *Nature Climate Change*, 8, 296–299, doi :10.1038/s41558-018-0118-9, URL <http://www.nature.com/articles/s41558-018-0118-9>, 2018.
- Tokarska, K. B., Gillett, N. P., Arora, V. K., Lee, W. G., and Zickfeld, K. : The influence of non-CO₂ forcings on cumulative carbon emissions budgets, *Environmental Research Letters*, 13, 034 039, doi :10.1088/1748-9326/aaafdd, URL <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaafddhttp://stacks.iop.org/1748-9326/13/i=3/a=034039?key=crossref.2b6b0a78eeb66430ec3cf7125e01bc02>, 2018a.
- Tokarska, K. B., Gillett, N. P., Arora, V. K., Lee, W. G., and Zickfeld, K. : The influence of non-CO₂ forcings on cumulative carbon emissions budgets, *Environmental Research Letters*, 13, 034 039, doi :10.1088/1748-9326/aaafdd, URL <http://stacks.iop.org/1748-9326/13/i=3/a=034039?key=crossref.2b6b0a78eeb66430ec3cf7125e01bc02>, 2018b.
- Tramontana, G., Jung, M., Schwalm, C. R., Ichii, K., Camps-Valls, G., Ráduly, B., Reichstein, M., Arain, M. A., Cescatti, A., Kiely, G., Merbold, L., Serrano-Ortiz, P., Sickert, S., Wolf, S., and Papale, D. : Predicting carbon dioxide and energy fluxes across global FLUXNET sites with regression algorithms, *Biogeosciences*, 13, 4291–4313, doi :10.5194/bg-13-4291-2016, URL <http://www.biogeosciences.net/13/4291/2016/bg-13-4291-2016-supplement.pdf>, 2016.
- Voldoire, A., Eickhout, B., Schaeffer, M., Royer, J.-F., and Chauvin, F. : Climate simulation of the twenty-first century with interactive land-use changes, *Climate Dynamics*, 29, 177–193, doi :10.1007/s00382-007-0228-y, URL <http://link.springer.com/10.1007/s00382-007-0228-y>, 2007.
- Voldoire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Mélia, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., Valcke, S., Beau, I., Alias, A., Chevallier, M., Déqué, M., Deshayes, J., Douville, H., Fernandez, E., Madec, G., Maisonnave, E., Moine, M. P., Planton, S., Saint-Martin, D., Szopa, S., Tyteca, S., Alkama, R., Belamari, S., Braun, A., Coquart, L., and Chauvin, F. : The CNRM-CM5.1 global climate model : Description and basic evaluation, *Climate Dynamics*, 40, 2091–2121, doi :10.1007/s00382-011-1259-y, URL <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s00382-011-1259-y>, 2013.

- Voldoire, A., Saint-Martin, D., S en esi, S., Decharme, B., Alias, A., Chevallier, M., Colin, J., Gu er emy, J., Michou, M., Moine, M., Nabat, P., Roehrig, R., Salas y M elia, D., S ef erian, R., Valcke, S., Beau, I., Belamari, S., Berthet, S., Cassou, C., Cattiaux, J., Deshayes, J., Douville, H., Eth e, C., Franchisteguy, L., Geoffroy, O., L evy, C., Madec, G., Meurdesoif, Y., Msadek, R., Ribes, A., Sanchez-Gomez, E., Terray, L., and Waldman, R. : Evaluation of CMIP6 DECK experiments with CNRM-CM6-1, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, p. 2019MS001683, doi :10.1029/2019MS001683, URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019MS001683>, 2019.
- Weilicki, B. a. : Clouds and the Earth radiant Energy System (CERES) : An Earth observing system experiment., *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 77, 853–868, doi :10.1175/1520-0477(1996)077<0853:CATERE>2.0.CO;2, URL [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077{%}3C0853:CATERE{%}3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077{%}3C0853:CATERE{%}3E2.0.CO;2), 1996.
- Wenzel, S., Cox, P. M., Eyring, V., and Friedlingstein, P. : Emergent constraints on climate-carbon cycle feedbacks in the CMIP5 Earth system models, *Journal of Geophysical Research : Biogeosciences*, 119, 794–807, doi :10.1002/2013JG002591, URL <http://dx.doi.org/10.1002/2013JG002591>, 2014.
- Wenzel, S., Cox, P. M., Eyring, V., and Friedlingstein, P. : Projected land photosynthesis constrained by changes in the seasonal cycle of atmospheric CO₂, *Nature*, 538, 499–501, doi :10.1038/nature19772, URL <http://www.nature.com/doi/10.1038/nature19772>, 2016.
- Werf, G. V. D., Randerson, J., Giglio, L., Collatz, J., and Kasibhatla, P. : The improved Global Fire Emissions Database (GFED) version 3 : contribution of savanna , forest , deforestation , and peat fires to the global fire emissions budget, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 13010, doi : 10.5194/acp-10-11707-2010-supplement, URL <http://www.atmos-chem-phys.net/10/11707/2010/acp-10-11707-2010-supplement.pdf>, 2010.
- Wise, M., Calvin, K., Thomson, A., Clarke, L., Bond-Lamberty, B., Sands, R., Smith, S. J., Janetos, A., and Edmonds, J. : Implications of Limiting CO₂ Concentrations for Land Use and Energy, *Science*, 324, 1183–1186, doi :10.1126/science.1168475, URL <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1168475>, 2009.
- Yamamoto, A., Palter, J. B., Dufour, C. O., Griffies, S. M., Bianchi, D., Claret, M., Dunne, J. P., Frenger, I., and Galbraith, E. D. : Roles of the ocean mesoscale in the horizontal supply of mass, heat, carbon and nutrients to the Northern Hemisphere subtropical gyres, *Journal of Geophysical Research : Oceans*, doi :10.1029/2018JC013969, URL <http://doi.wiley.com/10.1029/2018JC013969>, 2018.
- Zeng, Z., Piao, S., Li, L. Z. X., Zhou, L., Ciais, P., Wang, T., Li, Y., Lian, X., Wood, E. F., Friedlingstein, P., Mao, J., Estes, L. D., Myneni, R., Peng, S., Shi, X., Seneviratne, S. I., and Wang, Y. : Climate mitigation from vegetation biophysical feedbacks during the past three decades, *Nature Climate Change*, 7, 432–436, doi :10.1038/nclimate3299, URL <http://www.nature.com/doi/10.1038/nclimate3299>, 2017.
- Zickfeld, K. and MacDougall, A. H. : On the proportionality between global temperature change and cumulative CO₂ emissions during periods of net negative CO₂ emissions, *Environmental Research . . .*, 2016.
- Zickfeld, K., Arora, V. K., and Gillett, N. P. : Is the climate response to CO₂ emissions path dependent ?, *Geophysical Research Letters*, 39, n/a–n/a, doi :10.1029/2011GL050205, URL <http://doi.wiley.com/10.1029/2011GL050205>, 2012.
- Zickfeld, K., Eby, M., Weaver, A. J., Alexander, K., Crespin, E., Edwards, N. R., Eliseev, A. V., Feulner, G., Fichefet, T., Forest, C. E., Friedlingstein, P., Goosse, H., Holden, P. B., Joos, F., Kawamiya, M., Kicklighter, D., Kienert, H., Matsumoto, K., Mokhov, I. I., Monier, E., Olsen, S. M., Pedersen, J. O., Perrette, M., Philippon-Berthier, G., Ridgwell, A., Schlosser, A., Von Deimling, T. S., Shaffer, G., Sokolov, A., Spahni, R., Steinacher, M., Tachiiri, K., Tokos, K. S., Yoshimori, M., Zeng, N., and Zhao, F. : Long-Term climate change commitment and reversibility : An EMIC intercomparison, *Journal of Climate*, 26, 5782–5809, doi :10.1175/JCLI-D-12-00584.1, URL <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI-D-12-00584.1>, 2013.

