



HAL
open science

Étude des liens entre paléogéographie, climat et biodiversité aux échelles de temps géologiques. Apports et questions de la modélisation des paléoclimats

Pierre Sepulchre

► To cite this version:

Pierre Sepulchre. Étude des liens entre paléogéographie, climat et biodiversité aux échelles de temps géologiques. Apports et questions de la modélisation des paléoclimats. Milieux et Changements globaux. Université Paris Saclay (COMUE), 2020. tel-03500889

HAL Id: tel-03500889

<https://hal.science/tel-03500889>

Submitted on 9 Jan 2022

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.



Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines
Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement. LSCE.

Habilitation à diriger des recherches

présentée par

Pierre Sepulchre

Étude des liens entre paléogéographie, climat et
biodiversité aux échelles de temps géologiques

Apports et questions de la modélisation des paléoclimats
Soutenue le 6 novembre 2020

JURY

- M. Hervé Le Treut, Professeur, Paris Sorbonnes Université (Rapport.)
- Mme Hélène Morlon, Directrice de Recherche CNRS, ENS Paris (Rapport.)
- Mme Emmanuelle Pucéat, Maître de Conférences-HDR, Université de Bourgogne (Rapport.)
- Mme Valérie Daux, Professeur, UVSQ (Exam.)
- M. Jean-Louis Dufresne, Directeur de recherche CNRS, LMD Sorbonne Université (Exam.)
- M. Yves Goddéris, Directeur de recherche CNRS, GET Toulouse (Exam.)
- Mme. Myriam Khodri, Chargée de recherche-HDR IRD, LOCEAN Paris (Exam.)
- M. Didier Paillard, Directeur de recherche CEA, LSCE-IPSL (Exam. et tuteur)

Membre invité :

M. Laurent Husson, Chargé de recherche CNRS-HDR, Université de Grenoble ISTERRE.

Pour dévoiler tous les états antérieurs du globe, toutes les sciences s'occupant des problèmes de la terre doivent être mises à contribution et ce n'est que par la réunion de tous les indices fournis par elles que l'on peut obtenir la vérité; mais, cette idée ne paraît toujours pas être suffisamment répandue parmi les chercheurs. [Wegener, 1937]

Pierre Sepulchre, *Étude des liens entre paléogéographie, climat et biodiversité aux échelles de temps géologiques. Apports et questions de la modélisation des paléoclimats.*

COURRIEL :

pierre.sepulchre@lsce.ipsl.fr

TABLE DES MATIÈRES

1	CURRICULUM VITAE ÉTENDU	1
1.1	Parcours académique	1
1.2	Encadrement	1
1.2.1	Doctorats	1
1.2.2	Masters	1
1.2.3	Licence	2
1.3	Projets, Administration de la recherche, participation à la vie collective du laboratoire	2
1.3.1	Projets	2
1.3.2	Administration de la recherche	3
1.3.3	Participation à la vie de laboratoire	3
1.4	Publications	4
1.4.1	Rang A	4
1.4.2	Autres publications à comité de lecture	7
1.5	Conférences internationales	7
1.6	Séminaires et workshops (cinq dernières années)	10
1.7	Conférences grand public, presse	11
1.8	Enseignement	11
	Préambule	13
2	CONTEXTE ET SYNTHÈSE DES TRAVAUX SCIENTIFIQUES	15
2.1	Paléogéographie et climat : Contexte historique	15
2.1.1	De la dérive des continents à la tectonique des plaques	15
2.1.2	Passages océaniques, montagnes et dynamique du climat	17
2.2	Contribution à la compréhension des liens paléogéographie/climat	19
2.2.1	Travail de thèse de Noémie Hamon. Fermeture du passage est-téthysien sur la dynamique océanique et le climat européen au Miocène	19
2.2.2	Contraindre la répartition des océans et des continents en modélisant l'épsilon Neodyme	20
2.2.3	Travail de thèse de Svetlana Botsyun. Contraindre l'altitude passée des orogènes en simulant le $\delta^{18}O$: le cas du plateau tibétain	22
2.2.4	Eclatement de la Pangée, changement climatique et radiation des angiospermes. Travail de postdoctorat d'A.-C. Chaboureau	23
2.3	Lever le verrou de la modélisation des paléoclimats anciens à l'IPSL	24
2.3.1	Deux obstacles pour utiliser IPSL-CM dans le passé géologique	25
2.3.2	La mise en place du modèle IPSL-CM5A2	25
2.4	Vers une approche intégrative?	27
2.4.1	Thèse d'Anta-Clarisse Sarr. Une étude interdisciplinaire de la subsidence de la plateforme de la Sonde, de son impact sur le climat régional du continent maritime (Indonésie) et de ses conséquences biogéographiques	27
3	DESCRIPTION DES PROJETS	31
3.1	Améliorer et questionner la modélisation des paléoclimats	31
3.1.1	Travail de thèse de Julia Bres. Mieux comprendre les interactions climat-végétation aux longues échelles de temps	31

3.1.2	Propagation des biais des modèles dans les simulations paléoclimatiques	34
3.2	La question de l'évolution de l'outil	35
3.2.1	Le potentiel de la modélisation des paléoclimats pour étudier la macroévolution	35
3.2.2	Simuler un climat transitoire cénozoïque?	37
3.3	Conclusions et Perspectives	39
3.3.1	Quel(s) modèle(s) pour le passé, dans le futur?	39
	Références	41
	INDEX	51
4	SÉLECTION DE CINQ PUBLICATIONS	51

1

CURRICULUM VITAE ÉTENDU

1.1 PARCOURS ACADÉMIQUE

- **Depuis octobre 2010** : Chargé de recherche (classe normale) au CNRS. Recruté en Commission interdisciplinaire 52 "Dynamique des systèmes environnementaux, développement durable, santé et société."
- **2009** : Post-doctorat au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement. Projet ANR ACCRO-EARTH, centré sur l'évolution du cycle du carbone aux longues échelles de temps.
- **2007-2009** : Post-doctorat à l'Université de Californie de Santa Cruz (UCSC). Climate Modelling Laboratory (Prof. L. Sloan).
- **2007** : Doctorat de l'université de Poitiers. "Compréhension et Modélisation du climat d'Afrique centrale au Miocène supérieur. Application au bassin hydrographique du Tchad." (direction G. Ramstein, LSCE, M. Brunet, Université de Poitiers).
- **2003** : Diplôme d'ingénieur Agro ParisTech (ex. INA Paris-Grignon) et Master 2 (DEA Paléontologie, Paléobiologie et Phylogénie) de l'Université Montpellier 2. Projet de recherche : Paléoenvironnements tertiaires de Thaïlande. (ISEM, D. Jolly).
- **2000** : Diplôme universitaire de technologie, IUT Génie biologique option Génie de l'environnement, Tours. Stage de recherche : Étude de l'hétérogénéité spatiale de la flore de la forêt de Hesse. (INRA Nancy-Champenoux, resp. André Granier).

1.2 ENCADREMENT

1.2.1 Doctorats

- **2018-2021. Julia Bres** (Encadrement à 50%. Co-encadrants N. Viovy, N. Vuichard). Thèse CEA CFR. Modélisation et compréhension des liens entre paléogéographie, routage de l'eau continentale et végétation depuis le Crétacé. Soutenance prévue fin 2021.
- **2015-2018. Anta-Clarisse Sarr** (Encadrement à 50%. Co-encadrant L. Husson). Thèse ISTERRE Grenoble. Subsidence Quaternaire en Asie du Sud-Est : de la dynamique du manteau à la circulation atmosphérique. Soutenue en décembre 2018.
- **2014-2017. Svetlana Botsyun** (Encadrement à 50%. Co-encadrant Y. Donnadieu). Thèse ITN. Modélisation de l'impact de la surrection du Plateau Tibétain sur l'évolution du climat et du cycle du carbone. Soutenue le 1er mars 2017.
- **2010-2013. Noémie Hamon** (Encadrant à 50%. Co-encadrement G. Ramstein M. Brunet). Changements climatiques et évolution des hominoïdes au Miocène. Soutenue en 2013.

1.2.2 Masters

- **2020. Zoé Lehmann** (Encadrement à 80%. Co-encadrant Sébastien Dutreuil). Mémoire de M1 Histoire et Philosophie des sciences. Les enjeux de la création du LSCE et les conséquences pour la modélisation du climat et de l'environnement en France.
- **2018. Julia Bres**. Stage de M2 ICE (2018). Étude de l'impact du routage des grands fleuves tropicaux sur le climat du Cénozoïque.

- 2012. **Julien Le Bras** (Encadrement à 50%. Co-encadrement Yannick Donnadiou). Stage de M2 OACOS. Etude de l'impact de la fermeture du passage de Panama dans l'hémisphère sud.
- 2011. **Pauline Galmiche**. Stage de M1 IPGP. Étude préliminaire sur les conséquences climatiques globales de la fermeture du passage de Panama.
- 2011. **Nathan Jeger-Madiot**. Stage de M1 IPGP. Étude préliminaire sur les conséquences climatiques globales de la fermeture du passage de Drake.

1.2.3 Licence

- 2016. **Inès Mangolte**. Stage L3 ENS. Modélisation de l'influence du soulèvement du plateau tibétain sur la mise en place de la mousson et changements de végétation associés.

1.3 PROJETS, ADMINISTRATION DE LA RECHERCHE, PARTICIPATION À LA VIE COLLECTIVE DU LABORATOIRE

1.3.1 Projets

- 2019. FLOWERS : Rétroactions entre végétation et climat aux échelles de temps géologiques. Projet INSU TelluS. Porteur.
- 2018. REACTivE (Rift Est AfriCain : Topographie/climat/Evolution). Programme MITI CNRS TelluS RIFT. Porteur.
- 2018. TRANS-RIFT - Dynamiques biogéographiques et évolution humaine dans le rift éthiopien au Plio-Pléistocène : vers une approche transdisciplinaire. Programme MITI CNRS TelluS RIFT, porteur Jean-Renaud Boisserie. Participant.
- 2017. PALEORIVER : Impact des changements de drainage du Congo et de l'Amazone sur le climat du Cénozoïque. Projet INSU TelluS. Porteur.
- 2017. BIOTIBET : Biodiversité et surrection du plateau tibétain. Projet INSU INTERRVIE. Porteur.
- 2015-2019. HADoC : Human Ancestors Dispersal : the role of Climate, coordination Gilles Ramstein, financement ANR). Participant.
- 2015-2019. AFRODYN : Central African Rain fOrests : past DYNamics and future resilience (coordination Thomas Couvreur, financement ANR). co-responsable Tâche 1.
- 2014-2017. RAINBIO : African RAIN Forest Community Dynamics : Implications for Tropical BIOdiversity Conservation and Climate Change Mitigation (coordination Thomas Couvreur, IRD, financement FRB Cesab). Mon rôle : expertise des paléoclimats. Publication associée : [Dauby et al., 2016]
- 2013-2017. ITN iTECC : Investigating Tectonism-Erosion-Climate-Couplings (coordination J. Wijbrans, Univ Amsterdam, VUE). Co-Pi avec Y. Donnadiou de la tâche 3 "Climate modelling". Financement de la Ttèse de Svetlana Botsyun. Publications associées : [Botsyun* et al., 2019a,b, 2016]
- 2013-2016. Labex CEBA. Projet Phyloguianas "Biogeography and Pace of Diversification in the Guiana Shield" (coord. A. Franc J. Chave). Responsable de la tâche "Construction of paleoclimatic maps"
- 2010-2013. Projet ANR PhyloSpace (Coordination A. Franc, UMR BioGeCo). Integrating Cophylogenies, Area Shifts and Paleomaps for Inferring History of Associations under Climate Change. Tâche 2 "Modélisation des paléoclimats". Publication associée : [Chaboureau et al., 2014]
- 2010-2013. Trois échecs successifs en tant que porteur à l'ANR JCJC.

1.3.2 Administration de la recherche

- **2020** : Co-responsable du thème "La dynamique des systèmes : changements, risques et réponses" dans la mise en place (en cours) du GDR RIFT (interdisciplinaire INSU-INEE-INSHS).
- **2020** : Co-responsable de l'atelier "Comment intégrer au mieux la biosphère en tant que compartiment dans les modèles paléoenvironnementaux/climatiques/géochimiques?" du défi 4 "Les Grandes Crises : interactions entre crises environnementales et écosystèmes" de la prospective transverse de l'INSU.
- **Depuis 2015** : Responsable des projets "Modélisation du climat" au Très Grand Centre de Calcul (TGCC) et à l'IDRIS. Cette mission consiste à assurer la cohérence de la rédaction de la demande d'heures annuelle et du bilan scientifique de l'année écoulée. En 2016, nous avons obtenu 11 millions d'heures de calculs sur la machine CURIE. En 2017, nous avons obtenu 10 millions d'heures sur la machine CURIE et 10 millions sur JOLIOT-CURIE. En 2018, nous avons obtenu 24 millions d'heures sur JOLIOT-CURIE. En 2019, nous avons obtenu 10 millions d'heures sur la machine JOLIOT-CURIE et 21 millions d'heures sur la nouvelle machine JEAN ZAY de l'IDRIS.
- EGU 2020 Biogéosciences session : Interactions between Geology, Biology and Climate at the Earth's surface. co-convener (Convener principal : Steffen Seitz).
- EGU 2018 session : Climate Change in the Geological Record : What Can We Learn From Data and Models? Co-convener (Convener principal : Yannick Donnadieu).
- février 2018 : Organisation d'un séminaire de 2 jours sur le Rift est-africain (financement projet TelluS REACTIVE).
- EGU 2016 Union session : Interplays Between the Solid Earth and the Hydrosphere, Atmosphere, and Biosphere. Co-convener (Convener principal : Laurent Husson).
- 2009. Des climats et des hommes. Glaciologie, Climatologie, Archéologie, Histoire. Conférence organisée par Météo-France, la Cité des sciences et de l'industrie, l'Inrap. Membre du comité d'organisation.
- Rapporteur régulier pour *Climate of the Past*, *Journal of Climate*, *Nature Geosciences*, etc.. Editeur invité à PNAS.

1.3.3 Participation à la vie de laboratoire

- **2020** : Membre du Conseil scientifique et technique du LSCE.
- **Depuis 2016** : Co-responsable, avec Jean-Claude Dutay, de l'équipe CLIM -modélisation du climat- au LSCE. Dans ce cadre, je participe à l'animation (organisation de réunions, lien avec l'équipe informatique pour le support, organisation de séminaires, discussions d'articles) et au "management" (discussion des avancements des salariés CEA, organisation de discussions stratégiques pour faire remonter nos besoins en postes permanents) de l'équipe. J'ai aussi participé à la rédaction du document de bilan et de prospective de l'équipe en vue de l'évaluation par l'HCERES qui a eu lieu en décembre 2018.
- **2012-2019** : Élu représentant du personnel au conseil de laboratoire du LSCE.

1.4 PUBLICATIONS

1.4.1 Rang A

Les noms suivis d'un * indiquent les thèses que j'ai encadrées.

- Boucher, O., J. Servonnat, A. L. Albright, O. Aumont, Y. Balkanski, V. Bastrikov, S. Bekki, R. Bonnet, S. Bony, L. Bopp, P. Braconnot, P. Brockmann, P. Cadule, A. Caubel, F. Cheruy, F. Codron, A. Cozic, D. Cugnet, F. D'Andrea, P. Davini, C. de Lavergne, S. Denvil, J. Deshayes, M. Devilliers, A. Ducharne, J. L. Dufresne, E. Dupont, C. Éthé, L. Fairhead, L. Falletti, S. Flavoni, M. A. Foujols, S. Gardoll, G. Gastineau, J. Ghattas, J. Y. Grandpeix, B. Guenet, E. G. Lionel, E. Guilyardi, M. Guimberteau, D. Hauglustaine, F. Hourdin, A. Idelkadi, S. Joussaume, M. Kageyama, M. Khodri, G. Krinner, N. Lebas, G. Levassasseur, C. Lévy, L. Li, F. Lott, T. Lurton, S. Luysaert, G. Madec, J. B. Madeleine, F. Maignan, M. Marchand, O. Marti, L. Mellul, Y. Meurdesoif, J. Mignot, I. Musat, C. Ottlé, P. Peylin, Y. Planton, J. Polcher, C. Rio, N. Rochetin, C. Rousset, **P. Sepulchre**, A. Sima, D. Swingedouw, R. Thiéblemont, A. K. Traore, M. Vancoppenolle, J. Vial, J. Vialard, N. Viovy et N. Vuichard [2020], "Presentation and Evaluation of the IPSL-CM6A-LR Climate Model", *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, 7 [juil. 2020], p. 1-52, DOI : [10.1029/2019MS002010](https://doi.org/10.1029/2019MS002010).
- Couvreur, T. L. P., G. Dauby, A. Blach-Overgaard, V. Deblauwe, S. Dessein, V. Droissart, O. J. Hardy, D. J. Harris, S. B. Janssens, A. C. Ley, B. A. Mackinder, B. Sonké, M. S. M. Sosef, T. Stévant, J.-C. Svenning, J. J. Wieringa, A. Faye, A. D. Missoup, K. A. Tolley, V. Nicolas, S. Ntie, F. Fluteau, C. Robin, F. Guillocheau, D. Barboni et **P. Sepulchre** [2020], "Tectonics, Climate and the Diversification of the Tropical African Terrestrial Flora and Fauna", *Biological Reviews*, n/a, n/a, ISSN : 1469-185X, DOI : [10.1111/brv.12644](https://doi.org/10.1111/brv.12644).
- Husson, L., F. C. Boucher, A.-C. Sarr, P. Sepulchre et S. Y. Cahyarini [2020], "Evidence of Sundaland's Subsidence Requires Revisiting Its Biogeography", *Journal of Biogeography*, 47, 4, p. 843-853, ISSN : 1365-2699, DOI : [10.1111/jbi.13762](https://doi.org/10.1111/jbi.13762).
- Jaramillo, C., **P. Sepulchre**, D. Cardenas, A. Correa-Metrio, J. E. Moreno, R. Trejos, D. Vallejos, N. Hoyos, C. Martínez, D. Carvalho, J. Escobar, F. Oboh-Ikuenobe, M. B. Prámparo et D. Pinzón [2020], "Drastic Vegetation Change in the Guajira Peninsula (Colombia) during the Neogene", *Paleoceanography and Paleoclimatology*, n/a, n/a, e2020PA003933, e2020PA003933, DOI : [10.1029/2020PA003933](https://doi.org/10.1029/2020PA003933), eprint : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2020PA003933>, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020PA003933>.
- Lunt, D. J., F. Bragg, W.-L. Chan, D. K. Hutchinson, J.-B. Ladant, I. Niezgodzki, S. Steinig, Z. Zhang, J. Zhu, A. Abe-Ouchi, A. M. de Boer, H. K. Coxall, Y. Donnadieu, G. Knorr, P. M. Langebroek, G. Lohmann, C. J. Poulsen, **P. Sepulchre**, J. Tierney, P. J. Valdes, T. Dunkley Jones, C. J. Hollis, M. Huber et B. L. Otto-Bliesner [2020], "DeepMIP : Model Intercomparison of Early Eocene Climatic Optimum (EECO) Large-Scale Climate Features and Comparison with Proxy Data", *Climate of the Past Discussions* [jan. 2020], p. 1-27, ISSN : 1814-9324, DOI : <https://doi.org/10.5194/cp-2019-149>.
- Sepulchre, P.**, A. Caubel, J.-B. Ladant, L. Bopp, O. Boucher, P. Braconnot, P. Brockmann, A. Cozic, Y. Donnadieu, V. Estella-Perez, C. Ethé, F. Fluteau, M.-A. Foujols, G. Gastineau, J. Ghattas, D. Hauglustaine, F. Hourdin, M. Kageyama, M. Khodri, O. Marti, Y. Meurdesoif, J. Mignot, A.-C. Sarr*, J. Servonnat, D. Swingedouw, S. Szopa et D. Tardif [2020], "IPSL-CM5A2. An Earth System Model Designed for Multi-Millennial Climate Simulations", *Geoscientific Model Development Discussions* [jan. 2020], p. 1-57, ISSN : 1991-959X, DOI : <https://doi.org/10.5194/gmd-2019-332>.
- Tan, N., C. Contoux, G. Ramstein, Y. Sun, C. Dumas, **P. Sepulchre** et Z. Guo [2020], "Modeling a Modern-like pCO₂ Warm Period (Marine Isotope Stage KM5c) with Two Versions of an Institut Pierre Simon Laplace Atmosphere–Ocean Coupled General Circulation Model",

- Climate of the Past*, 16, 1 [jan. 2020], p. 1-16, ISSN : 1814-9324, DOI : <https://doi.org/10.5194/cp-16-1-2020>.
- Tardif, D., F. Fluteau, Y. Donnadieu, G. Le Hir, J.-B. Ladant, **P. Sepulchre**, A. Licht, F. Poblete et G. Dupont-Nivet [2020], "The Origin of Asian Monsoons : A Modelling Perspective", *Climate of the Past*, 16, 3 [mai 2020], p. 847-865, ISSN : 1814-9324, DOI : [10.5194/cp-16-847-2020](https://doi.org/10.5194/cp-16-847-2020).
- Bernal, R., C. D. Bacon, H. Balslev, C. Hoorn, S. J. Boursat, H. Tuomisto, S. Salamanca, M. T. van Manen, I. Romero, **P. Sepulchre** et A. Antonelli [2019], "Could Coastal Plants in Western Amazonia Be Relicts of Past Marine Incursions?", *Journal of Biogeography*, 46, 8, p. 1749-1759, ISSN : 1365-2699, DOI : [10.1111/jbi.13560](https://doi.org/10.1111/jbi.13560).
- Botsyun*, S., **P. Sepulchre**, Y. Donnadieu, C. Risi, A. Licht et J. K. C. Rugenstein [2019a], "Response to Comment on "Revised Paleohydrology Data Show Low Tibetan Plateau Elevation during the Eocene"", *Science*, 365, 6459 [sept. 2019], eaax8990, ISSN : 0036-8075, 1095-9203, DOI : [10.1126/science.aax8990](https://doi.org/10.1126/science.aax8990).
- [2019b], "Revised Paleohydrology Data Show Low Tibetan Plateau Elevation during the Eocene", *Science*, 363, 6430 [mar. 2019], eaaq1436, ISSN : 0036-8075, 1095-9203, DOI : [10.1126/science.aaq1436](https://doi.org/10.1126/science.aaq1436).
- Ramstein, G., Y. Godderis, Y. Donnadieu, **P. Sepulchre**, F. Fluteau, Z. Zhang, R. Zhang, B. Su, D. Jiang, M. Schuster et J. Besse [2019], "Some Illustrations of Large Tectonically Driven Climate Changes in Earth History", *Tectonics*, 38, 12, p. 4454-4464, ISSN : 1944-9194, DOI : [10.1029/2019TC005569](https://doi.org/10.1029/2019TC005569).
- Sarr*, A.-C., L. Husson, **P. Sepulchre**, A.-M. Pastier, K. Pedoja, M. Elliot, C. Arias-Ruiz, T. Solihuddin, S. Aribowo et Susilohadi [2019a], "Subsiding Sundaland : REPLY", *Geology*, 47, 7 [juil. 2019], e470-e470, ISSN : 0091-7613, DOI : [10.1130/G46493Y.1](https://doi.org/10.1130/G46493Y.1).
- [2019b], "Subsiding Sundaland", *Geology*, DOI : [10.1130/G45629.1](https://doi.org/10.1130/G45629.1).
- Sarr*, A.-C., **P. Sepulchre** et L. Husson [2019c], "Impact of the Sunda Shelf on the Climate of the Maritime Continent", *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 124, ja [fév. 2019], ISSN : 2169-897X, DOI : [10.1029/2018JD029971](https://doi.org/10.1029/2018JD029971).
- Szopa, S., R. Thiéblemont, S. Bekki, S. Botsyun* et **P. Sepulchre** [2019], "Role of the Stratospheric Chemistry–Climate Interactions in the Hot Climate Conditions of the Eocene", *Climate of the Past*, 15, 4 [juil. 2019], p. 1187-1203, ISSN : 1814-9324, DOI : <https://doi.org/10.5194/cp-15-1187-2019>.
- Maffre, P., J.-B. Ladant, Y. Donnadieu, **P. Sepulchre** et Y. Goddérès [2018], "The Influence of Orography on Modern Ocean Circulation", *Climate Dynamics*, 50, 3-4 [fév. 2018], p. 1277-1289, ISSN : 0930-7575, 1432-0894, DOI : [10.1007/s00382-017-3683-0](https://doi.org/10.1007/s00382-017-3683-0).
- Su, B., D. Jiang, R. Zhang, **P. Sepulchre** et G. Ramstein [2018], "Difference between the North Atlantic and Pacific Meridional Overturning Circulation in Response to the Uplift of the Tibetan Plateau", *Climate of the Past*, 14, 6 [juin 2018], p. 751-762, ISSN : 1814-9332, DOI : [10.5194/cp-14-751-2018](https://doi.org/10.5194/cp-14-751-2018).
- Sosef, M. S. M., G. Dauby, A. Blach-Overgaard, X. van der Burgt, L. Catarino, T. Damen, V. Deblauwe, S. Dessein, J. Dransfield, V. Droissart, M. C. Duarte, H. Engledow, G. Fadeur, R. Figueira, R. E. Gereau, O. J. Hardy, D. J. Harris, J. de Heij, S. Janssens, Y. Klomberg, A. C. Ley, B. A. Mackinder, P. Meerts, J. L. van de Poel, B. Sonké, T. Stévant, P. Stoffelen, J.-C. Svenning, **P. Sepulchre**, R. Zaiss, J. J. Wieringa et T. L. P. Couvreur [2017], "Exploring the Floristic Diversity of Tropical Africa", *BMC Biology*, 15, 1 [mar. 2017], p. 15, ISSN : 1741-7007, DOI : [10.1186/s12915-017-0356-8](https://doi.org/10.1186/s12915-017-0356-8).
- Tan, N., G. Ramstein, C. Dumas, C. Contoux, J.-B. Ladant, **P. Sepulchre**, Z. Zhang et S. De Schepper [2017], "Exploring the MIS M2 Glaciation Occurring during a Warm and High Atmospheric CO₂ Pliocene Background Climate", *Earth and Planetary Science Letters* [mai 2017], ISSN : 0012821X, DOI : [10.1016/j.epsl.2017.04.050](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.04.050).
- Botsyun*, S., **P. Sepulchre**, C. Risi et Y. Donnadieu [2016], "Impacts of Tibetan Plateau Uplift on Atmospheric Dynamics and Associated Precipitation d18O", *Climate of the Past*, 12, 6 [juin 2016], p. 1401-1420, ISSN : 1814-9332, DOI : [10.5194/cp-12-1401-2016](https://doi.org/10.5194/cp-12-1401-2016).

- Dauby, G., R. Zaiss, A. Blach-Overgaard, L. Catarino, T. Damen, V. Deblauwe, S. Desein, J. Dransfield, V. Droissart, M. C. Duarte, H. Engledow, G. Fadeur, R. Figueira, R. E. Gereau, O. J. Hardy, D. J. Harris, J. de Heij, S. Janssens, Y. Klomberg, A. C. Ley, B. A. Mackinder, P. Meerts, J. L. van de Poel, B. Sonké, M. S. M. Sosef, T. Stévar, P. Stoffelen, J.-C. Svenning, **P. Sepulchre**, X. van der Burgt, J. J. Wieringa et T. L. P. Couvreur [2016], "RAINBIO : A Mega-Database of Tropical African Vascular Plants Distributions", *PhytoKeys*, 74 [nov. 2016], p. 1-18, ISSN : 1314-2011, DOI : [10.3897/phytokeys.74.9723](https://doi.org/10.3897/phytokeys.74.9723).
- Chaboureau, A.-C., **P. Sepulchre**, Y. Donnadiou et A. Franc [2014], "Tectonic-Driven Climate Change and the Diversification of Angiosperms", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 39 [sept. 2014], p. 14066-14070, ISSN : 0027-8424, 1091-6490, DOI : [10.1073/pnas.1324002111](https://doi.org/10.1073/pnas.1324002111).
- Sepulchre, P.**, T. Arsouze, Y. Donnadiou, J.-C. Dutay, C. Jaramillo, J. Le Bras, E. Martin, C. Montes et A. J. Waite [2014], "Consequences of Shoaling of the Central American Seaway Determined from Modeling Nd Isotopes", *Paleoceanography*, 29, 3 [mar. 2014], 2013PA002501, ISSN : 1944-9186, DOI : [10.1002/2013PA002501](https://doi.org/10.1002/2013PA002501).
- Contoux, C., A. Jost, G. Ramstein, **P. Sepulchre**, G. Krinner et M. Schuster [2013], "Megalake Chad Impact on Climate and Vegetation during the Late Pliocene and the Mid-Holocene", *Climate of the Past*, 9, 4 [juil. 2013], p. 1417-1430, ISSN : 1814-9332, DOI : [10.5194/cp-9-1417-2013](https://doi.org/10.5194/cp-9-1417-2013).
- Hamon*, N., **P. Sepulchre**, V. Lefebvre et G. Ramstein [2013], "The Role of Eastern Tethys Seaway Closure in the Middle Miocene Climatic Transition (ca. 14 Ma)", *Climate of the Past*, 9, 6 [nov. 2013], p. 2687-2702, ISSN : 1814-9332, DOI : [10.5194/cp-9-2687-2013](https://doi.org/10.5194/cp-9-2687-2013).
- Chaboureau, A.-C., Y. Donnadiou, **P. Sepulchre**, C. Robin, F. Guillocheau et S. Rohais [2012], "The Aptian Evaporites of the South Atlantic : A Climatic Paradox?", *Climate of the Past*, 8, 3 [juin 2012], p. 1047-1058, ISSN : 1814-9332, DOI : [10.5194/cp-8-1047-2012](https://doi.org/10.5194/cp-8-1047-2012).
- Hamon*, N., **P. Sepulchre**, Y. Donnadiou, A.-J. Henrot, L. François, J.-J. Jaeger et G. Ramstein [2012], "Growth of Subtropical Forests in Miocene Europe : The Roles of Carbon Dioxide and Antarctic Ice Volume", *Geology*, 40, 6 [juin 2012], p. 567-570, ISSN : 0091-7613, DOI : [10.1130/G32990.1](https://doi.org/10.1130/G32990.1).
- Krinner, G., A.-M. Lézine, P. Braconnot, **P. Sepulchre**, G. Ramstein, C. Grenier et I. Gouttevin [2012], "A Reassessment of Lake and Wetland Feedbacks on the North African Holocene Climate", *Geophysical Research Letters*, 39, 7 [avr. 2012], n/a-n/a, ISSN : 00948276, DOI : [10.1029/2012GL050992](https://doi.org/10.1029/2012GL050992).
- Lefebvre, V., Y. Donnadiou, **P. Sepulchre**, D. Swingedouw et Z.-S. Zhang [2012], "Deciphering the Role of Southern Gateways and Carbon Dioxide on the Onset of the Antarctic Circumpolar Current", *Paleoceanography*, 27, 4 [déc. 2012], n/a-n/a, ISSN : 08838305, DOI : [10.1029/2012PA002345](https://doi.org/10.1029/2012PA002345).
- Sepulchre, P.**, L. C. Sloan et F. Fluteau [2011], "Modelling the Response of Amazonian Climate to the Uplift of the Andean Mountain Range", in *Amazonia : Landscape and Species Evolution*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 211-222, ISBN : 978-1-4443-0640-8, DOI : [10.1002/9781444306408.ch13](https://doi.org/10.1002/9781444306408.ch13).
- Sepulchre, P.**, D. Jolly, S. Ducrocq, Y. Chaimanee, J.-J. Jaeger et A. Raillard [2010], "Mid-Tertiary Paleoenvironments in Thailand : Pollen Evidence", *Climate of the Past*, 6, 4 [juil. 2010], p. 461-473, ISSN : 1814-9332, DOI : [10.5194/cp-6-461-2010](https://doi.org/10.5194/cp-6-461-2010).
- Schuster, M., P. Düringer, J.-F. Ghienne, C. Roquin, **P. Sepulchre**, A. Moussa, A.-E. Lebatard, H. T. Mackaye, A. Likius, P. Vignaud et M. Brunet [2009], "Chad Basin : Paleoenvironments of the Sahara since the Late Miocene", *Comptes Rendus Geoscience*, 341, 8-9 [août 2009], p. 603-611, ISSN : 16310713, DOI : [10.1016/j.crte.2009.04.001](https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.04.001).
- Sepulchre, P.**, G. Ramstein et M. Schuster [2009a], "Modelling the Impact of Tectonics, Surface Conditions and Sea Surface Temperatures on Saharan and Sub-Saharan Climate Evolution", *Comptes Rendus Geoscience*, 341, 8-9 [août 2009], p. 612-620, ISSN : 16310713, DOI : [10.1016/j.crte.2009.08.006](https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.08.006).

- Sepulchre, P.**, L. C. Sloan, M. Snyder et J. Fiechter [2009b], "Impacts of Andean Uplift on the Humboldt Current System : A Climate Model Sensitivity Study : ANDES UPLIFT AND HUMBOLDT CURRENT SYSTEM", *Paleoceanography*, 24, 4 [déc. 2009], ISSN : 08838305, DOI : [10.1029/2008PA001668](https://doi.org/10.1029/2008PA001668).
- Banks, W. E., F. d'Errico, A. T. Peterson, M. Vanhaeren, M. Kageyama, P. **Sepulchre**, G. Ramstein, A. Jost et D. Lunt [2008], "Human Ecological Niches and Ranges during the LGM in Europe Derived from an Application of Eco-Cultural Niche Modeling", *Journal of Archaeological Science*, 35, 2 [fév. 2008], p. 481-491, ISSN : 03054403, DOI : [10.1016/j.jas.2007.05.011](https://doi.org/10.1016/j.jas.2007.05.011).
- Sepulchre, P., M. Schuster, G. Ramstein, G. Krinnezr, J. Girard, P. Vignaud et M. Brunet [2008], "Evolution of Lake Chad Basin Hydrology during the Mid-Holocene : A Preliminary Approach from Lake to Climate Modelling", *Global and Planetary Change*, 61, 1-2 [mar. 2008], p. 41-48, ISSN : 09218181, DOI : [10.1016/j.gloplacha.2007.08.010](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.08.010).
- Sepulchre, P.**, G. Ramstein, M. Kageyama, M. Vanhaeren, G. Krinner, M.-F. Sánchez-Goñi et F. d'Errico [2007], "H4 Abrupt Event and Late Neanderthal Presence in Iberia", *Earth and Planetary Science Letters*, 258, 1-2 [juin 2007], p. 283-292, ISSN : 0012821X, DOI : [10.1016/j.epsl.2007.03.041](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.03.041).
- Sepulchre, P.**, G. Ramstein, F. Fluteau, M. Schuster, J.-J. Tiercelin et M. Brunet [2006], "Tectonic Uplift and Eastern Africa Aridification", *Science*, 313, 5792 [sept. 2006], p. 1419-1423, ISSN : 0036-8075, 1095-9203, DOI : [10.1126/science.1129158](https://doi.org/10.1126/science.1129158).
- Kageyama, M., N. C. Nebout, **P. Sepulchre**, O. Peyron, G. Krinner, G. Ramstein et J.-P. Cazet [2005], "The Last Glacial Maximum and Heinrich Event 1 in Terms of Climate and Vegetation around the Alboran Sea : A Preliminary Model-Data Comparison", *Comptes Rendus Geoscience*, 337, 10 [août 2005], p. 983-992, ISSN : 1631-0713, DOI : [10.1016/j.crte.2005.04.012](https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.04.012).

1.4.2 Autres publications à comité de lecture

- Sepulchre, P. [2018], "La Conjugaison du climat", in *Métamorphoses*, Éditions de la Villette, Les Cahiers de l'École de Blois, 16, p. 116, ISBN : 978-2-37556-006-8.
- [2016], "Links between Solid Earth, Climate Changes, and Biodiversity through Time : Insights from the Cenozoic", in *Climatic and Environmental Challenges : Learning from the Horn of Africa*, sous la dir. de D. Ambrosetti, J.-R. Boisserie, D. Ayenachew et T. Guindeuil, Centre français des études éthiopiennes, ISBN : 978-2-8218-7300-1, DOI : [10.4000/books.cfee.359](https://doi.org/10.4000/books.cfee.359).
- Sepulchre, P. et V. Masson-Delmotte [2016], "L'histoire de l'englacement du Groenland", in *Le Groenland Climat, Écologie, Société*, CNRS Editions, Paris, p. 21-25.
- Masson-Delmotte, V., P. Braconnot, M. Kageyama et P. Sepulchre [2015], "Qu'apprend-on des grands changements climatiques passés?", *La Météorologie*, 8, 88, p. 25, ISSN : 0026-1181, DOI : [10.4267/2042/56359](https://doi.org/10.4267/2042/56359).
- Sepulchre, P. [2012], "Les données majeures du climat de la fin de l'ère tertiaire", in *Des climats et des hommes*, Recherches, La Découverte, p. 43-56, ISBN : 978-2-7071-6771-2.
- [2011], "Paleoclimatology And Paleoecology", *Encyclopedia Life Support Systems (UNESCO-EOLSS)*, Evolution of Phylogenetic Tree of Life, p. 9.

1.5 CONFÉRENCES INTERNATIONALES

2019

- **Sepulchre P.**, C. Contoux, G. Ramstein, F. Fluteau. Simulating Miocene climate with IPSL-CM5A2 : Constraints and challenges. MioMIP Meeting, Stockholm, Suède. juin 2019. **2018**
- Sarr A.-C., **P. Sepulchre**, and L. Husson. Impact of Sunda shelf exposure on Southeast Asian

atmospheric circulation and on Indonesian Troughflow. EGU, Vienne, Autriche.

- Husson L., A.-C.Sarr, and **P. Sepulchre**. Unstable Sundaland triggered dry-shod migration of hominids to Java. EGU, Vienne, Autriche.

- Sarr A.-C., L. Husson, **P. Sepulchre**, A.-M. Pastier, K. Pedoja, C. Ariaz-Ruiz, and M. Elliot. Dynamic foundering of the Sunda shelf during the Quaternary revealed by coral reef geomorphology : impact on the external spheres of the Earth. EGU, Vienne, Autriche.

- Donnadieu Y., J.-B. Ladant, and **P. Sepulchre**. Deep-time simulations with the IPSL Earth System Model. EGU, Vienne, Autriche.

2017

- **Sepulchre P.**, A. Caubel, O. Marti, F. Hourdin, J.-L. Dufresne, and O. Boucher. IPSL-CM5A2. An Earth System Model designed to run long simulations for past and future climates. EGU, Vienne, Autriche.

- **Sepulchre P.**, A.-C. Chaboureaud, Y. Donnadieu, A. Franc, and J.-B. Ladant. Interactions between tectonics, climate and vegetation during the Cretaceous. A context for the diversification of Angiosperms. Highlight presentation. EGU, Vienne, Autriche.

- Contoux C., G. Ramstein, Will Banks, **P. Sepulchre**, M. Schuster, and Z. Zhang. African climate and vegetation at the roots of humankind during the Pliocene. Highlight presentation. EGU, Vienne, Autriche.

- Couvreur T., W. J. Baker, J.-M. Frigerio, **P. Sepulchre**, and A. Franc. Towards a global historical biogeography of Palms. EGU, Vienne, Autriche.

- Botsyun S., **P. Sepulchre**, Y. Donnadieu, C. Risi, J. K. Caves, and A. Licht. Modeling the response of precipitation oxygen stable isotopes to the Eocene climate changes over Asia. EGU, Vienne, Autriche.

- Su B., D. Jiang, R. Zhang, **P. Sepulchre**, and G. Ramstein. Impact of Tibetan Plateau on Meridional Overturning Circulation (MOC) since Eocene. EGU, Vienne, Autriche.

- Husson L., A.-C.Sarr, A.-M. Pastier, **P. Sepulchre**, K. Pedoja, M. Elliot, W. Hantoro, and C. Jaramillo. Some consequences of the geodynamics of sea level on the biosphere. The SE Asian example. EGU, Vienne, Autriche.

2016

- Botsyun S., **P. Sepulchre**, C. Risi, and Y. Donnadieu. Impact of Tibetan Plateau uplift on Asian climate and stable oxygen isotopes in precipitation. EGU, Vienne, Autriche.

2015

- Botsyun S., Y. Donnadieu, **P. Sepulchre**, C. Risi, and F. Fluteau. Cenozoic climate evolution in Asian region and its influence on isotopic composition of precipitation. EGU2015-7214. EGU, Vienne, Autriche.

- **Sepulchre P.** Impact of Andes uplift and Central American Seaway closure on Miocene climate. EGU2015-5523. EGU, Vienne, Autriche.

- **Sepulchre P.** Links between solid earth, climate changes, and biodiversity through time : Insights from the past. Conférence " Road to Paris, What Kind of Agreement Do We Need ? ". Addis-Abeba, Ethiopie. 2015. Invité.

2014

- Botsyun S., **P. Sepulchre**, and Y. Donnadieu. Impact of Himalayas and Tibetan plateau uplift on regional climate and isotopic lapse rate. EGU, Vienne, Autriche.

- **Sepulchre P.** Climate(s) of the Cenozoic. Links between Tectonics Climate, From the Global to local scale. XI CONGRESO LATINOAMERICANO DE BOTANICA. Bahia, Brésil. Invité.

- Ramstein G., C. Contoux, **P. Sepulchre**, M. Schuster Jost, A. (2014) – From Toumai to Lucy : climate and orographic forcing on Environment and Early Human. EGU, 27 avril-2 mai, Vienne, Autriche.

2013

- Contoux C., G. Ramstein, A. Jost **P. Sepulchre** (2013) – Timing of megalake Chad occurrences in the Pliocene : an insight into early hominid environment. PAGES Open Science Meeting "The Past : A Compass for Future Earth", 13-16 février, Goa, Inde.

- Contoux, C., G. Ramstein, A. Jost, **P. Sepulchre**, M. Schuster P. Braconnot (2013) – African monsoon variations and persistence of the Megalake Chad during the late Pliocene. EGU, 7-12 avril, Vienne, Autriche.
 - **Sepulchre P.**, Y. Donnadieu, T. Arsouze, J.-C. Dutay, C. Jaramillo, J. Le Bras, C. Montes. Modelling the consequences of Central American Seaway shoaling on Caribbean water masses and epsilon-Neodymium. ICP (2013).
 - Mattio L., **P. Sepulchre**, C. Contoux, M. Kageyama, R. Dixon J. J. Bolton. Using different paleo-scenarios and a molecular clock to explain the antitropical distribution of Sargassum subgenus *Bactrophycus*. IPC (2013).
 - Lefebvre V., Y. Donnadieu, P. Sepulchre, D. Swingedouw, Z. Zhang. Was the Antarctic Circumpolar Current initiated by the Cenozoic cooling? EGU General Assembly Conference Abstracts 15, 9381 (2013).
 - Mattio L., **P. Sepulchre**, C. Contoux, M. Kageyama, R. Dixon J. J. Bolton. Using different paleo-scenarios and a molecular clock to explain the antitropical distribution of Sargassum subgenus *Bactrophycus*. IPC (2013).
 - Franc A. et **P. Sepulchre**. Historical biogeography : Paleomaps and Paleographs. 2nd meeting of the Network for Neotropical Biogeography, Miami, États-Unis.
- 2012**
- Contoux, C., G. Ramstein, A. Jost **P. Sepulchre** (2012) – The Mega-Lake Chad during the mid-Pliocene : occurrence and feedback on climate. PMIP₃ 2nd General Meeting, 6-11 mai, Crewe Hall, Cheshire (Royaume-Uni).
 - Contoux, C., A. Jost, **P. Sepulchre** G. Ramstein (2012) – Modelling the mid-Pliocene Warm Period with the IPSL GCM : contribution to PlioMIP and feedback mechanisms from the presence of mega-lakes. EGU, 22-27 avril, Vienne, Autriche.
 - **Sepulchre P.**, Y. Donnadieu, T. Arsouze, J.-C. Dutay, C. Jaramillo, J. Le Bras, C. Montes. Shoaling of the central american seaway : simulating climate and epsilon-neodymium response. GSA (2012). Invité.
 - **Sepulchre P.** Modelling climatic response to Cenozoic tectonics. PCP PIRE All Hands Meeting Year 2 | Gainesville, États-Unis. 2012. Invité.
- 2011**
- Chaboureau A.-C., Y. Donnadieu, **P. Sepulchre**, Cécile Robin, François Guillocheau *et al.* Impact du climat et de la paléogéographie sur la mise en place des évaporites de l'Atlantique Sud au Crétacé inférieur. 13^e Congrès français de Sédimentologie, Dijon - Livre des résumés, 2011, Nov 2011, Dijon, France. pp.74.
- 2009**
- Gential L., B. Ringeval, **P. Sepulchre**, G. Krinner, G. Ramstein, P. Friedlingstein. Transient simulations of the Mid-Holocene with MGCM, the IPSL fast ocean-atmosphere-vegetation general circulation model. EGU, Vienne, Autriche.
- 2008**
- **Sepulchre P.**, L.C. Sloan, M. Snyder, F. Fluteau, T. Nakazato. Modelling the impact of the Andes uplift : Consequences for climate and biosphere evolution. AvH4 The Andes : Challenges for Geosciences. EGU. Santiago, Chile.
- 2007**
- **Sepulchre P.**, L.C. Sloan, F. Fluteau. Modelling Andes Uplift Impact on Atmospheric Circulation : Consequences for Neogene Faunal and Floral Evolution? AGU Fall Meeting, San Francisco, États-Unis.
 - **Sepulchre P.**, G. Ramstein, F. Fluteau, M. Schuster, J.-J. Tiercelin, M. Brunet. Modelling the impact of Eastern Africa elevation changes during the late Neogene : Climate and vegetation responses. EGU Meeting, Vienne, Autriche.
 - **Sepulchre P.**, G. Ramstein, M. Kageyama, M. Vanhaeren, G. Krinner, M.F. Sanchez-Goni, F. d'Errico. H₄ abrupt event and late Neanderthal Presence in Iberia. EGU Meeting, Vienne, Autriche.

- Ramstein G., **P. Sepulchre**, F. Fluteau, M. Schuster, J.-J. Tiercelin *et al.* Modeling the impact of Eastern African elevation changes during the late Neogene : climate and vegetation responses. EGU annual meeting, Apr 2007, Vienne, Austria. pp.1

- Schuster M., **P. Sepulchre**, J.-J. Tiercelin, J.-F. Ghienne, C. Roquin *et al.* Le Bassin du Tchad et le Rift Est-Africain : de la géologie de terrain à la modélisation climatique. Colloque de restitution du programme Eclipse II, Oct 2007, Paris, France.

2006

- **Sepulchre P.**, G. Ramstein, F. Fluteau, M. Schuster, J.-J. Tiercelin, M. Brunet. Modeling the impact of eastern Africa elevation changes during the late Neogene : Climate and vegetation responses. Lucy, 30 years later, Aix-en-Provence, France. **2005**

- **Sepulchre P.**, G. Ramstein, G. Krinner, M. Schuster, F. Fluteau, M. Kageyama, J.-J. Tiercelin, P. Vignaud, M. Brunet. Understanding Chad basin evolution since Miocene : Climate and vegetation simulations, roles of orbital parameters and east african rift. AGU Fall Meeting, San Francisco, États-Unis.

2004

- **Sepulchre P.**, G. Ramstein, G. Krinner, M. Kageyama, F. d'Errico, F.M. Sanchez-Goñi, E. Cortijo. Simulating the impact of the Heinrich 4 event over western europe : first results. EGU, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 6, 04485, Nice, France.

- **Sepulchre P.**, G. Ramstein, G. Krinner, M. Schuster, F. Fluteau, P. Vignaud, D. Jolly, M. Brunet. Palaeoclimatic changes in Chad since the Upper Miocene : A climate modelling approach. 32nd International Conference of Geology, Florence, Italie.

1.6 SÉMINAIRES ET WORKSHOPS (CINQ DERNIÈRES ANNÉES)

2019

- Isotopes and paleoaltimetry. An Eocene example. Réunion "isotopes" du LSCE. Novembre 2019.

- IPSL-CM5A2-VLR et performances. Réunion "LMDZ PEDALONS", LMD, Paris. Avril 2019.

2018

- gen2212 "Modélisation du climat". Présentation du projet au GENCI, Paris, Franc. Novembre 2018.

- Modelling paleoclimates of the Cenozoic : Techniques and difficulties. Séminaire lors du workshop Trans-Rift. Poitiers, Octobre 2018.

- Does the quality of the high- resolution topography prescribed in LMDz alter the simulated climate? A sensitivity study with LMDZOR. Journées LMDZ, LMD. Juin 2018.

- IPSL-CM5A2 designed for -old and- long runs. Séminaire en assemblée générale du thème "Modélisation du climat". LSCE. Février 2018.

2017

- Modelling paleoclimates of the Cenozoic : Techniques difficulties. Séminaire invité ISTERRE. Grenoble. Avril 2017.

2016

- From (paleo)climate to species (paleo)distribution modelling. Towards new methods? Séminaire en assemblée générale du thème "Modélisation du climat". LSCE.

Tectonique, Climat, Evolution. **P. Sepulchre**. Séminaire au M2 MATHSV de Polytechnique.

2015

- Impact de la paléo-topographie sur les reconstructions climatiques. Réunion GDR RELIEF. Beaume-les-Aix. Novembre 2015.

- How tectonics have influenced climate dynamics during the Cenozoic? Séminaire invité, IGG, Pékin, Chine. Octobre 2015.

- How tectonics have influenced climate dynamics during the Cenozoic. Insights from climate modelling. Séminaire invité, IAP, Pékin, Chine. Octobre 2015.

2014

- Some concerns about how to get (past) climate layers for biogeographic purposes. Focus on Africa. Meeting Rainbio. Aix-en-Provence. Décembre 2014.

1.7 CONFÉRENCES GRAND PUBLIC, PRESSE

- Radio Village Innovation, 2019. "Les mystères du Plateau tibétain." Animé par Jean-Louis Vinet :

<https://radiovillageinnovation.com/broadcast/74019-Le-myst%C3%A8re-du-plateau-tib%C3%A9tain>

- Histoire d'Homme(s) et de Climat(s). Conférence Climat : où en sommes-nous? Alternatiba. BoicyFleur. 2015.

- Les changements climatiques au cours de l'histoire de la Terre. Cénomaniens, le voyage géologique. Effervescence / Fête de la science. Musée vert du Mans, Octobre 2015.

- Les données majeures sur le climat de la fin de l'ère tertiaire. Des climats et des hommes. Colloque international organisé par Météo-France, la Cité des sciences et de l'industrie, l'Inrap. Auditorium de la Cité des sciences et de l'industrie, les 19, 20, 21 novembre 2009.

<https://www.inrap.fr/les-donnees-majeures-sur-le-climat-de-la-fin-de-l-ere-tertiaire-9038>

- "L'évolution du climat depuis 65 millions d'années. Ce que nous (ne) savons (pas)". Espace Mendès-France, Poitiers. Conférence d'une heure. 26 janvier 2010.

<http://emf.fr/4644/l%E2%80%99evolution-du-climat-depuis-65-millions-d%E2%80%99annees-ce-que-nous-ne-savons-pas/>

- BBC (septembre 2010) : <http://www.bbc.co.uk/news/science-environment-11415945>

- Scientific American (juin 2012) :

<http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=new-dating-panama-formations-cast-doubt-ice-age-origins>

- Comment l'Afrique de l'Est est devenue aride (2006)? https://www.lefigaro.fr/sciences/2006/09/08/01008-20060908ARTWWW90635-comment_lafrique_de_lest_est_devenue_aride.php

1.8 ENSEIGNEMENT

- 2010-2018. Univ. Paris Sud & Univ. Versailles Saint-Quentin. Master Environnements sédimentaires. Unité Paléoclimats Anté-Quaternaire. M1 M2 : 3 heures annuelles.

- 2017-2018. Université Paris-Sud Polytechnique. Master MathSv. 1h. Paléoclimats/Évolution.

- 2014-2018. Université de Poitiers. M1 Paléontologie. 6 heures annuelles. Climat/Modélisation.

- 2010-2015. École des Mines de Nantes, Collège des Transitions Sociétales. Formation CHEDD. 1 journée annuelle. Thématique : histoire des relations homme-climat.

PRÉAMBULE

DÉCLINER DANS LE TEMPS UNE RECHERCHE À L'INTERFACE DES GÉOSCIENCES ET DE LA BIOLOGIE ÉVOLUTIVE

Lors de la session 2009 du concours de recrutement des chargés de recherche du CNRS, je soumis à la section 18 un projet intitulé "*Quantification de l'impact de la tectonique sur l'évolution du climat au Cénozoïque*". En parallèle, je le déclinai de façon plus ambitieuse pour la commission interdisciplinaire 45 en y ajoutant un volet de biologie évolutive, sous le titre "*Quantifier les liens entre tectonique, climat, et évolution au cours des 35 derniers millions d'années*". Dans le résumé de ce dernier figuraient les éléments suivants : "*Au cours des 35 derniers millions d'années, les surrections de chaînes de montagne (Andes, Rift est-africain, plateau tibétain) et le déplacement des masses continentales (ouverture/fermeture des passages de Drake, isthme de Panama) ont conduit à des bouleversements climatiques majeurs. Ces changements climatiques ont modifié les pressions environnementales s'exerçant sur la faune et la flore. Cependant, ni les mécanismes physiques liant tectonique et climat, ni les liens entre changements climatiques et phénomènes macro-évolutifs (radiations, migrations) ne sont à ce jour bien compris. **Mon projet a pour ambition de formaliser et quantifier les liens tectonique-climat et climat-évolution pour des périodes-clefs des 35 derniers millions d'années.***" Le projet s'appuyait sur une transition progressive des questions de géosciences vers celles de macroévolution, en trois temps :

- isoler l'amplitude et la chronologie des changements paléogéographiques majeurs des 35 derniers millions d'années, s'agissant ici de changements topographiques (surrections de chaînes de montagnes et plateaux) et de modifications des passages océaniques (ouverture et fermeture);
- utiliser la simulation numérique du climat pour quantifier et comprendre la réponse climatique à ces modifications paléogéographiques, en prenant en compte les autres forçages (concentration en CO₂ atmosphérique - pCO₂ -, forçage orbital, etc.);
- utiliser les résultats des simulations comme contraintes pour expliquer les épisodes de diversification et les scénarios biogéographiques suggérés par les biologistes de l'évolution, en utilisant notamment les informations issues des phylogénies moléculaires et les modèles de distribution spatiale d'espèces (SDMs, anciennement appelés modèles de niche écologique).

Ce projet s'articulait autour de la modélisation des paléoclimats, considérée comme la discipline centrale permettant de faire le pont entre géologie et biologie évolutive; l'une permettant d'intégrer les contraintes nécessaires à la construction des conditions aux limites du modèle de climat, et l'autre d'explorer les liens de causalité entre forçages abiotiques et mise en place de la biodiversité au prisme de l'évolution climatique. En passant, pour ainsi dire, j'ambitionnai d'élucider les principaux processus liant d'une part la surrection des chaînes de montagne à la dynamique atmosphérique, et d'autre part les changements de configurations de passages maritimes à la dynamique océanique. J'estimai à cinq années le temps nécessaires à la résolution des questions de cet aspect "paléogéographie/climat", en ayant isolé les principaux changements tectoniques du Cénozoïque dans l'espace et dans le temps. Au terme de ces cinq ans, j'espérais disposer d'une évolution temporelle du climat des 30 derniers millions d'années qui prendrait en compte son hétérogénéité spatiale, au contraire des compilations type "stack" issues des données paléocéanographiques [J. Zachos et al., 2001]. Cela devait permettre de disposer d'informations essentielles en vue de déterminer si les motifs de diversification isolés par les phylogénéticiens étaient sous une

quelconque influence du climat, ou si le moteur de l'évolution était biotique, interne aux communautés, indépendant du forçage externe [Benton, 2009]. Onze ans plus tard, il apparaît évident qu'une telle stratégie sous-estimait le nombre de questions scientifiques impliquées dans chacun des trois piliers sus-mentionnés. Elle ne faisait pas non plus suffisamment de cas des difficultés méthodologiques et des incertitudes liées aussi bien aux reconstructions spatio-temporelles des paléogéographies qu'à la simulation numérique des climats anciens. Mes travaux de recherche ont ainsi suivi une trajectoire paradoxale vis-à-vis des objectifs affichés. D'un côté ils n'ont conduit qu'à traiter une partie (à savoir les liens entre *quelques* changements paléogéographiques et le climat) de la question posée. De l'autre, ils ont porté sur un champ de recherche plus large que ce qui avait été envisagé initialement -à la faveur de projets et de nombreuses discussions avec mes collègues- avec l'étude de plusieurs mécanismes, des périodes de temps plus anciennes (Mésozoïque) et la mise en place d'un outil central. En somme, la route tracée en 2009 s'est transformée en un graphe tentaculaire de questions scientifiques propres aux trois disciplines au coeur de mon projet. Quoique ces pérégrinations "hors-piste" aient probablement affecté la productivité si chère à nos instances d'évaluation, elles m'ont avantageusement conduit à me rapprocher d'un de mes objectifs de carrière : acquérir une vision la moins parcellaire possible des enjeux et des limites des trois champs disciplinaires sur lesquels repose mon projet. En somme, me rapprocher de la "vraie" interdisciplinarité. Le présent manuscrit, bien que respectant loyalement la figure imposée de "10 pages de travaux, 10 pages de projets", tente précisément d'illustrer ce caractère interdisciplinaire de ma démarche scientifique, en mettant notamment en valeur les travaux que j'ai eu la chance d'encadrer, et en s'appuyant sur une sélection de publications associées.

Dans le chapitre 2 (Synthèse des travaux), je dépeins tout d'abord l'état des connaissances sur les liens entre paléogéographie et climat. Je fais ensuite fond sur les résultats des thèses que j'ai co-encadrées et sur ceux obtenus via des collaborations afin de discuter de la pertinence des modèles de climat pour (i) quantifier les changements climatiques induits par la tectonique (*thèse de Noémie Hamon*) et (ii) simuler des traceurs essentiels à la compréhension de l'évolution des climats anciens. Les deux exemples de la fermeture de l'isthme de Panama et de la surrection du plateau tibétain (*thèse de Svetlana Botsyun*) montrent que ces modèles peuvent être utilisés non seulement comme des outils pour quantifier la réponse du système climatique à la paléogéographie, mais aussi, de façon plus originale, comme des moyens pour contraindre ces changements paléogéographiques dans le temps. Avec un bref exposé des résultats du post-doctorat d'Anne-Claire Chaboureau (encadrement officiel Y. Donnadiou) et de ceux de *la thèse d'Anta-Clarisse Sarr*, je montre qu'un pont entre géosciences et questions évolutives est possible.

Je décris par la suite les verrous inhérents à la modélisation du climat au moyen de modèles complexes que sont les modèles système Terre. Pour ce faire, je me focalise sur les composantes du modèle Système Terre de l'IPSL, et sur la mise en place d'une version du modèle dédiée aux simulations longues typiques des climats anciens, mise en place que nous avons réalisée dans les deux années qui viennent de s'écouler. La discussion sur ces obstacles se prolonge dans la partie 3 du manuscrit, où je questionne leur avenir pour l'étude du système Terre passé.

J'expose également dans cette partie 3 la direction que je souhaite emprunter dans la multitude de voies évoquées plus haut. Là, on trouvera une présentation succincte du travail en cours avec la thèse de Julia Bres, qui vise à mieux comprendre les rétroactions végétation-couche limite dans les modèles de climat, en intégrant les traits fonctionnels des plantes dans les paramétrisations du modèle de végétation ORCHIDEE. Enfin, les dernières considérations sont consacrées aux orientations que je souhaite donner à ma recherche dans les années à venir.

2

CONTEXTE ET SYNTHÈSE DES TRAVAUX SCIENTIFIQUES

2.1 PALÉOGÉOGRAPHIE ET CLIMAT : CONTEXTE HISTORIQUE

2.1.1 De la dérive des continents à la tectonique des plaques¹

L'histoire des sciences fait remonter au XVI^e siècle, et à Abraham Ortelius (1527-1598), les premières spéculations concernant le mouvement des masses continentales à la surface du globe [Romm, 1994]. Ortelius, cartographe néerlandais étudiant l'antiquité, réinterpréta dans son *Thesaurus geographicus* [Ortelius, 1587] la submersion de l'Atlantide du *Timée* de Platon, à la lumière de la complémentarité géométrique apparente du bord Est de l'Amérique du Sud avec la côte Ouest de l'Afrique mise en évidence dans sa propre carte du monde *Theatrum Orbis Terrarum* de 1570. Il suggéra² que, si l'Atlantide de Platon avait une quelconque véracité, alors un déchirement lié à un événement catastrophique avait du conduire à la séparation des deux continents [Romm, 1994]. Plusieurs auteurs, se basant sur les mêmes observations cartographiques, firent des propositions similaires au cours des siècles suivants (e.g. [Snider-Pellegrini, 1858]), mais ce n'est qu'au XIX^e siècle que la discussion sur la fixité ou la mobilité des continents dans le temps émergea véritablement sur la place scientifique. Le géologue autrichien Eduard Suess (1831-1914) partisan de la théorie de la contraction de l'écorce terrestre, qui à l'image d'une pomme se desséchant, expliquerait la formation des océans et des continents, proposa, en se basant sur la répartition sur trois continents du genre de fougère fossile *Glossopteris*, l'existence passée d'un supercontinent "Gondwanaland" réunissant Amérique du Sud, Afrique et Asie. Cette vision engendra un débat et une contre-argumentation aux Etats-Unis, menée par James Dana (1813-1895). La discussion déborda en réalité des géosciences *stricto sensu*; ainsi, si Lyell reconnaîtra le déplacement des masses continentales dans la dernière édition des *Principes de Géologie*³, et l'évoqua même pour expliquer des états froids ou chauds de la Terre dans le passé⁴, Alfred R. Wallace, considéra que ces déplacements n'avaient pu être que marginaux :

When we speak of the permanence of oceanic and continental areas as one of the established facts of modern research, we do not mean that existing continents and oceans have always maintained the exact areas and outlines that they now present, but merely, that while all of them have been undergoing changes in outline and extent from age to age, they have yet maintained substantially the same positions, and have never actually changed places with each other. There are, moreover, certain physical and biological facts which enable us to mark out these areas with some confidence. [Wallace, 1889].

1. Ce titre est emprunté à celui du premier chapitre du livre de Naomie Oreskes *Plate tectonics : An insider's history of the modern theory of the Earth* [Oreskes, 2018], qui a également fourni l'essentiel de la chronologie présentée ici.

2. "Nisi fabula sit, Gadir sive Gades pars erit reliqua Atlantidis sive Americae insulae, atque haec non tam submersa (ut idem refert in Timaeo) quam ab Europa atque Africa terrae motu et illuvione abrupta :[...]Si cette œuvre n'est pas une fiction, alors Gadir ou Gades est la partie restante de l'île Atlantide ou Amérique - qui n'a pas été coulée (comme le rapporte Platon dans le *Timée*) mais plutôt arrachée à l'Europe et à l'Afrique, par des tremblements de terre et des inondations.

3. "Continents, therefore, although permanent for whole geological epochs, shift their positions entirely in the course of ages." [Lyell, 1867].

4. "When land is massed in equatorial and tropical latitudes polar climates are mild. The land, heated to an excess under the equatorial sun, gives rise to warm currents of air that sweep north. On the other hand, land massed around the poles produces the reverse effect. There is no land at the equator to soak up heat and no warm winds coming into polar regions." [Lyell, 1867] (voir [Fleming, 1998] pour une analyse des considérations de Lyell sur les changements climatiques.

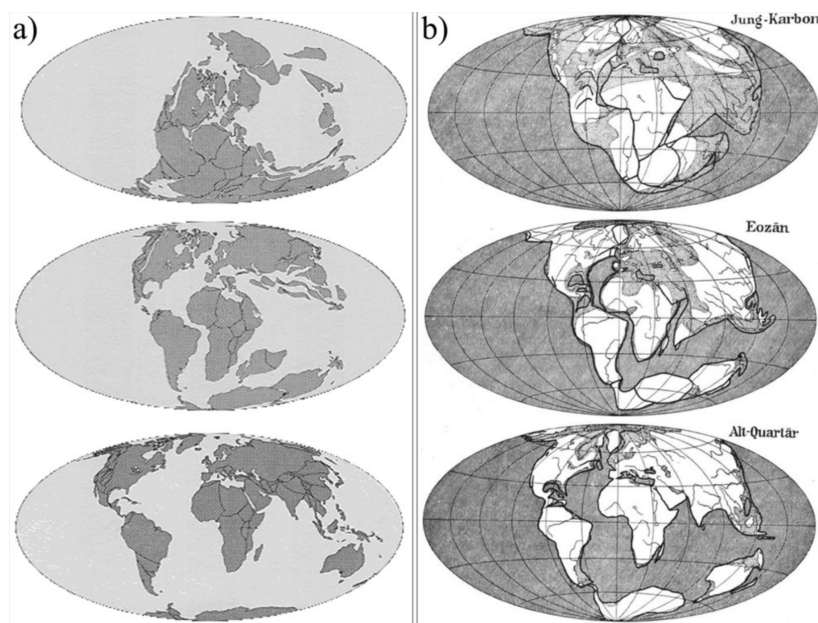


FIGURE 1 – Juxtaposition des reconstructions paléogéographiques proposées par A. Wegener pour trois périodes géologiques (Carbonifère, Eocène, Quaternaire) et celles plus récentes de Scotese (PALEOMAP project), figure reprise de [Vérard, 2019]

Alfred Wegener (1880-1930), météorologue, après un début de carrière passé à étudier la thermodynamique de l'atmosphère et la structure verticale de celle-ci aux hautes latitudes⁵ formalisa l'idée de déplacement des masses continentales, *dérive des continents*, proposant même des cartes paléogéographiques à partir d'arguments géodésiques, géophysiques, géologiques, paléontologiques et paléoclimatiques [Wegener, 1937]⁶. Les éditions successives de la "genèse des continents et des océans" engendrèrent un rejet immédiat de la théorie dans la communauté nord-américaine, pour des raisons allant du manque de robustesse des arguments géologiques à l'absence de mécanisme pour expliquer les déplacements continentaux, en passant par la nationalité de l'auteur [Oreskes, 1999]. Le rejet initial s'est par la suite mué en un débat de plusieurs décennies, d'une rare violence dans le champ des géosciences, qui fit écrire en 1965 à P.M.S. Blackett, en introduction d'un symposium dédié à la dérive des continents :

The controversy was often violent and sometimes almost abusive. One feels that it was only the politer manners of our own age which prevented some discussions by geologists of the evidence for and against continental drift from ending as did the Society upon the Stanislaus in the days when the Wild West was really wild. [Blackett, 1965]

Ce symposium est surtout emblématique de la révolution en cours dans les géosciences des années 1960. Y furent présentés un scénario de "fabrication" des océans Atlantique et Indien par Bruce Heezen et Marie Tharp [Heezen et Tharp, 1965], basées notamment sur leur cartographie des fonds marins publiée quelques années auparavant [Heezen et al., 1959]. S. K. Runcorn (1922-1995) y exposa une synthèse des mesures paléomagnétiques réalisées sur les continents européens et américains, démontrant l'écart des chemins de dérive apparente du

5. Élément assez peu discuté, AW proposa notamment en 1911 l'existence d'un nouvel élément chimique, plus léger que l'hydrogène, qu'il baptisera *geocoronium*, pour expliquer les aurores boréales. Cette étude a eu suffisamment de retentissement pour qu'elle soit traduite par le service de météorologie militaire français avec une note qui pourrait s'appliquer à l'ensemble des travaux d'AW : "Ce travail fera date dans l'histoire de l'aérodologie. A côté d'imperfections et d'inexactitudes, il est rempli de vues ingénieuses."

6. Je me réfère ici à la traduction française de la cinquième et dernière édition de l'ouvrage, paru pour la première fois en allemand en 1915 sous le titre "Die Entstehung der Kontinente und Ozeane".

pôle magnétique, et le fait que les deux continents se sont éloignés l'un de l'autre au cours du temps [Runcorn, 1965]⁷.

La mise en évidence des dorsales océaniques avait conduit H. Hess à proposer une théorie de l'expansion des fonds océaniques dans un essai de 1960, dans lequel il proposait que la croûte océanique était produite dans les dorsales par remontée magmatique. En 1963, F.J. Vine et D.H. Matthews proposèrent une théorie (le canadien L. Morley la proposera de façon indépendante et contemporaine, son article de 1963 ayant été rejeté par les revues *Nature* et *Journal of Geophysical Research*) reliant l'expansion des fonds océaniques de Hess avec les multiples observations paléomagnétiques issues des missions en mer des différents groupes américains [Vine et Matthews, 1963] : le basalte produit au sein des dorsales, se refroidissant en deçà du point de Curie, enregistre le champ magnétique contemporain de sa production et les "zébrures" paléomagnétiques mesurées sur le plancher océanique sont interprétées comme autant de régions d'enregistrement des renversements du champ magnétique terrestre. La dérive des continents devient ainsi une théorie de l'expansion du plancher océanique dont on peut quantifier la dynamique. La théorie sera complétée par la mise en évidence des "failles transformantes" par le géologue canadien Tuzo Wilson (1908-1993) dont les développements en sismologie permettront de déterminer l'orientation, confirmant le déplacement latérale de la croûte océanique de part et d'autre des dorsales. Ce faisceau d'indices sera intégré par D.P. McKenzie et R. L. Parker [McKenzie et Parker, 1967], et J. Morgan [Morgan, 1968] de façon indépendante, en une théorie synthétique de déplacement de la croûte terrestre comme un corps solide sur une sphère. La même année, Xavier Le Pichon reprendra ce concept et proposera un modèle calculant le déplacement de ces plaques rigides dans le temps [Le Pichon, 1968] : la tectonique des plaques était née.

En 2020, il existe une quinzaine de modèles de tectonique des plaques, qui permettent de reconstruire dans le temps la disposition des masses continentales [Vérard, 2019], à une échelle spatiale moyenne de 100 km et un intervalle temporel moyen de 1 million d'années. Couplés aux reconstructions de niveaux marins et aux indicateurs d'érosion continentale comme le ratio $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, ils permettent d'obtenir une reconstruction tridimensionnelle de la surface terrestre pour l'ensemble du Phanérozoïque. Un enjeu cependant pour la communauté des géosciences est d'intégrer ces modèles avec les modèles de convection du manteau, qui permettent, avec les données sismiques, de valider/invalider certaines reconstructions. Surtout, à l'échelle régionale, la dimension verticale des reconstructions paléogéographiques (paléobathymétrie/paléoaltitude) issues de ces modèles est incertaine, alors qu'elle est tout à fait cruciale pour la modélisation des paléoclimats. En présentant mon travail sur le passage de Panama et le travail de thèse de Svetlana Botsyun sur le Plateau tibétain, je tenterai d'illustrer comment ces verrous peuvent être levés.

2.1.2 Passages océaniques, montagnes et dynamique du climat

Les premiers liens étudiés entre la paléogéographie et la dynamique du climat concerne la formation des reliefs et les changements de température, et ont été mis en avant dans la communauté des géologues. En 1856, James Dana publie un traité sur la géologie de l'Amérique du Nord dans lequel il explique l'existence d'une période glaciaire (qu'il nomme aussi *drift period*, en raison de l'observation de blocs erratiques déplacés dans le paysage nord-américain) par un soulèvement important du relief à l'échelle qui aurait conduit à un refroidissement global. Il considère également que le climat contemporain est le résultat d'une lente complexification, en raison de la surrection des reliefs, d'un climat à l'origine globalement tropical⁸.

7. Et S. K. Runcorn d'achever son article avec cette phrase : "*The hypothesis of continental drift is supported as being much preferable in view of the concurrence of palaeomagnetic, palaeoclimatic and geological evidence.*"

8. "*Again, the first climates were all tropical. But when mountains and streams were attaining their growth, a diversity of climate, (essential to the full strength of the latter,) was gradually evolved, until winter had settled about the poles as well as the earth loftier summits, living only a limited zone, - and that with many variations - to perpetual summer.*"

La mise en évidence du caractère répétitif des glaciations du Quaternaire a eu raison de cette théorie, mais la surrection des chaînes de montagne est revenue, plus d'un siècle plus tard, comme un argument important lorsque les courbes isotopiques des foraminifères benthiques ont mis en évidence une tendance au refroidissement global de la planète au cours des 65 derniers millions d'années [J. C. Zachos et al., 2008; J. Zachos et al., 2001; Miller et Katz, 1987; Shackleton, 1975]. Ce n'est plus alors le seul effet de refroidissement avec l'altitude qui est invoqué, mais le rôle des reliefs, et en particulier de la mise en place du plateau tibétain, comme catalyseur de l'alévation physico-chimique des silicates, qui est un puits de carbone et qui contribue, aux échelles de temps longues, à la baisse de la concentration en CO₂ atmosphérique [Raymo et Ruddiman, 1992]. Les avancées récentes dans la modélisation des cycles biogéochimiques ont montré que le paléothermostat, issu de l'équilibre entre la source de pCO₂ qu'est le dégazage volcanique et le puits qu'est l'altération des silicates et l'entassement de carbone organique, est en fait très dépendant de la disposition continentale et de la nature des roches exposées à l'altération [Goddéris et al., 2014; Lefebvre et al., 2013]. La communauté des climatologues et paléoclimatologues s'est véritablement emparée du sujet de l'impact climatique de la paléogéographie avec le double avènement (i) de la théorie de la tectonique des plaques, qui a permis d'asseoir définitivement le "mobilisme" des continents dans la communauté scientifique et (ii) de la simulation numérique du climat avec l'augmentation des moyens de calculs, qui ont progressivement facilité la résolution des équations primitives en différences ou volumes finis dans les domaines océaniques et atmosphériques⁹.

Les premières études théoriques s'attaquant à la quantification du rôle des chaînes de montagnes et/ou des plateaux sur le climat ont été réalisées avec une approche dynamique, météorologique, dans le seul but d'expliquer l'état moyen de la circulation atmosphérique actuelle, sans perspective paléoclimatologique. En 1950, B. Bolin (1925-1997), alors en doctorat à l'Institute for Advanced Study de Princeton, généralise ainsi les travaux de J. Charney et A. Eliassen de l'année précédente en démontrant à l'aide d'un modèle 1-D barotrope que les chaînes de montagnes, en forçant l'ascendance des flux d'ouest, génèrent des ondes planétaires suivant le principe de conservation de la vorticité potentielle, et jouent ainsi un rôle crucial dans l'établissement des ondulations de la circulation d'ouest (westerlies), altérant les champs de pression et de température en aval des massifs montagneux [Bolin, 1950]. En 1974, S. Manabe et T. B. Tepstra (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory -GFDL-, Princeton) montrent en comparant des simulations avec et sans montagnes réalisées avec la première version du modèle de circulation atmosphérique du GFDL, que les chaînes de montagnes ont également une influence importante sur le cycle hydrologique et les régimes de précipitations des régions à l'aval du relief [Manabe et Terpstra, 1974].

Dans le domaine océanique, A. E. Gill (Cambridge) & K. Bryan (GFDL) ont été les premiers, en 1971, à étudier l'effet de l'ouverture du passage de Drake à l'aide de simulations numériques [Gill et Bryan, 1971] réalisées avec le tout premier modèle de circulation océanique publié par Bryan et M. D. Cox quelques années auparavant [Bryan et Cox, 1967]¹⁰. À l'image des études de Bolin, il s'agissait ici de comprendre le fonctionnement du système climatique actuel; des expériences de sensibilité altérant la profondeur du passage de Drake permettaient de montrer l'influence de celui-ci sur l'intensité du courant circum Antarctique (ACC) ainsi que sur la formation des eaux profondes. Les premières véritables applications de simulations aux problèmes de paléogéographie et de paléoclimatologie arrivent néanmoins dans la même décennie, stimulées par (i) les publications relatives à la théorie de la tectonique des plaques et les reconstructions paléogéographiques associées et (ii) la multiplication des

9. Au vu du format court de ce manuscrit, nous ne reviendrons pas ici sur l'épistémologie de la modélisation du climat, mais invitons plutôt le lecteur à consulter les travaux de Paul Edwards [Edwards, 2010] et d'Hélène Guillemot [Guillemot, 2007].

10. Le premier modèle couplant océan et atmosphère sera publié par S. Manabe et K. Bryan en 1969 [Manabe et al., 1969].

enregistrements isotopiques marins (e.g. [Emiliani, 1961 ; Lowenstam et Epstein, 1954]). Le premier modèle n'est pas numérique : il s'agit de l'étude de Luyendyk et al. [1972] (Woods Hole Oceanographic Institution), qui utilisent le *modèle de vortacité planétaire* de von Arx [Arx, 1952]¹¹ pour simuler expérimentalement l'écoulement océanique répondant à une paléogéographie du Crétacé, dans laquelle les passages maritimes de l'est-Tethys et de Panama sont alternativement fermés et ouverts. Ces expériences de sensibilité permettent aux auteurs de proposer la première hypothèse de régulation des transferts de chaleur aux hautes latitudes par les passages maritimes. Les années qui suivent, plusieurs études utilisent alternativement des approches semi-quantitatives [Frakes et Kemp, 1972], des modèles hémisphériques [Donn et Shaw, 1977], ou des modèles radiatifs [Sellers et Meadows, 1975] pour quantifier l'impact d'une paléogéographie changeante sur le climat des 100 derniers millions d'années. Intéressamment, dans cette dernière étude, l'idée d'une régulation thermique de la Terre par l'albédo planétaire qui changerait en fonction du déplacement des masses continentales, déjà émise par Lyell de façon tout à fait hypothétique à la fin du XIX^e, refait surface. Le véritable essor des simulations numériques des paléoclimats "anciens" aura lieu dans les années 1980 avec les améliorations conjointes des modèles de circulation générale et des reconstructions paléogéographiques. C'est le NCAR qui fut précurseur dans le domaine, avec les travaux d'E. J. Barron et collaborateurs, qui poseront la question de la représentation des "équables climats" états climatiques chauds de la Terre au cours desquels le gradient latitudinal de température est fortement réduit [Barron et Washington, 1984 ; Barron, 1983 ; Barron et Washington, 1982].

2.2 CONTRIBUTION À LA COMPRÉHENSION DES LIENS PALÉOGÉOGRAPHIE/CLIMAT

2.2.1 Travail de thèse de Noémie Hamon. Fermeture du passage est-téthysien sur la dynamique océanique et le climat européen au Miocène

Au cours de la thèse de Noémie Hamon, nous avons souhaité comprendre le rôle joué par la fermeture de l'est-Tethys (i.e. la partie orientale de la méditerranée au Miocène) dans la transition climatique du Miocène moyen (MMCT, ca.13 Ma). La version du modèle de l'IPSL était alors IPSL-CM4 [Marti et al., 2010], et nous n'avions pas encore fait les développements nécessaires à la modification de la configuration des continents et des bassins océaniques (voir 2.3). Nous avons donc réalisé plusieurs expériences de sensibilité à la profondeur du passage est-téthysien avec le modèle FOAM (Fast Ocean Atmosphere Model version 1.5, www.foamodel.org; e.g. [Marshall et Lynch, 2006]), modèle basse résolution couplant le modèle atmosphérique CCM2 (NCAR) et le modèle océanique OM3 (Univ. Wisconsin Madison). Nous avons montré qu'un passage profond permettait l'apport d'eaux chaudes et salées dans l'océan Indien, ce qui est conforme à l'état décrit par les données isotopiques de cette période. Nous avons également pu montrer que la fermeture progressive de l'est-Téthys conduit à un renforcement de l'ACC via d'importants changements des gradients latitudinaux de densité océanique, ainsi qu'une augmentation de l'activité de la circulation méridienne de retournement atlantique (AMOC), via l'entrée d'eaux salées par le détroit de Gibraltar [Hamon* et al., 2013].

Un autre objectif de la thèse de Noémie Hamon était de comprendre les mécanismes climatiques qui ont permis l'établissement de forêts subtropicales en Europe pendant l'Optimum Climatique du Miocène moyen (MMCO, 17-15 Ma), concomitant de l'expansion des premiers hominoïdes entre l'Afrique et l'Asie. Dans un article publié dans la revue *Geology*, nous avons

11. Le modèle de von Arx consiste en un bassin rotatif de 2 mètres de diamètre. Les continents y sont représentés par de la mousse en caoutchouc de 5 cm d'épaisseur, les océans par une couche d'eau de 4cm, et les vents par de l'air pulsé tangentiellement à la surface

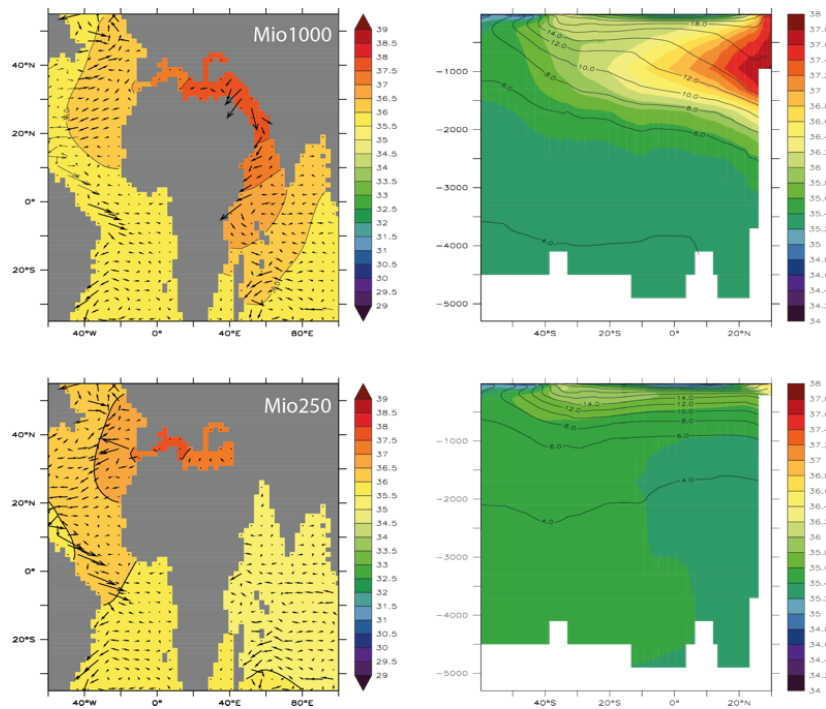


FIGURE 2 – Simulations de la salinité de surface (gauche) et de son profil vertical dans l’océan Indien (droite) avec le modèle FOAM, pour deux scénarios de profondeurs du passage est-téthysien (1000 m, en haut, et 250 m, en bas). [Hamon* et al., 2013]

quantifié l’impact de différentes concentrations en CO₂ atmosphérique et de la présence d’une calotte de glace sur le continent Antarctique à l’aide du modèle FOAM et du modèle de végétation continental CARAIB [Warnant et al., 1994]. Nous avons montré qu’avec la configuration paléogéographique contemporaine du MMCO, une concentration en CO₂ supérieure à l’actuel était nécessaire au développement d’arbres subtropicaux en Europe. Cependant, à fort taux de CO₂ (700 ppmv), la convection en Atlantique Nord s’effondrait, provoquant un des moyennes latitudes de l’hémisphère nord, et une baisse de productivité des arbres subtropicaux sur le continent européen. Le changement d’albédo en Antarctique provoquait quant à lui des modifications de la circulation thermohaline, qui aboutissaient à un climat plus chaud et légèrement plus humide en Europe, favorisant le développement de la forêt subtropicale. Ces résultats indiquent qu’un faible volume de glace en Antarctique (proche de 25% de la calotte Est-Antarctique actuelle) associé à une concentration atmosphérique en CO₂ supérieure à l’actuelle permet de simuler un climat et une végétation en meilleur accord avec les données européennes pour le MMCO [Hamon* et al., 2012].

2.2.2 Contraindre la répartition des océans et des continents en modélisant l’epsilon Neodyme

La fermeture du passage océanique entre l’Amérique du Nord et l’Amérique du Sud (CAS, pour *Central American Seaway*, défini généralement comme le passage le long de la frontière tectonique entre la plaque sud-américaine et la microplaque de Panama) est un événement crucial dans l’histoire biotique et climatique du Cénozoïque. La connexion entre les deux Amériques a permis des échanges floristiques et fauniques dès le Miocène [Pennington et Dick, 2010; Kirby et MacFadden, 2005] dont le point d’orgue fut le *Great American Biotic Interchange* qui mis en contact il y a 2.6-2.7 millions d’années les communautés de mammifères terrestres qui évoluaient auparavant de part et d’autre du CAS. Du point de vue climatique, la fermeture du CAS correspond à l’arrêt de l’échange des masses d’eau entre les bassins

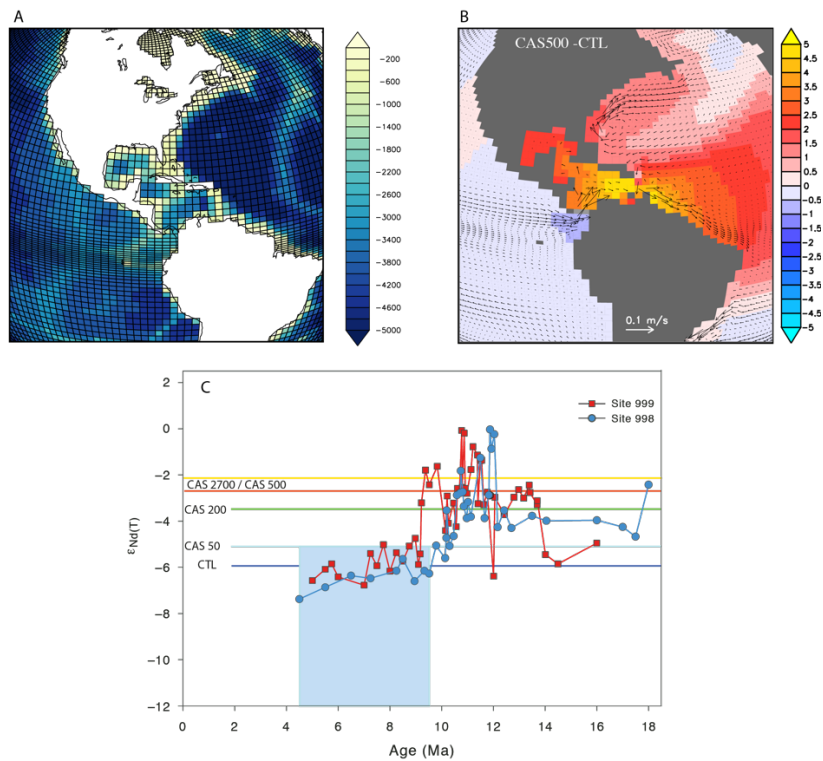


FIGURE 3 – A. Bathymétrie sur la grille ORCA2 (mètres). B. Anomalies d’epsilon-neodyme CAS ouvert - fermé, à 500m. C. Evolution des valeurs d’espilon-Nd au Néogène, d’après [Newkirk et Martin, 2009], et comparaison avec les valeurs simulées

Pacifique et Atlantique, et a donc été très tôt étudié par les modélisateurs océanographes, comme évoqué plus haut avec l’étude de Luyendyk et al. [1972]. Avec le modèle océanique de Hamburg (résolution de 3.5, 11 niveaux verticaux, forcé par des climatologies de stress de vent et de température), Maier-Reimer et al. [1990] a montré que la fermeture du CAS avait du conduire à un renforcement de la circulation de retournement Atlantique (AMOC). Depuis cette étude une vingtaine d’études de modélisation (voir [Sepulchre et al., 2014]), faisant varier la configuration du CAS, sa position latitudinale, et les conditions initiales de l’océan, ont confirmé ces résultats.

Cependant, le moment précis du soulèvement et de la fermeture finale de l’isthme, ainsi que la paléogéographie de la région, longtemps estimés comme datant du Pliocène, sont depuis peu très débattus [Jaramillo et al., 2017; O’Dea et al., 2016]. La compilation de données analytiques telles que la géochronologie U/Pb des zircons magmatiques et détritiques, la thermochronologie et les analyses paléomagnétiques, suggèrent en effet que l’isthme a commencé à émerger à l’Éocène moyen et qu’au début du Miocène, le CAS était réduit à seulement 200 km [Montes et al., 2012]. Ces données, combinées à des études paléontologiques [Kirby et MacFadden, 2005], indiquent également que l’Amérique centrale, y compris la partie orientale de l’isthme, avait une connexion terrestre continue avec l’Amérique du Nord depuis le début du Miocène. La fermeture tectonique aurait entravé la circulation des eaux profondes peu après. Plusieurs études issues de campagnes paléocéanographiques dans le Pacifique et les Caraïbes portant sur la composition isotopique du néodyme (ϵ_{Nd}) des masses d’eau fournissent des informations uniques sur l’évolution des échanges d’eau par la CAS. Les valeurs de (ϵ_{Nd}) des eaux du Pacifique et des Caraïbes sont en effet très distinctes, et les mesures effectuées sur les dents et les débris de poissons fossiles [Newkirk et Martin, 2009] et les croûtes de ferromanganèse [Frank et al., 1999; Reynolds et al., 1999] dans les deux bassins

ont été interprétées comme indiquant un écoulement des masses d'eau du Pacifique vers les Caraïbes, dont l'intensité aurait diminué à la fin du Miocène.

Le cycle du néodyme dans l'océan ouvert dépend de trois sources lithogéniques, que sont les poussières atmosphériques, les flux hydrothermaux, les décharges des fleuves, et la remobilisation des sédiments sur la marge continentale. Le puits est la sédimentation aux marges ou dans l'océan ouvert. La mise en évidence, aux marges, d'un changement de composition isotopique du Nd sans changement de concentration de ce dernier (le "paradoxe du néodyme"), et les premières modélisations du cycle du Nd montrant la nécessité d'un terme source d'un ordre de grandeur supérieur aux apports atmosphériques et fluviaux pour équilibrer le bilan [Tachikawa et al., 2003], ont conduit Lacan et Jeandel [2005] à proposer le processus de *boundary exchange*, par lequel le Nd est réintégré dans les masses d'eau par remobilisation des sédiments (influençant par là la composition isotopique des masses d'eau) et resédimentation ("scavenging"), altérant la composition isotopique de l'eau, mais pas sa concentration. Cet échange est considéré comme le terme sources-puits dominant du cycle océanique du Nd (voir [Jeandel et al., 2011]).

Arsouze et al. [2007] ont intégré l' ϵ_{Nd} comme traceur passif (dans le sens où il n'altère pas la circulation océanique, au contraire des traceurs actifs que sont la température et la salinité) des masses d'eau dans le modèle NEMO, composante océanique du modèle couplé de l'IPSL. Le modèle résout une équation de transport comportant un terme «source et puits» spécifique :

$$\frac{d\epsilon_{Nd}}{dt} = S(\epsilon_{Nd}) - \mathbf{U} \cdot \nabla \epsilon_{Nd} + \nabla \cdot (K \nabla \epsilon_{Nd}) \quad (1)$$

avec $S(\epsilon_{Nd})$, terme source-puits, et $\mathbf{U} \cdot \nabla \epsilon_{Nd}$ et $\nabla \cdot (K \nabla \epsilon_{Nd})$ respectivement les termes advectifs et diffusifs du transport, issus des champs du modèle dynamique. Le terme source-puits, qui représente le *boundary exchange*, s'écrit comme une relaxation de la composition isotopique vers les valeurs d' ϵ_{Nd} aux marges :

$$S(\epsilon_{Nd}) = 1/\tau \cdot (\epsilon_{Nd_{marg}} - \epsilon_{Nd}) \cdot mask_{marg} \quad (2)$$

avec :

$\epsilon_{Nd_{marg}}$ la composition isotopique du néodyme de la marge (reconstruite par [Jeandel et al., 2007]), τ le temps de relaxation qui varie de 6 mois en surface à 10 ans à 3000 mètres de profondeur, et $mask_{marg}$ la fraction occupée par la marge dans le point de grille considéré.

Nous avons utilisé le modèle IPSL-CM4 et modifié la configuration continentale actuelle pour ouvrir un passage équivalent aux reconstructions du CAS de Montes et al. [2012] pour le Miocène. Nous avons ensuite réalisé une succession de simulations dans lesquelles nous avons progressivement remonté la profondeur du CAS. Pour chaque expérience, nous avons utilisé le code de Arsouze et al. [2007] pour simuler l'impact de ces scénarios paléogéographiques sur l' ϵ_{Nd} des masses d'eau, afin de le comparer aux enregistrements paléocéanographiques. Cette comparaison nous a permis de suggérer qu'un seuil avait été franchi dans la fermeture du CAS vers 9 millions d'années. Postérieurement à notre étude, une étude synthétisant un ensemble de phylogénies moléculaires réalisées sur des taxons terrestres et marins, ajoutée à une synthèse des données fossiles a confirmé qu'une connexion entre les deux Amériques avaient pu être active dès le Miocène moyen [Bacon et al., 2015].

2.2.3 Travail de thèse de Svetlana Botsyun. Contraindre l'altitude passée des orogènes en simulant le d18O : le cas du plateau tibétain

En 2013, j'avais initié avec l'aide de Camille Risi (Laboratoire de Météorologie Dynamique) la mise en place de simulations atmosphériques avec la version dite "isotopique" du modèle de circulation atmosphérique LMDz, dénommée LMDZiso, qui inclut la représentation du

fractionnement isotopique de l'oxygène dans toutes les phases de l'eau atmosphérique [Risi et al., 2010]. Directement inspiré du travail de Poulsen et al. [2010] sur les Andes, mon idée était de tester l'impact de différentes altitudes du plateau tibétain sur les processus à l'origine du fractionnement isotopique de l'oxygène dans les eaux de pluie. Le $\delta^{18}\text{O}$ est en effet un proxy crucial dans la communauté des sciences de la Terre. Mesuré indirectement dans les sédiments carbonatés, il est interprété, moyennant des hypothèses fortes sur les mécanismes de fractionnement et les températures régionales, comme un indicateur de paléo-altitude. Fin 2013, nous avons participé avec mon collègue Yannick Donnadieu au projet International Training Network (ITN) iTECC (Investigating Tectonism-Erosion-Climate-Couplings), qui a pris fin en décembre 2016. Dans ce cadre, nous avons financé et co-encadré la thèse de Svetlana Botsyun (novembre 2013- mars 2017) dont le sujet principal était d'utiliser l'outil modélisation pour comparer et contraindre les données isotopiques de paléo-altimétrie du plateau tibétain. En collaboration également avec Camille Risi, S. Botsyun a pu montrer que le $\delta^{18}\text{O}$ du plateau tibétain était largement influencé par des facteurs indirects (humidité relative, changements de dynamique atmosphérique, effets de post-condensation), indépendants du seul impact de la topographie sur la distillation de Rayleigh. Ces résultats furent importants, car ils ont permis dans un cadre théorique de suggérer nombre d'estimations de paléoaltimétrie de la région. Ils ont été publiés en 2016 dans la revue *Climate of the Past* [Botsyun* et al., 2016]. La fin de la thèse de S. Botsyun a conduit à l'écriture d'un article focalisé sur les simulations du $\delta^{18}\text{O}$ à l'Eocène. Pour ce faire, nous avons dans un premier temps utilisé une paléogéographie reconstruite pour cette période afin de forcer le modèle couplé FOAM, en vue d'obtenir des champs de températures de surface et des conditions de surface continentales Eocène (le modèle couplé de l'IPSL ne nous permettait alors pas de faire ce travail). *In fine*, ces conditions ont servi à forcer le modèle LMDZiso. Dans ce contexte Eocène, nous avons pu tester plusieurs scénarios d'altitude et d'extension latitudinale du plateau tibétain. Nous avons en outre extrait les données isotopiques des carbonates et conduit une démarche de "forward-proxy-modelling", i.e. utilisé les valeurs de températures et de $\delta^{18}\text{O}$ des eaux de pluie simulées par LMDZiso pour inférer le $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates. En le comparant statistiquement avec l'enregistrement, nous avons suggéré que le scénario d'élévation le plus raisonnable pour l'Eocène était celui d'un plateau peu élevé (<3000m) il y a 42 millions d'années. Cet article a été publié comme article long ("Research Article") dans la revue *Science* [Botsyun* et al., 2019b].

Ces résultats, qui remettent en cause les méthodes traditionnelles de paléoaltimétrie isotopique, ont initié un débat [Botsyun* et al., 2019a; Valdes et al., 2019], sur la robustesse des modèles de circulation atmosphérique incluant les isotopes. En a émergé l'idée de conduire, dans le futur, un exercice d'intercomparaison des modèles isotopiques dans des conditions actuelles mais aussi paléoclimatiques, à l'image de l'exercice PMIP. En effet, une faiblesse de notre étude est la potentielle dépendance du signal isotopique des précipitations à la physique du modèle, en d'autres termes aux paramétrisations sous-maille. Un écueil cependant pour ce type d'exercice d'intercomparaison est le temps de calcul; l'ajout des traceurs isotopiques dans les codes engendrent une augmentation massive (x2-3) des temps de restitution des modèles. Nous revenons sur ce point dans la partie 2.3.

2.2.4 Eclatement de la Pangée, changement climatique et radiation des angiospermes. Travail de postdoctorat d'A.-C. Chaboureau

Dans le cadre du programme blanc Phyloospace (dir. A. Franc), financé par l'Agence National de Recherches (ANR), nous avons cherché à contraindre le contexte climatiques entourant la radiation des plantes à fleur, ou angiospermes. Dans ce cadre, le modèle de circulation générale FOAM a été utilisé avec cinq paléogéographie particulières, qui décrivent l'éclatement progressif de la Pangée, de 225 à 70 millions d'années avant notre ère. Ces cinq scénarios ont été testés avec 4 scénarios de concentration en CO_2 atmosphérique, donnant une matrice de 20 simulations paléoclimatiques pour le Mésozoïque. Ces scénarios climatiques

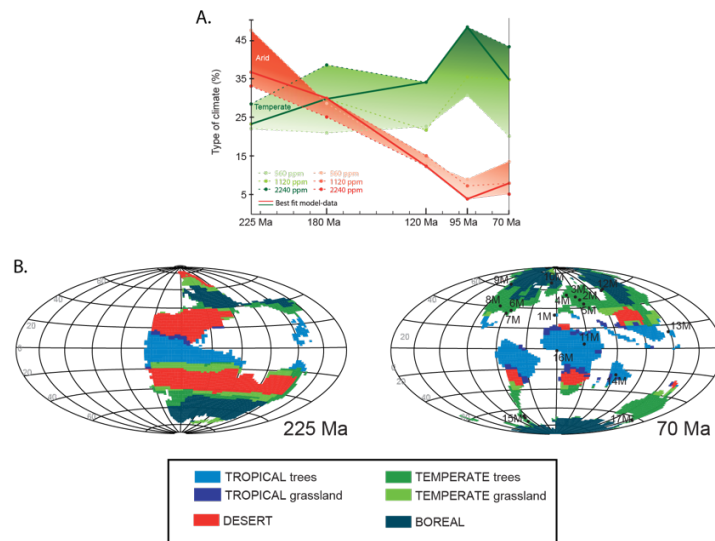


FIGURE 4 – A. Evolution temporelle des biomes arides et tempérés simulés par FOAM-LPJ entre 225 et 70 Ma, pour trois scénarios de concentration en CO₂ atmosphérique. Les scénarios présentant le meilleur accord avec les données paléoclimatiques sont en trait plein. B. Paléobiomes simulés par FOAM-LPJ à 225 et 70 Ma. La rupture de la Pangée conduit à un fractionnement des grandes ceintures désertiques au profit des zones tempérées. Les points noirs à 70 Ma montrent la répartition géographique des fossiles d’angiospermes.

ont ensuite servi à simuler la végétation à l’aide du modèle LPJ. La comparaison des sorties numériques avec des données paléoclimatiques océaniques et continentales a permis de retenir les scénarios les plus probables et de décrire quantitativement l’évolution des grandes zones bioclimatiques à la surface du globe entre 225 et 70 Ma. Nous avons ainsi pu démontrer que le fractionnement du supercontinent Pangée a induit une augmentation graduelle des précipitations et l’expansion progressive de zones tempérées, alors que les grandes ceintures désertiques des moyennes latitudes du Jurassique se fractionnaient au Crétacé. En comparant cette évolution bioclimatique avec l’enregistrement fossile des angiospermes (AC Chaboureau a réalisé la compilation de plus d’une centaine de points de données publiés), nous avons montré une concomitance entre des changements drastiques de climat liés à l’éclatement de la Pangée et la radiation des angiospermes des basses vers les hautes latitudes. Si ce travail n’a pas apporté de mécanisme de causalité entre changement climatique et radiation des plantes à fleur, il fut néanmoins le premier à décrire quantitativement le théâtre environnemental de cet événement évolutif majeur [Chaboureau et al., 2014].

2.3 LEVER LE VERROU DE LA MODÉLISATION DES PALÉOCLIMATS ANCIENS À L’IPSL

Je ne traite ici que de l’aspect technique qui nous a longtemps empêché de réaliser des simulations des climats anciens (i.e. dans lesquelles la paléogéographie est modifiée) avec le modèle de l’IPSL. Les obstacles théoriques, qui devront conduire à une réflexion sur notre façon de faire la simulation des climats anciens, seront discutés dans la partie 3 et... lors de la soutenance. Je ne reviens pas sur la nature du modèle système Terre de l’IPSL. Le modèle

IPSL-CM5A2 est présenté en détails dans l'article [Sepulchre et al., 2020] situé en fin de mémoire.

2.3.1 Deux obstacles pour utiliser IPSL-CM dans le passé géologique

L'équipe "Modélisation du Climat" du LSCE a rapidement disposé d'une *hiérarchie de modèles* pour comprendre les climats du passé, allant des modèles couplant équilibre énergétique et principe de maximisation de production d'entropie [Herbert et al., 2011] aux différentes versions et composantes du modèle système terre de l'IPSL, en passant par les modèles de complexité intermédiaire. Jusque récemment, les études des liens paléogéographie-climat au LSCE étaient cantonnées à l'utilisation du modèle FOAM, modèle couplé de basse résolution développé dans les années 1990 aux Etats-Unis par Robert L. Jacob, et rapporté au laboratoire par Y. Donnadieu au début des années 2000. Outre notre étude sur le rôle de l'éclatement de la Pangée sur la radiation des angiospermes [Chaboureau et al., 2014], FOAM a été l'outil d'un nombre considérable d'études des climats anciens (e.g. [Hearing et al., 2018; Le Hir et al., 2011; Nardin et al., 2011]), et, via le couplage avec le code COMBINE [Goddéris et al., 2014], des rétroactions climat-carbone aux longues échelles de temps [Donnadieu et al., 2006]. Néanmoins, le manque d'expertise sur son code, l'arrêt de son maintien par les développeurs originaux, les changements de machine de calcul, couplés à notre volonté d'utiliser le modèle système terre de l'IPSL, nous ont conduit à son abandon progressif, et m'ont convaincu de mettre en place une version d'IPSL-CM utilisable pour les simulations "deeptime". Deux obstacles devaient alors être surmontés :

- Si les simulations en océan forcé montrent que l'océan de surface répond rapidement à des perturbations imposées en eau douce ou en température, la mise à l'équilibre dans le cadre d'un système couplé est bien plus longue. De fait, la communauté des modélisateurs s'intéressant à des climats très différents de l'actuel (qu'ils soient glaciaires ou plus chauds) utilise en routine des simulations de plusieurs milliers d'années, avec comme objectif d'équilibrer l'océan profond en température. Les performances d'IPSL-CM5A-LR, la version du modèle de l'IPSL utilisée pour l'exercice CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5), étaient d'environ 8 ans / jour sur 32 processeurs de la machine CURIE, ce qui compromettait la réalisation de simulation multi-millénaire.
- La grille (ORCA2) du modèle NEMO est une grille curvilinéaire, tripolaire, construite pour retirer tout point singulier de l'espace de calcul, i.e. des océans. Elle correspond ainsi à un maillage fait, dans l'hémisphère nord, d'ellipses imbriquées partant d'un cercle équatorial jusqu'à former des ellipses confocales dont les foyers sont les points singuliers, situés sur l'Amérique du Nord et sur la Sibérie, et dans l'hémisphère sud, d'une grille Mercator, avec un maillage zonal régulier et un maillage méridien décroissant vers le pôle sud selon le cosinus de la latitude. La grille ORCA2 dispose en outre d'un raffinement sur les mers Méditerranée, Caspienne, Noire, et Rouge, pour lesquels la résolution a été affinée à un 1 degré. L'utilisation d'une telle grille, donc la construction est dépendante de la géographie actuelle était donc impossible pour les périodes anciennes caractérisées par des paléogéographies différentes ; il était donc nécessaire de s'affranchir de cette grille pour travailler avec IPSL-CM.

2.3.2 La mise en place du modèle IPSL-CM5A2

J'avais débuté en 2013 un travail préliminaire sur la grille ORCA, en exhumant une note technique d'Alistair Sellar [Sellar, 2007] et le code issu des travaux de Madec et Imbard [1996] permettant de générer une grille tripolaire. J'avais alors généré difficilement une première grille, mais le travail technique nécessaire demandait trop d'investissement pour aller plus

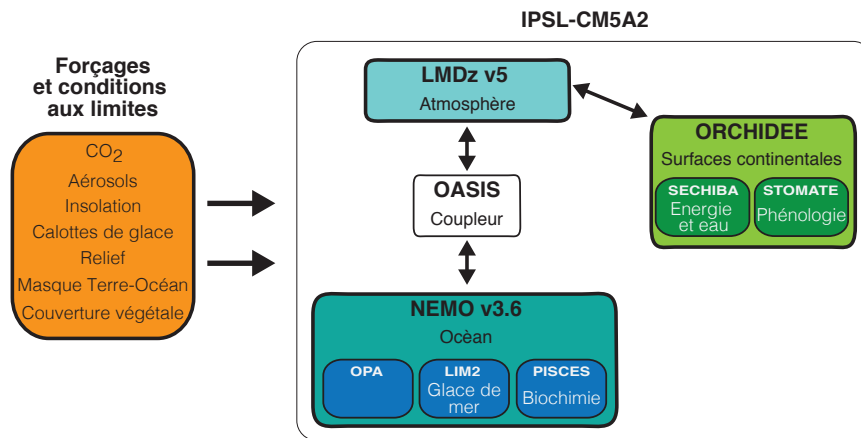


FIGURE 5 – Les composantes du modèle système Terre IPSL-CM5A2. Piquée à Anta-Clarisse Sarr.

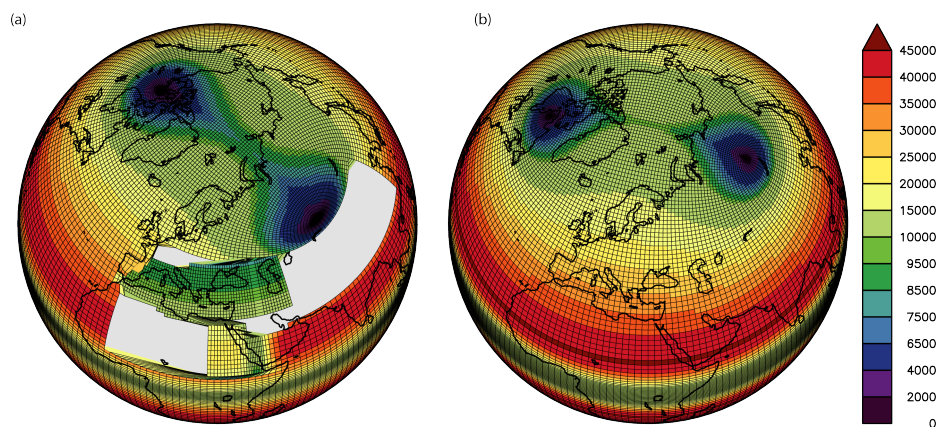


FIGURE 6 – Les grilles ORCA2 (a) et PALEORCA2 (b). L'échelle de couleur indique la surface, en km^2 des mailles de la grille

loin. Ce n'est qu'avec la dernière année de thèse de Jean-Baptiste Ladant en 2015 et son implication sur ce sujet que les développements ont avancé. Nous avons généré une grille "paléo-ORCA2" satisfaisante puis JBL a réalisé l'intégralité du travail de développement pour transférer les conditions aux limites propres aux périodes passées sur cette nouvelle grille, ce qui impliquait l'écriture d'un code dédié, mais aussi l'utilisation de routines écrites pas O. Marti au LSCE pour créer les fichiers nécessaires à l'échanges des champs entre le modèle océanique et le modèle atmosphérique. Ce travail a également impliqué de coder une représentation du routage de l'eau en fonction de la paléotopographie. J.-B. Ladant a ainsi pu réaliser les premières simulations numériques de climat ancien avec le modèle IPSL-CM5A-LR, pour l'Eocène [Ladant, 2015].

Au printemps 2015, j'ai initié, en étroite collaboration avec Arnaud Caubel (Ingénieur CEA, LSCE), l'élaboration d'une version du modèle couplé de l'IPSL qui permettent la réalisation de simulations longues, i.e. de plusieurs milliers d'années, avec un temps de calcul raisonnable. Les ingénieurs de l'équipe CALCULS du LSCE ont réalisé la parallélisation des codes des composantes des modèles IPSL-CM et le portage sur un plus grand nombre de processeurs. Dans un premier temps, mon rôle a été de faire les simulations avec un code "prototype", issu du modèle IPSL-CM5A-LR, d'évaluer les climatologies et comportements des différentes composantes. Nous avons au passage mis en évidence quelques "bugs" assez cruciaux concernant le routage de l'eau douce. Au cours de ce travail, j'ai pris la décision de faire un nouveau réglage (ou tuning) en température du modèle, dont le biais froid avait été documenté par le passé [J.-L. Dufresne et al., 2013]. J'ai à cette occasion pu compter sur les expertises du LMD (F. Hourdin). L'approche a été de corriger le biais froid du modèle via le réglage de paramètres modulant la couverture -et donc le forçage radiatif- des nuages. Spécifiquement, en fixant comme cible du tuning une température globale de l'air à 2 mètres de 13.5°C, j'ai modifié un paramètre d'autoconversion de l'eau dans les nuages afin d'obtenir un forçage radiatif *ad hoc*. Les détails de ce réglage sont présentés dans [Sepulchre et al., 2020].

Nous avons figé et lancé une première version de ce nouveau modèle en octobre 2016. Elle a été assez rapidement (janvier 2017) suivi d'un correctif, suite à la mise en évidence d'une erreur au niveau de la nouvelle version du coupleur OASIS. Cette erreur influençait la conservation de l'eau douce dans le modèle, et également la température globale simulée, et j'ai du procéder à un nouveau tuning du modèle. Nous avons fait plusieurs tests avec Arnaud Caubel dans le but d'améliorer le temps de calcul du modèle. En terme de performances, le temps de calcul réel ("elapsed") a été dans les premières versions divisés par 3 par rapport à IPSL-CM5A-LR, pour la même résolution spatiale. A l'été 2018, IPSL-CM5A2 a été porté par Arnaud Caubel sur la nouvelle machine du TGCC, JOLIOT-CURIE (aussi appelé IRENE, partition Skylake). J'ai alors réalisé des tests de performance en exécutant le code avec plusieurs combinaisons de processus MPI et OMP alloués à LMDZ et NEMO. Il y a quelques mois, le modèle a été porté sur par A. Caubel sur la machine JEAN ZAY, du centre de calcul de l'IDRIS. Les performances actuelles du modèles sont d'environ 96 ans simulés par jour écoulé, ce qui ouvre la voie à des simulations longues. L'article validant le modèle, qui sera publié dans quelques jours dans *Geoscientific Model Development*, présente ainsi deux simulations de plus de 3000 ans.

2.4 VERS UNE APPROCHE INTÉGRATIVE ?

2.4.1 Thèse d'Anta-Clarisse Sarr. Une étude interdisciplinaire de la subsidence de la plateforme de la Sonde, de son impact sur le climat régional du continent maritime (Indonésie) et de ses conséquences biogéographiques

Les travaux de la thèse d'A.-C. Sarr, réalisés entre ISTERRE (Grenoble) et le LSCE d'après une idée originale de mon collègue Laurent Husson, s'appuient sur une approche interdisci-

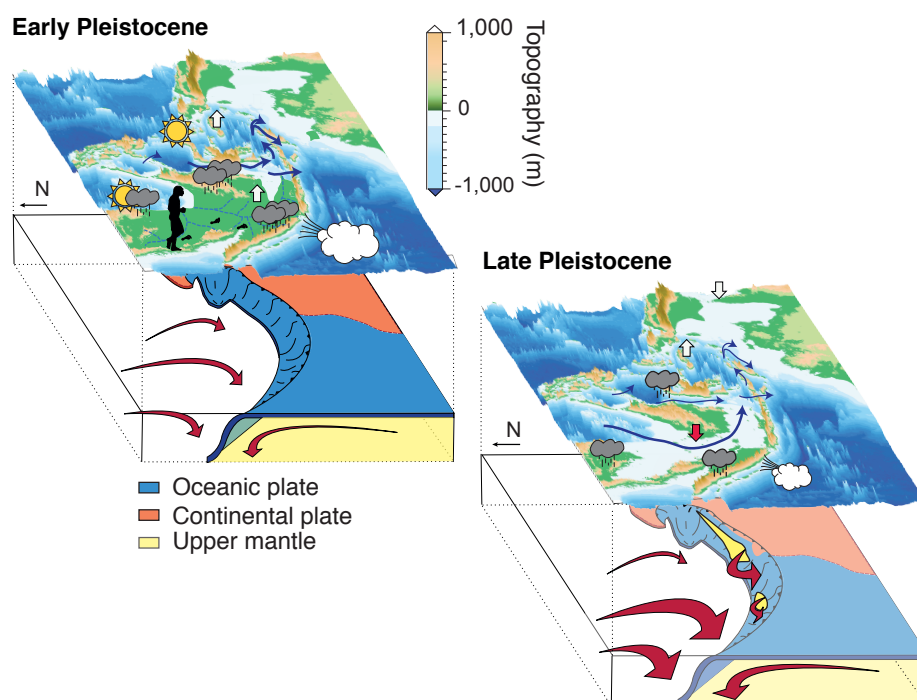


FIGURE 7 – Diagramme synthétique des résultats de la thèse d’A.-C. Sarr. La modification de la géodynamique du panneau plongeant induit la subsidence de la plateforme de la Sonde, qui se retrouve immergée entre le début et la fin du Pléistocène. Les simulations numériques [Sarr* et al., 2019c] montre un changement important dans les régimes de convections sur le continent maritime.

plinaire : ils illustrent la chaîne de connections mécanistiques entre dynamique mantellique et dynamique du climat à travers l'étude du continent maritime (Indonésie). Le caractère insulaire de la région et la présence de mers peu profondes comme la mer de Java permettent des modifications rapides de la répartition terre-océan, et en font un cas idéal pour étudier les connections entre les processus de topographie dynamique (i.e. mouvements verticaux de la surface terrestre en lien avec des compensation isostasique de mouvements du manteau), le climat, et la biogéographie. D'une part, la dynamique mantellique, excitée par les nombreuses subductions, y est très active et contribue à déformer la surface, d'autre part la dynamique climatique de la région est étroitement associée à la répartition terre-océan. A.-C. Sarr a réalisé la première partie de sa thèse à ISTERRE (Grenoble) et a révélé les changements paléogéographiques par la cartographie des morphologies côtières. Celle-ci met en évidence la répartition contrastée de la déformation quaternaire à grande échelle, en soulignant le soulèvement général de la région centrale de l'Asie du Sud-Est (Wallacea), alors que les deux plateformes continentales localisées à l'ouest et au sud-est subsident. A.-C. Sarr a ensuite utilisé des observations et la modélisation de la croissance des récifs coralliens afin de quantifier la vitesse verticale de déformation. Les morphologies récifales issues des simulations numériques ont permis une quantification inédite de la vitesse de subsidence de la plateforme, et les résultats de la thèse ont suggéré que la Sonde était émergée de manière permanente avant 400 000 ans BP, formant une masse continentale entre les îles de l'Ouest indonésien et le continent asiatique. Les causes de ces changements paléogéographiques ont été appréhendées à l'aide de la modélisation mécanique de la géodynamique. Un modèle numérique en trois dimensions d'une zone de subduction a été utilisé afin de d'explorer les causes dynamiques de la déformation. Les résultats ont montré que lors d'un épisode de collision, l'initiation d'une déchirure dans la plaque en subduction, générée par l'entrée dans la fosse de matériel peu dense, entraîne une modification de l'écoulement mantellique et *in fine* un épisode de subsidence dynamique. Les vitesses de déformations calculées sont d'un ordre de grandeur comparable aux vitesses de déformations enregistrées et modélisées à l'échelle régionale. A.-C. Sarr a publié ces résultats inédits dans la revue *Geology* [Sarr* et al., 2019b]. La seconde partie de la thèse d'A.-C. Sarr a été réalisée au LSCE, où les conséquences climatiques des changements paléogéographiques ont été appréhendées par l'intermédiaire de simulations effectuées à l'aide du modèle atmosphérique LMDZ et du modèle système Terre IPSL-CM5A2. Les résultats montrent que la présence d'une plateforme de la Sonde émergée provoque une augmentation saisonnière des précipitations sur le Continent Maritime, engendrée par une intensification saisonnière de la convergence à l'échelle régionale, elle-même contrôlée par le chauffage radiatif des surfaces continentales exposées. Si le signal d'augmentation de convergence est robuste, les changements de précipitation simulés sont eux très dépendants des paramétrisations du modèle LMDZ, en particulier des schémas de convection employés. L'exposition de la plateforme de la Sonde engendre également une modification du transport dans le détroit de Macassar avec un impact local sur la salinité et les températures de surface de l'océan. Ces résultats ont été publiés à *Journal of Geophysical Research Atmospheres* [Sarr* et al., 2019c].

L. Husson a mené, suite à cette thèse, une collaboration avec Florian Boucher (LECA, Grenoble), qui, en reprenant les méthodes statistiques de [Bacon et al., 2015] sur des phylogénies publiées, a permis de déterminer que les taux de divergence (vicariance) des organismes terrestres sur Wallacea avait augmenté significativement (jusqu'à x9 pour les taxons de forêt tropicale) après la submersion de la plateforme. Si cette étude n'a pas testé le lien entre changement climatique induit par la plateforme (ou sa submersion) et biogéographie, elle a cependant pu montrer que le seul effet direct de la subsidence, i.e. l'immersion d'une grande partie des territoires disponibles à 400ka, avait joué un rôle important dans la structuration de la biodiversité indonésienne [Husson et al., 2019].

3

DESCRIPTION DES PROJETS

Les questions que j'ai abordées dans la synthèse de mes travaux sont encore au coeur de mon activité de recherche aujourd'hui. Je souhaite conserver et développer le volet paléogéographie/climat, via notamment la pérennisation d'une version du modèle système Terre de l'IPSL compatible avec les questions liées aux longues échelles de temps, l'inclusion systématique des traceurs et diagnostics spécifiques en vue d'analyser les "paléo-" dynamiques atmosphériques et océaniques, et la prise en compte des traits physiologiques pour améliorer la représentation des paléovégétations. Je compte continuer dans cette voie, en exploitant la simulation des paléoclimats pour évaluer les modèles, et en réfléchissant à leur évolution et aux choix stratégiques que la communauté des paléoclimatologues devra faire dans le futur, notamment vis-à-vis des évolutions des modèles système Terre vers la très haute résolution.

Les liens vers les questions de biogéographie sont en cours de développement, via mon inclusion dans plusieurs projets. Le projet trans-RIFT de Jean-Renaud Boisserie, qui vise à comprendre les processus à l'origine de la dispersion des mammifères dans la partie Nord du Rift est-africain, le projet ERC de Thomas Couvreur, dont le but est de quantifier les moteurs de la diversification des forêts tropicales humides depuis le Crétacé, et enfin ma collaboration qui vient de démarrer Loïc Pellissier, de l'ETH de Zurich, qui développent des modèles de biodiversité pour étudier les liens de causalité entre changements climatiques et biogéographie. Les paragraphes suivants présentent plus en détail ces deux aspects de ma recherche et quelques orientations plus originales que je souhaite donner à ma recherche.

3.1 AMÉLIORER ET QUESTIONNER LA MODÉLISATION DES PALÉOCLIMATS

3.1.1 Travail de thèse de Julia Bres. Mieux comprendre les interactions climat-végétation aux longues échelles de temps

Végétation et processus biophysiques : inclure les traits physiologiques dans les simulations paléoclimatiques

Depuis les travaux pionniers de Charney [1975], qui montra par la simulation numérique la rétroaction positive entre l'augmentation de l'albédo lié à la désertification, et la subsidence atmosphérique et la baisse de précipitation associées, de nombreuses études ont exploré l'impact de la biosphère continentale sur la dynamique du climat (e.g. [Port et al., 2016; Davin et de Noblet-Ducoudré, 2010; Claussen et al., 2001]). A l'interface entre surface continentale-couche limite, le couvert végétal contrôle à la fois le rayonnement et l'intensité des échanges turbulents, via trois propriétés : l'albédo (qui dépend du couvert végétal et de la couleur du sol), la longueur de rugosité, et la capacité évapotranspirative de la végétation, qui dépend d'une part de la dynamique de la couche limite et de la longueur de rugosité, mais aussi des caractéristiques, ou *traits* physiologiques des plantes. On peut simuler l'impact de ces propriétés sur les flux turbulents par une cascade d'équation que je ne présenterai ici que partiellement, pour illustrer mon objectif. Dans le modèle ORCHIDEE, la longueur de rugosité

z_0 dépend des types fonctionnels de plantes, et de la hauteur de la végétation et de son couvert. Elle intervient dans le calcul de la résistance aérodynamique (r_a) :

$$r_a = \left[\left(\frac{0.4}{\log\left(\frac{z}{z_0}\right)} \right)^2 f(Ri) V_a \right]^{-1} \quad (3)$$

avec z hauteur de la végétation, V_a la vitesse du vent et $f(Ri)$ fonction du nombre de Richardson.

Ce coefficient de traînée entre en compte dans le calcul des flux de chaleur sensible et de chaleur latente ; le flux de chaleur sensible est défini, dans le modèle ORCHIDEE tel que :

$$H = \frac{\rho C_p (\theta_s - \theta_a)}{r_a} \quad (4)$$

avec ρ la densité de l'air, C_p la chaleur spécifique de l'air (aussi appelée capacité calorifique massique ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)), θ_a la température de l'air, θ_s la température de la surface et r_a la résistance aérodynamique à l'évaporation qui est inversement proportionnelle à la longueur de rugosité de la surface z_0 et à la vitesse du vent V_a (eq. 3).

La formulation générale du flux de chaleur latente, dépendant de l'intensité du flux total d'évaporation, est :

$$LE = L_p \cdot \beta \cdot \frac{(q_{sat}(T_s) - q_a)}{dr_a} \quad (5)$$

avec L_p la constante de vaporisation de l'eau ($2.46 \times 10^6 J.kg^{-1}$), β un coefficient qui exprime la résistance à extraire l'eau du système sol-végétation, q_{sat} l'humidité à saturation dépendante de la température de surface T_s , q_a l'humidité de l'air, dr_a le produit entre la résistance du sol à l'évaporation d , et la résistance aérodynamique r_a définie par (3).

Le flux total d'évaporation, ou évapotranspiration, est en fait la somme de trois flux : l'évaporation du sol, l'évaporation de la précipitation interceptée par les feuilles, et la transpiration de la canopée, terme dominant. Chacun de ces flux est exprimé comme le produit de l'évaporation potentielle et d'un facteur de résistance β , qui varie pour chacun des flux. Pour la transpiration, β dépend directement de la conductance stomatique à l'eau¹, qui est lié à l'assimilation photosynthétique du CO_2 et à la pCO_2 par un jeu d'équations linéaires (formulation de [Ball et al. \[1987\]](#)). Il apparaît donc que les flux turbulents à l'interface surface continentale-couche limite sont fortement dépendants de traits physiologiques de la végétation qui ont varié, à l'échelle des temps géologiques avec les processus macroévolutifs affectant la végétation. S'il est difficile de contraindre la couleur du sol et l'albédo de la végétation dans le passé géologique autrement que par analogie avec l'actuel, la longueur de rugosité z_0 et les capacités évapotranspiratives sont des caractères qui peuvent être dérivés de l'enregistrement fossile. **J'ai l'intention de travailler à l'inclusion des traits physiologiques issus du registre fossile pour faire varier ces deux caractéristiques et obtenir une représentation de la végétation plus proche de la réalité.**

J'ai initié ce travail, en collaboration avec Nicolas Viovy et Nicolas Vuichard au LSCE, en encadrant la thèse de **Julia Bres** (actuellement en deuxième année). L'idée derrière le travail de J. Bres est d'étudier la rétroaction climatique d'un changement majeur de végétation à l'échelle géologique. Nous avons donc décidé de nous placer dans le contexte du Crétacé (à l'Albien-Aptien, environ 115 Ma), période géologique pour laquelle la végétation terrestre a connu une révolution, avec l'apparition et la diversification rapide des plantes à fleurs, ou angiospermes², qui représente de nos jours >95% de la biodiversité de la flore continentale. Les travaux des paléo-écophysiologues permettent d'apporter des contraintes sur ce que cette

1. La transpiration des végétaux, qui est un co-produit de la photosynthèse, est régulée physiologiquement par des cellules spécialisées, les stomates.

2. Le fameux *abominable mystery* de Darwin.

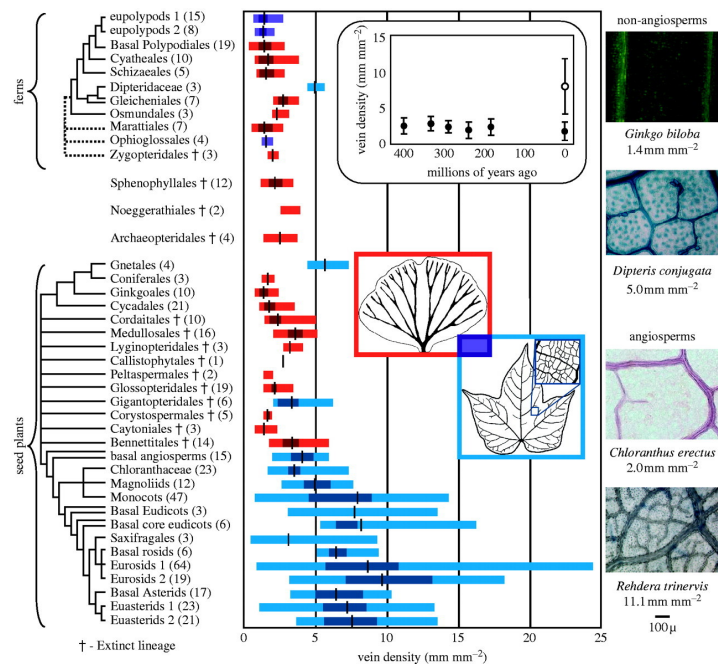


FIGURE 8 – Phylogénie (à gauche) et densité veineuse des organes photosynthétiques des fougères et plantes à graine, mettant en évidence l’augmentation des capacités conductrices de l’eau avec la radiation des angiospermes. D’après [Boyce et al., 2009]

transition a impliqué en termes de traits fonctionnels. Plus précisément, des mesures réalisées sur les macrorestes fossiles montrent une augmentation massive de la capacité transpiratoire (estimée, en première approximation, à un quadruplement) des plantes avec l’apparition des angiospermes, à la fois via l’analyse de la densité du réseau de nervures des feuilles, mais aussi via l’estimation de la conductance stomatique par la mesure de la densité et de la taille des stomates (e.g. [Boyce et Lee, 2017; McElwain et al., 2016; Boyce et al., 2009]).

Les modèles de végétation comme ORCHIDEE ne représentent pas explicitement les traits physiologiques tels que la densité de nervures foliaires, mais nous avons vu qu’ils expriment en revanche la conductance stomatique, qui varie linéairement avec cette la densité de veines. En prenant les compilations de données existantes, nous pouvons donc contraindre les paramètres gouvernant le calcul de la conductance stomatique afin de représenter des variations qui sont cohérentes avec le registre fossile. Nous devons donc être capables de simuler explicitement les conséquences des changements physiologiques, contraints par les données, liés à la diversification des angiospermes. En intégrant ces changements dans le modèle système Terre de l’IPSL, nous disposerons de simulations Crétacé dans lesquelles les conséquences climatiques de cette radiation pourront être quantifiées. Cette approche qui conserve la représentation en types fonctionnels de plantes de la végétation, mais qui propose d’inclure des traits physiologiques, est en phase avec les démarches qui se font actuellement dans d’autres groupes de modélisation (voir les travaux de C. Prentice et collaborateurs) pour la végétation actuelle. Nous proposerons de décliner cette méthode à la fois pour des périodes plus anciennes que le Crétacé, comme le Dévonien où la physiologie des plantes terrestres étaient encore différente [Le Hir et al., 2011; Meyer-Berthaud et al., 2000], tout comme pour la végétation actuelle via des tests de sensibilité dans le modèle de l’IPSL, avec l’optique de corriger les biais secs observés dans les tropiques.

La transition climatique de l'Eocène-Oligocène (EOT, ca. 34 millions d'années avant notre ère) est un des grands sujets de la paléoclimatologie, notamment depuis que les excursions isotopiques y ont montré des excursions isotopiques brutales dans le $\delta^{13}\text{C}$ et le $\delta^{18}\text{O}$, cette dernière étant interprétée comme l'entrée en glaciation du continent Antarctique, et la transition du climat global d'un mode "greenhouse" à un mode "icehouse". Avec Vincent Lefevre, post-doctorant encadré par Yannick Donnadiou, nous avons apporté notre écot à la riche littérature traitant de cette transition, en publiant [Lefebvre et al., 2012] plusieurs tests de sensibilités réalisés avec le modèle FOAM; nous avons suggéré que la baisse de la $p\text{CO}_2$ de l'EOT, en modifiant le gradient latitudinal de densité des masses d'eau, avait contribué significativement à la mise en place du courant circum Antarctique (ACC), proposant de réviser les idées issues des travaux pionniers de [Kennett, 1977], qui proposait l'ouverture des passages océaniques tasmaniens et de Drake comme facteur explicatif de l'initiation de l'ACC. Plus récemment, Ladant et al. [2014] ont montré que la combinaison d'une configuration orbitale favorisant un minimum d'insolation en été austral et d'une $p\text{CO}_2$ inférieure à 900 ppmv était nécessaire pour la mise en place d'une calotte pérenne en Antarctique à l'EOT.

Le rôle joué par les conditions de surface continentales dans la mise en place des noyaux de nucléation de la calotte Antarctique est en revanche assez peu exploré. J'ai l'intention de travailler sur deux aspects de cette question. Dans un premier temps, il s'agira quantifier l'impact de la topographie (hors calotte) du continent sur le climat régional, afin de déterminer si des seuils d'altitude particuliers ont été atteints au cours du Cénozoïque, permettant la mise en place de neige pérenne. Je pense particulièrement à l'effet de la chaîne transantarctique (Transantarctic Mountains, TAM) qui s'étend sur environ 3500 km, avec une topographie atteignant 4500 m et aux montagnes Gamburtsev. Ces deux massifs ont fait l'objet d'études géomorphologiques récentes, suggérant des changements de topographie importants au Cénozoïque. En partant de la reconstruction paléotopographique de l'Antarctique de Wilson et al. [2012], j'envisage de réaliser des expériences de sensibilité à plusieurs scénarios d'uplift des deux chaînes afin de comprendre comment elle ont influencé le transport de l'eau dans l'atmosphère, le couvert neigeux, et la végétation. Ces chaînes étaient-elles en soulèvement à l'Eocène? Peut-on initier une calotte de glace en l'absence de topographie élevée en Antarctique? Les épisodes d'uplift ont-ils causé la disparition du couvert végétal Antarctique? Dans un second temps, j'entends justement explorer le rôle qu'a joué la végétation sur le cycle hydrologique de l'Antarctique à l'Eocène, et déterminer si des boucles de rétroactions étaient impliquées dans la disparition du couvert forestier du continent à l'Eocène. Cette question impliquera également des simulations numériques, mais je souhaite aussi me rapprocher des groupes de paléobotanistes spécialistes de l'exploration des terres australes pour contraindre l'histoire des changements de végétation pré-glaciaires.

3.1.2 Propagation des biais des modèles dans les simulations paléoclimatiques

La simulation des climats futurs dispose de plusieurs méthodes pour prendre en compte les biais des modèles; si la stationnarité des biais quantifiée pour une simulation historique est garantie dans des scénarios d'augmentation de la $p\text{CO}_2$, alors on peut appliquer des corrections de biais *in situ*, en ajoutant par exemple des termes correctifs aux variables d'état des équations prognostiques d'un modèle atmosphérique [Krinner et Flanner, 2018]. Une autre solution est l'application de corrections de biais *a posteriori*, le plus souvent sur les températures et les précipitations, par des méthodes statistiques multivariées (e.g. [Vrac et Friederichs, 2014]). Si ces solutions sont complémentaires et efficace pour la simulation des climats futurs, elles ne semblent pas applicables aux climats anciens, pour lesquels les changements de géographie, en altérant la disposition des continents, la hauteur des chaînes de montagne, empêchent tout rappel ou correction des champs simulés vers des champs

actuels. La seule solution dont nous disposons est donc d'isoler les biais les plus critiques pour l'étude des climats anciens, de comprendre leur origine physique/dynamique, et de tenter de les corriger en amont.

Notre article décrivant le modèle IPSL-CM5A2 décrit les biais climatologiques du modèle. Parmi ces biais, je souhaiterais travailler à la compréhension et l'amélioration de deux d'entre eux :

- Les biais de précipitations continentales dans les tropiques, qui se caractérisent par des précipitations trop faibles sur le bassin amazonien et trop fortes sur l'Afrique équatoriale,
- Le biais de "double ITCZ", biais "classique" des modèles couplés, qui se traduit en moyenne annuelle par deux bandes zonales de précipitation de part et d'autre de l'équateur sur les océans Pacifique et Indien.

Le biais sec sur le bassin amazonien a été une caractéristique commune à tous les modèles couplés de l'exercice CMIP3. L'exercice CMIP5 montra une amélioration de la représentation des précipitations tropicales pour plusieurs modèles, mais plusieurs, dont IPSL-CM5A-LR, n'ont pas vu leur biais sec significativement amélioré. Yin et al. [2013] ont montré que ce biais avait pour origine une surestimation des flux radiatifs en surface avec pour conséquence une mauvaise représentation des flux de chaleur sensible (trop forts) et de chaleur latente (trop faibles), supprimant la convection pendant les saisons de transition. Je souhaite réaliser des diagnostics similaires à Yin et al. [2013] pour IPSL-CM5A2. Le modèle étant très proche d'IPSL-CM5A-LR, on peut s'attendre à une origine similaire de la mauvaise représentation de la précipitation sur le bassin amazonien. Une piste de correction pourrait être de travailler sur les conditions de surface, et donc, la végétation, en procédant par exemple à une nouvelle paramétrisation de l'évapotranspiration (cf. 3.1.1).

Le biais de la "double ITCZ" est problématique dans les modèles couplés, pas seulement pour la représentation des précipitations sur les océans, mais aussi car il induit des erreurs dans les flux de chaleur latente des tropiques, qui peuvent conduire par téléconnexion atmosphérique à des biais dans le climat des moyennes latitudes. En outre, il altère l'intensité de la cellule de Hadley et la position des alizés. Mon objectif n'est pas tant de corriger ce biais -la quasi-absence de progrès des modèles sur ce point entre les exercices CMIP3 et CMIP5 montrant qu'une telle entreprise est particulièrement difficile [Zhang et al., 2015] - que de comprendre son origine dans le modèle IPSL-CM5A2, et sa propagation dans les simulations paléoclimatiques. Quelle est l'impact des forçages typiques des paléoclimats anciens - pCO₂ élevé, absence de calotte de glace, chaînes de montagnes et position des continents différents - sur la double ITCZ? Ce biais est-il stable dans ce genre de simulations? La littérature récente propose nombre de diagnostics qui permettront de caractériser le biais de double ITCZ et ses liens avec les paramétrisations physiques du modèle [Popp et Bony, 2019], et ses conséquences sur les résultats de nos simulations.

3.2 LA QUESTION DE L'ÉVOLUTION DE L'OUTIL

3.2.1 Le potentiel de la modélisation des paléoclimats pour étudier la macroévolution

Modèles de diversification

Une question récurrente en biologie évolutive est celle des rôles respectifs joués par les facteurs abiotiques (pressions environnementales) et biotiques (inter-spécifiques, par exemple la prédation) sur la diversification du vivant, i.e. l'évolution dans le temps de l'équilibre entre spéciation et extinction [Benton, 2009]. Le forçage abiotique englobe les pressions environnementales, comme des changements tectoniques ou climatiques, qui altèrent les

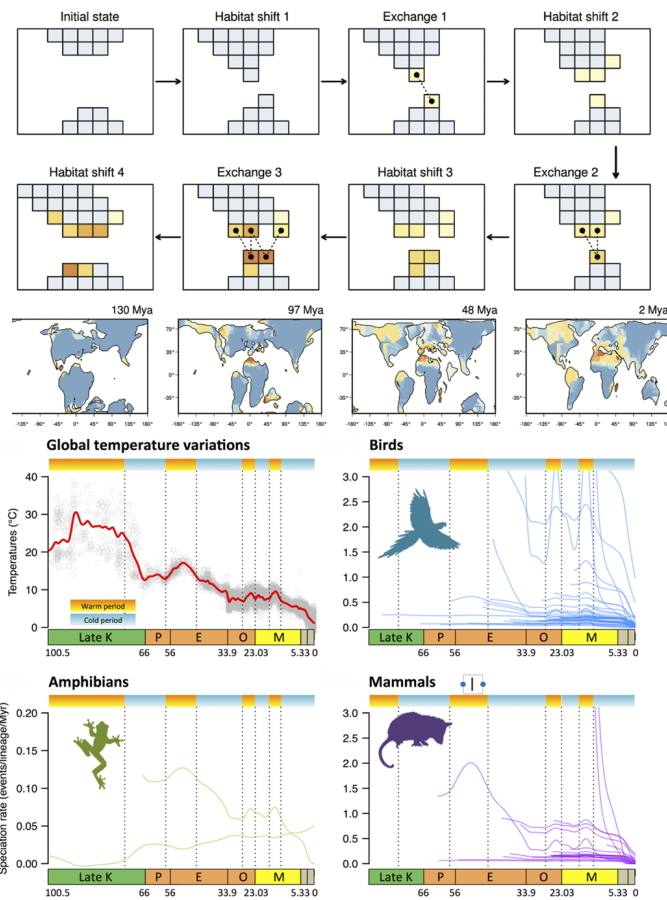


FIGURE 9 – Illustrations des principes de modèle de diversification spatiaux type SPLIT et des taux de spéciation obtenus à l'aide des modèles phylogénétiques bayésiens. D'après [Condamine et al. \[2019\]](#) et [Pellissier et al. \[2017\]](#)

taux de spéciation et d'extinction³. Jusqu'à peu, seules des méthodes corrélatives, soit par la comparaison du registre fossile avec des indicateurs paléoenvironnementaux, soit par la juxtaposition de phylogénies moléculaires avec des indicateurs de changements à grande échelle (comme les enregistrements de $\delta^{18}\text{O}$ benthique) permettaient de tester cette hypothèse (e.g. [Favre et al., 2014 ; Delsuc et al., 2004]).

L'augmentation dans les 10 dernières années du nombre de phylogénies moléculaires datées et disponibles a conduit les biologistes de l'évolution à élaborer des modèles statistiques qui, en utilisant des paramètres environnementaux continus dans le temps et des méthodes de maximum de vraisemblance, permettent de tester de façon plus robuste les liens entre changements environnementaux et taux de spéciation/extinction [Lewitus et Morlon, 2018 ; Condamine et al., 2013] inférés des phylogénies. L'utilisation de ce type de modèle a par exemple permis de suggérer que la surrection andine avait été le moteur principal de la diversification du groupe des orchidées dans les néotropiques au Miocène ou encore que les climats chauds du début du Cénozoïque avait été favorable à de fort taux de spéciation chez les tétrapodes 9, celle-ci ralentissant avec le refroidissement post-Eocène [Condamine et al., 2019 ; Pérez-Escobar et al., 2017]. D'autres méthodes (SPLIT : spatial diversification model of lineages through time) simulent spatialement l'impact de la fragmentation/reconnexion des milieux sur la spéciation et la dispersion, proposant ainsi des reconstructions dans le temps de la richesse spécifique de lignées entières, à l'échelle globale [Descombes et al., 2018]9. Leur forçage est alors un jeu de cartes de positions géographiques des continents, permettant de déterminer les périodes de connexions ou de séparation des différentes lignées, mais ne prenant pas en compte les multiples impacts de la paléogéographie sur le climat.

Les paramètres environnementaux

Au vu du travail présenté dans ce mémoire, une piste d'amélioration de ces nouvelles méthodes de macroévolution est l'inclusion dans les algorithmes de diversification de l'information paléoclimatique que peuvent fournir conjointement les modèles de climat forcés par des reconstructions paléogéographiques et les proxies paléoenvironnementaux. Les paramètres environnementaux utilisés dans les études sus-citées sont en effet des indicateurs très indirects des processus physiques à l'oeuvre sur le vivant ; le $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères benthiques, par exemple, est considéré comme un proxy fiable de la température globale surtout en l'absence de calotte, i.e. avant la transition Eocène-Oligocène. Le $\delta^{13}\text{C}$ quant à lui traduit plus les fluctuations de carbone entre les réservoirs atmosphériques et océaniques, dont les origines peuvent être multiples, que des changements paléoenvironnementaux précis. Une alternative à ce dernier proxy pourrait être d'utiliser le carbone organique dissous, qui donne une estimation du stock total de carbone dans le réservoir océanique [Paillard et Donnadieu, 2014] et *in extenso* de la productivité marine. Il y a cependant deux obstacles majeurs à surmonter pour implémenter de nouveaux paramètres environnementaux dans les modèles de diversification ; d'une part il faut réaliser une compilation de proxies paléoenvironnementaux pour tous les continents/bassins océaniques dans lesquelles les espèces considérées ont évolué ; d'autre part il faut s'affranchir du fait que les simulations numériques du climat aux longues échelles de temps sont *discrètes*, puisque considérées comme à l'équilibre pour un forçage et des conditions initiales données (voir [Sepulchre et al., 2020]). Il nous faut donc revoir notre façon d'appréhender la modélisation du climat aux longues échelles de temps.

3.2.2 Simuler un climat transitoire cénozoïque ?

Plaçons-nous dans un monde idéal, dans lequel nous nous affranchissons des contraintes de temps de calcul, de stockage, de problèmes de couplage entre des processus opérant à

3. On estime ainsi que la température peut altérer les taux de spéciation via son impact sur la productivité, le métabolisme, ou la taille des individus.

des échelles de temps très différentes. Dans ce monde, le modèle IPSL-CM5A2 (ou tout autre modèle système Terre) pourrait être couplé à un modèle de géodynamique permettant de reconstruire en continu la position des continents [Coltice et al., 2019; Müller et al., 2016] et la surrection et l'érosion de la topographie, mais aussi à un modèle de calotte de glace et à un modèle de cycle du carbone (GEOCLIM-like) pour simuler explicitement les concentrations en pCO₂ atmosphérique. On disposerait alors d'un "méta-modèle système Terre", qui pourrait être forcé en plus par les paramètres d'insolation (INcoming SOLAr radiATION) reconstruits pour le Cénozoïque Laskar et al. [2004]. Ce méta-ESM pourrait ainsi représenter à la fois les interactions à longues échelles de temps du climat et du cycle du carbone, via l'évolution de l'équilibre altération-dégazage en fonction d'une paléogéographie dynamique, mais aussi les réponses dynamiques de l'océan et de l'atmosphère à ces changements paléogéographiques, sur lesquels se surimposeraient le forçage orbital. Il permettrait de réaliser une simulation transitoire du climat pour l'ensemble du Cénozoïque, produisant un ensemble de reconstructions numériques paléoenvironnementales, spatialisées et continues dans le temps, qui pourrait être fourni aux modèles de diversification pour tester l'hypothèse du forçage abiotique de la biodiversité aux échelles de temps géologiques. Bien entendu, les écueils techniques, tout comme notre méconnaissance du fonctionnement de plusieurs processus-clés au sein de cette chaîne d'interaction des composantes lentes et rapides du système Terre, rendent très improbable, à moyen terme, le développement d'un tel modèle. Néanmoins, cette idée permet de poser un cadre de réflexion sur l'évolution de notre manière de simuler les paléoclimats aux longues échelles de temps. Par exemple, les simulations que nous -et tous les groupes de modélisation des climats anciens- réalisons avec les ESMs pour les climats anciens reposent sur le postulat d'un climat "à l'équilibre". On initialise généralement les ESMs avec des conditions initiales idéalisées (températures zonales, salinité homogène), on impose un forçage et des conditions aux limites issus de reconstructions, et on attend que le système atteigne un équilibre, que l'on diagnostique généralement par une dérive nulle des températures océaniques et/ou du forçage radiatif. La dépendance de ces simulations aux conditions initiales n'est que rarement explorée. La question de la réalité de cet équilibre et de sa pertinence pour représenter le forçage abiotique réel qui s'est exprimé sur les espèces non plus. Enfin, même en répétant l'exercice sur un nombre croissant de périodes géologiques (nous réalisons par exemple au laboratoire des simulations à 7 Ma, 10 Ma, 14 Ma, 30 Ma, 42Ma, 55 Ma, selon les paléogéographies disponibles⁴), on manque systématiquement le forçage "rapide" qu'est le forçage orbital. Je souhaite explorer les méthodes pour contourner ce problème. La première question à résoudre est celle de la granularité, spatiale et temporelle de l'information paléoenvironnementale nécessaire aux modèles de diversification et de biodiversité. Il semble que par construction, les modèles de diversification basés sur les phylogénies nécessitent des champs continus dans le temps. Les modèles de biodiversité basés sur l'algorithme SPLIT peuvent quant à eux travailler à intervalles temporels discrets, avec un pas de temps de quelques millions d'années (e.g. [Gaboriau et al., 2019]), mais nécessitent une information spatiale fine, car ils se basent sur les connexions/déconnexions géographiques pour établir des scénarios de dispersion et de radiation. Comment repenser notre façon de modéliser en fonction de ces contraintes? Une piste à explorer est celle des émulateurs statistiques de climat [Holden et al., 2019].

4. Paléogéographies pour lesquelles un exercice particulièrement périlleux est d'établir une cohérence chronologique, les reconstructions paléoaltimétriques pouvant être incohérentes d'une période à l'autre.

3.3 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

3.3.1 Quel(s) modèle(s) pour le passé, dans le futur ?

La réflexion exposé plus haut sur l'avenir des simulations paléoclimatiques doit également s'inscrire dans le paysage mouvant des modèles de l'IPSL, en perpétuelle évolution. Si les exercices CMIP sont des catalyseurs pour travailler à l'amélioration de l'ESM de l'IPSL et à la meilleure compréhension des différents processus dans chacun de ses compartiments, les nouvelles machines, qui promeuvent le parallélisme massif, et l'augmentation constante de la résolution spatiale, semblent de prime abord aller à contre-courant des besoins exprimés ci-dessus. Cependant, il existe également une dynamique pour maintenir des codes permettant de réaliser des simulations longues. IPSL-CM5A2 pourrait ainsi être remplacé, à terme, remplacé par la version rapide du modèle IPSL-CM6, en cours de développement sous l'impulsion de Myriam Khodri, à condition que les performances en terme de temps de calcul soient au rendez-vous. À moyen terme, le travail réalisé sur le nouveau coeur dynamique du modèle LMDz devrait conduire à l'obtention d'un ESM plus rapide, la grille icosahédrique de DYNAMICO impliquant une plus grande scalabilité du modèle. A long terme, le développement de ces différents ESM devra prendre en compte l'évolution des machines de calcul, qui vont vers de plus en plus de partitions "GPU", caractérisées par un grand nombre de processeurs mais une relativement faible mémoire allouée, alors que les codes climatiques, en créant de grands tableaux sont très "gourmands" en mémoire. Il existe en ce moment une dynamique pour amener les modèles de climat vers le machine learning, mais, là encore, l'adéquation avec les questions scientifiques proposés dans ce mémoire est à démontrer. Outre les projets précédemment exposés, je souhaite également explorer de nouveaux terrains.

Les échanges qui ont eu lieu cette année à Dijon lors des défis 3 et 4 de la prospective de l'INSU ont montré que le cloisonnement entre le "monde des modèles" et le "monde des données" était encore bien présent, alors que l'ensemble de la communauté d'accorde sur la nécessité de s'en affranchir et que les programmes incitent à plus de trans-disciplinarité. Je souhaite participer à cette dynamique en tissant des collaborations étroites qui me permettront de travailler personnellement sur l'acquisition de données, via par exemple des séjours dans des laboratoires effectuant de l'acquisition et analyse de données paléoenvironnementales. A court terme, j'aimerais exploiter ma collaboration avec les paléontologues et paléobotanistes du STRI pour aller sur le terrain et acquérir une meilleure connaissance dans l'étude de la végétation fossile. Je compte également bénéficier du rassemblement du personnel du LSCE sur un site unique pour initier des collaborations avec les spécialistes de la mesure des températures océaniques passées (M. Daeron ; W. Gray), afin de comprendre les enjeux et limites des méthodes induites, et de repenser la façon de les articuler avec les simulations numériques.

Les résultats et les perspectives de la thèse d'Anta-Clarisse Sarr, ainsi que les travaux et discussions avec mes collègues Y. Goddérès, Y. Donnadieu, et D. Paillard m'ont incité à conduire une réflexion sur les liens entre les plateformes continentales et les cycles biogéochimiques au cours des 100 derniers millions d'années. En l'état, cette réflexion est encore à ses débuts, mais conduit à constater que si les mouvements des grandes masses continentales et les surrections ont bien été prises en compte dans la quantification des termes sources et puits du cycle du carbone, la contribution des changements de la répartition des masses émergées dans les tropiques, tout comme celle de la modification du routage des grands fleuves, est quant à elle assez peu explorée. Quelles sont les conséquences, en terme de flux de carbone, de l'immersion de la plateforme de la Sonde il y a 400,000 ans ? Quelles sont celles du maintien de l'immersion du bassin amazonien (Pebas lake) pendant 3 millions d'années au Miocène moyen ? J'envisage de travailler sur ces deux questions à l'aide du couplage de la modélisation et des enregistrements isotopiques.

Je vais également continuer à quantifier le rôle de la topographie sur la dynamique climatique entre le Crétacé et le Cénozoïque. En particulier, j'aimerais continuer à explorer les liens entre topographie et routage de l'eau douce, travail initié lors du stage de Master 2 de Julia Bres. Localiser les plus grands débits fluviaux d'eau au cours des temps géologiques reste un défi, mais les informations géomorphologiques permettent de faire des premiers tests. Ainsi, une publication récente dans *Nature* a montré l'existence d'un grand fleuve irriguant tout le Sahara occidental à l'Holocène, et alimentant l'Atlantique subtropical au niveau de l'actuel Mauritanie. Ce type d'apport d'eau douce a très certainement altéré les masses d'eau Atlantique avec des conséquences à déterminer. Ce type d'approche peut être extrapolé pour plusieurs périodes-clés du Cénozoïque et ouvre des perspectives aussi bien en dynamique du climat que sur les aspects biogéochimiques, via des variations potentiellement importantes d'apports de nutriments à l'océan côtier.

Enfin, je souhaite prendre du recul sur l'interdisciplinarité en biogéosciences, et en proposer une analyse par des méthodes propres aux sciences humaines et sociales. J'ai commencé, à la faveur du travail de Master de Zoé Lehmann, à documenter l'histoire de la création du LSCE à la fin des années 90. Ce travail, issu au départ de discussions avec mon ami historien Fabrice Langrognet [Langrognet, 2019], qui me questionnait sur les méthodes d'archives dans les laboratoires scientifiques, s'est transformé en une réflexion sur les moteurs des recherches interdisciplinaires en géosciences. L'histoire du LSCE, qui implique plusieurs acteurs institutionnels aux méthodes et capacités de pilotage différentes, est aussi l'histoire de la mise en place d'un institut au sein d'une fédération, l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), de façon contemporaine à celle de grands programmes internationaux sur l'étude du changement global (IGBP, WCRP, etc.). En quoi les orientations thématiques des programmes internationaux ont-elles influencé la structuration du LSCE? Comment les personnels se sont emparés -ou non- des sujets liés au changement global? Comment cette orientation a influé sur les activités liées aux questions de géosciences existantes avant les programmes? Voilà les questions que je souhaiterais aborder dans le cadre de cette enquête historique. Enfin, mon travail à la frontière des géosciences et de la biologie m'invite également à intégrer une réflexion sur la façon dont l'interdisciplinarité trouve sa réalisation dans la recherche, c'est-à-dire en particulier dans les articles scientifiques. Sur ce point, j'ai commencé à élaborer une analyse de la mise à disposition et de la publication d'une base de données de champs climatiques et paléoclimatiques à très haute résolution [Hijmans et al., 2005]. Je vais m'attacher à comprendre son utilisation massive (>16000 citations) par la communauté des biologistes, afin de développer une analyse critique de la compartimentation des disciplines et de l'interdisciplinarité de surface, en relevant les risques qu'elle comporte.

RÉFÉRENCES

- Lunt, D. J., F. Bragg, W.-L. Chan, D. K. Hutchinson, J.-B. Ladant, I. Niezgodzki, S. Steinig, Z. Zhang, J. Zhu, A. Abe-Ouchi, A. M. de Boer, H. K. Coxall, Y. Donnadieu, G. Knorr, P. M. Langebroek, G. Lohmann, C. J. Poulsen, P. Sepulchre, J. Tierney, P. J. Valdes, T. Dunkley Jones, C. J. Hollis, M. Huber et B. L. Otto-Bliesner [2020], “DeepMIP : Model Intercomparison of Early Eocene Climatic Optimum (EECO) Large-Scale Climate Features and Comparison with Proxy Data”, *Climate of the Past Discussions* [jan. 2020], p. 1-27, ISSN : 1814-9324, DOI : <https://doi.org/10.5194/cp-2019-149>.
- Sepulchre, P., A. Caubel, J.-B. Ladant, L. Bopp, O. Boucher, P. Braconnot, P. Brockmann, A. Cozic, Y. Donnadieu, V. Estella-Perez, C. Ethé, F. Fluteau, M.-A. Foujols, G. Gastineau, J. Ghattas, D. Hauglustaine, F. Hourdin, M. Kageyama, M. Khodri, O. Marti, Y. Meurdesoif, J. Mignot, A.-C. Sarr*, J. Servonnat, D. Swingedouw, S. Szopa et D. Tardif [2020], “IPSL-CM5A2. An Earth System Model Designed for Multi-Millennial Climate Simulations”, *Geoscientific Model Development Discussions* [jan. 2020], p. 1-57, ISSN : 1991-959X, DOI : <https://doi.org/10.5194/gmd-2019-332>.
- Tan, N., C. Contoux, G. Ramstein, Y. Sun, C. Dumas, P. Sepulchre et Z. Guo [2020], “Modeling a Modern-like pCO₂ Warm Period (Marine Isotope Stage KM5c) with Two Versions of an Institut Pierre Simon Laplace Atmosphere–Ocean Coupled General Circulation Model”, *Climate of the Past*, 16, 1 [jan. 2020], p. 1-16, ISSN : 1814-9324, DOI : <https://doi.org/10.5194/cp-16-1-2020>.
- Bernal, R., C. D. Bacon, H. Balslev, C. Hoorn, S. J. Boursat, H. Tuomisto, S. Salamanca, M. T. van Manen, I. Romero, P. Sepulchre et A. Antonelli [2019], “Could Coastal Plants in Western Amazonia Be Relicts of Past Marine Incursions?”, *Journal of Biogeography*, 46, 8, p. 1749-1759, ISSN : 1365-2699, DOI : [10.1111/jbi.13560](https://doi.org/10.1111/jbi.13560).
- Botsyun*, S., P. Sepulchre, Y. Donnadieu, C. Risi, A. Licht et J. K. C. Rugenstein [2019a], “Response to Comment on “Revised Paleohydrology Data Show Low Tibetan Plateau Elevation during the Eocene””, *Science*, 365, 6459 [sept. 2019], eaax8990, ISSN : 0036-8075, 1095-9203, DOI : [10.1126/science.aax8990](https://doi.org/10.1126/science.aax8990).
- [2019b], “Revised Paleohydrology Data Show Low Tibetan Plateau Elevation during the Eocene”, *Science*, 363, 6430 [mar. 2019], eaaq1436, ISSN : 0036-8075, 1095-9203, DOI : [10.1126/science.aaq1436](https://doi.org/10.1126/science.aaq1436).
- Coltice, N., L. Husson, C. Faccenna et M. Arnould [2019], “What Drives Tectonic Plates?”, *Science Advances*, 5, 10 [oct. 2019], eaax4295, ISSN : 2375-2548, DOI : [10.1126/sciadv.aax4295](https://doi.org/10.1126/sciadv.aax4295).
- Condamine, F. L., J. Rolland et H. Morlon [2019], “Assessing the Causes of Diversification Slowdowns : Temperature-dependent and Diversity-dependent Models Receive Equivalent Support”, *Ecology Letters*, 22, 11 [nov. 2019], sous la dir. de R. Etienne, p. 1900-1912, ISSN : 1461-023X, 1461-0248, DOI : [10.1111/ele.13382](https://doi.org/10.1111/ele.13382).
- Gaboriau, T., C. Albouy, P. Descombes, D. Mouillot, L. Pellissier et F. Leprieur [2019], “Ecological Constraints Coupled with Deep-Time Habitat Dynamics Predict the Latitudinal Diversity Gradient in Reef Fishes”, *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences*, 286, 1911 [sept. 2019], p. 20191506, DOI : [10.1098/rspb.2019.1506](https://doi.org/10.1098/rspb.2019.1506).
- Holden, P. B., N. R. Edwards, T. F. Rangel, E. B. Pereira, G. T. Tran et R. D. Wilkinson [2019], “PALEO-PGEM v1.0 : A Statistical Emulator of Pliocene-Pleistocene Climate”, *Geoscientific Model Development*, 12, 12 [déc. 2019], p. 5137-5155, ISSN : 1991-9603, DOI : [10.5194/gmd-12-5137-2019](https://doi.org/10.5194/gmd-12-5137-2019).
- Husson, L., F. C. Boucher, A.-C. Sarr*, P. Sepulchre et S. Y. Cahyarini [2019], “Evidence of Sundaland’s Subsidence Requires Revisiting Its Biogeography”, *Journal of Biogeography* [déc. 2019], ISSN : 1365-2699, DOI : [10.1111/jbi.13762](https://doi.org/10.1111/jbi.13762).
- Langrognet, F. [2019], *A microhistory of migrants and their identifications in a Paris tenement (1882-1932)*, thèse de doct., University of Cambridge.

- Popp, M. et S. Bony [2019], "Stronger zonal convective clustering associated with a wider tropical rain belt", *Nature communications*, 10, 1, p. 1-12.
- Ramstein, G., Y. Godderis, Y. Donnadieu, P. Sepulchre, F. Fluteau, Z. Zhang, R. Zhang, B. Su, D. Jiang, M. Schuster et J. Besse [2019], "Some Illustrations of Large Tectonically Driven Climate Changes in Earth History", *Tectonics*, 38, 12, p. 4454-4464, ISSN : 1944-9194, DOI : [10.1029/2019TC005569](https://doi.org/10.1029/2019TC005569).
- Sarr*, A.-C., L. Husson, P. Sepulchre, A.-M. Pastier, K. Pedoja, M. Elliot, C. Arias-Ruiz, T. Solihuddin, S. Aribowo et Susilohadi [2019a], "Subsiding Sundaland : REPLY", *Geology*, 47, 7 [juil. 2019], e470-e470, ISSN : 0091-7613, DOI : [10.1130/G46493Y.1](https://doi.org/10.1130/G46493Y.1).
- [2019b], "Subsiding Sundaland", *Geology*, DOI : [10.1130/G45629.1](https://doi.org/10.1130/G45629.1).
- Sarr*, A.-C., P. Sepulchre et L. Husson [2019c], "Impact of the Sunda Shelf on the Climate of the Maritime Continent", *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 124, ja [fév. 2019], ISSN : 2169-897X, DOI : [10.1029/2018JD029971](https://doi.org/10.1029/2018JD029971).
- Szopa, S., R. Thiéblemont, S. Bekki, S. Botsyun* et P. Sepulchre [2019], "Role of the Stratospheric Chemistry–Climate Interactions in the Hot Climate Conditions of the Eocene", *Climate of the Past*, 15, 4 [juil. 2019], p. 1187-1203, ISSN : 1814-9324, DOI : <https://doi.org/10.5194/cp-15-1187-2019>.
- Valdes, P. J., D. Lin, A. Farnsworth, R. A. Spicer, S.-H. Li et S. Tao [2019], "Comment on "Revised paleoaltimetry data show low Tibetan Plateau elevation during the Eocene"", *Science*, 365, 6459, eaax8474.
- Vérard, C. [2019], "Plate Tectonic Modelling : Review and Perspectives", *Geological Magazine*, 156, 2 [fév. 2019], p. 208-241, ISSN : 0016-7568, 1469-5081, DOI : [10.1017/S0016756817001030](https://doi.org/10.1017/S0016756817001030).
- Descombes, P., T. Gaboriau, C. Albouy, C. Heine, F. Leprieur et L. Pellissier [2018], "Linking Species Diversification to Palaeo-Environmental Changes : A Process-Based Modelling Approach", *Global Ecology and Biogeography*, 27, 2, p. 233-244, ISSN : 1466-8238, DOI : [10.1111/geb.12683](https://doi.org/10.1111/geb.12683).
- Hearing, T. W., T. H. Harvey, M. Williams, M. J. Leng, A. L. Lamb, P. R. Wilby, S. E. Gabbott, A. Pohl et Y. Donnadieu [2018], "An early Cambrian greenhouse climate", *Science advances*, 4, 5, eaar5690.
- Krinner, G. et M. G. Flanner [2018], "Striking Stationarity of Large-Scale Climate Model Bias Patterns under Strong Climate Change", *Proceedings of the National Academy of Sciences* [sept. 2018], p. 201807912, ISSN : 0027-8424, 1091-6490, DOI : [10.1073/pnas.1807912115](https://doi.org/10.1073/pnas.1807912115).
- Lewitus, E. et H. Morlon [2018], "Detecting Environment-Dependent Diversification From Phylogenies : A Simulation Study and Some Empirical Illustrations", *Systematic Biology*, 67, 4 [juil. 2018], p. 576-593, ISSN : 1063-5157, DOI : [10.1093/sysbio/syx095](https://doi.org/10.1093/sysbio/syx095).
- Maffre, P., J.-B. Ladant, Y. Donnadieu, P. Sepulchre et Y. Goddérés [2018], "The Influence of Orography on Modern Ocean Circulation", *Climate Dynamics*, 50, 3-4 [fév. 2018], p. 1277-1289, ISSN : 0930-7575, 1432-0894, DOI : [10.1007/s00382-017-3683-0](https://doi.org/10.1007/s00382-017-3683-0).
- Oreskes, N. [2018], "From Continental Drift to Plate Tectonics", in *Plate Tectonics : An Insider's History Of The Modern Theory Of The Earth*, Naomie Oreskes with Homer Le Grand, CRC Press, p. 3-29, ISBN : 978-0-429-96683-5.
- Sepulchre, P. [2018], "La Conjugaison du climat", in *Métamorphoses*, Éditions de la Villette, Les Cahiers de l'École de Blois, 16, p. 116, ISBN : 978-2-37556-006-8.
- Su, B., D. Jiang, R. Zhang, P. Sepulchre et G. Ramstein [2018], "Difference between the North Atlantic and Pacific Meridional Overturning Circulation in Response to the Uplift of the Tibetan Plateau", *Climate of the Past*, 14, 6 [juin 2018], p. 751-762, ISSN : 1814-9332, DOI : [10.5194/cp-14-751-2018](https://doi.org/10.5194/cp-14-751-2018).
- Boyce, C. K. et J.-E. Lee [2017], "Plant Evolution and Climate Over Geological Timescales", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 45, 1 [août 2017], p. 61-87, ISSN : 0084-6597, 1545-4495, DOI : [10.1146/annurev-earth-063016-015629](https://doi.org/10.1146/annurev-earth-063016-015629).

- Jaramillo, C., C. Montes, A. Cardona, D. Silvestro, A. Antonelli et C. D. Bacon [2017], "Comment (1) on "Formation of the Isthmus of Panama" by O'Dea et al." *Science advances*, 3, 6, e1602321.
- Pellissier, L., C. Heine, D. F. Rosauer et C. Albouy [2017], "Are Global Hotspots of Endemic Richness Shaped by Plate Tectonics?", *Biological Journal of the Linnean Society*, p. 15.
- Pérez-Escobar, O. A., G. Chomicki, F. L. Condamine, A. P. Karremans, D. Bogarín, N. J. Matzke, D. Silvestro et A. Antonelli [2017], "Recent Origin and Rapid Speciation of Neotropical Orchids in the World's Richest Plant Biodiversity Hotspot", *New Phytologist*, 215, 2, p. 891-905, ISSN : 1469-8137, DOI : [10.1111/nph.14629](https://doi.org/10.1111/nph.14629).
- Sosef, M. S. M., G. Dauby, A. Blach-Overgaard, X. van der Burgt, L. Catarino, T. Damen, V. Deblauwe, S. Dessein, J. Dransfield, V. Droissart, M. C. Duarte, H. Engledow, G. Fadeur, R. Figueira, R. E. Gereau, O. J. Hardy, D. J. Harris, J. de Heij, S. Janssens, Y. Klomberg, A. C. Ley, B. A. Mackinder, P. Meerts, J. L. van de Poel, B. Sonké, T. Stévar, P. Stoffelen, J.-C. Svenning, P. Sepulchre, R. Zaiss, J. J. Wieringa et T. L. P. Couvreur [2017], "Exploring the Floristic Diversity of Tropical Africa", *BMC Biology*, 15, 1 [mar. 2017], p. 15, ISSN : 1741-7007, DOI : [10.1186/s12915-017-0356-8](https://doi.org/10.1186/s12915-017-0356-8).
- Tan, N., G. Ramstein, C. Dumas, C. Contoux, J.-B. Ladant, P. Sepulchre, Z. Zhang et S. De Schepper [2017], "Exploring the MIS M2 Glaciation Occurring during a Warm and High Atmospheric CO₂ Pliocene Background Climate", *Earth and Planetary Science Letters* [mai 2017], ISSN : 0012821X, DOI : [10.1016/j.epsl.2017.04.050](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.04.050).
- Botsyun*, S., P. Sepulchre, C. Risi et Y. Donnadiou [2016], "Impacts of Tibetan Plateau Uplift on Atmospheric Dynamics and Associated Precipitation d18O", *Climate of the Past*, 12, 6 [juin 2016], p. 1401-1420, ISSN : 1814-9332, DOI : [10.5194/cp-12-1401-2016](https://doi.org/10.5194/cp-12-1401-2016).
- Dauby, G., R. Zaiss, A. Blach-Overgaard, L. Catarino, T. Damen, V. Deblauwe, S. Dessein, J. Dransfield, V. Droissart, M. C. Duarte, H. Engledow, G. Fadeur, R. Figueira, R. E. Gereau, O. J. Hardy, D. J. Harris, J. de Heij, S. Janssens, Y. Klomberg, A. C. Ley, B. A. Mackinder, P. Meerts, J. L. van de Poel, B. Sonké, M. S. M. Sosef, T. Stévar, P. Stoffelen, J.-C. Svenning, P. Sepulchre, X. van der Burgt, J. J. Wieringa et T. L. P. Couvreur [2016], "RAINBIO : A Mega-Database of Tropical African Vascular Plants Distributions", *PhytoKeys*, 74 [nov. 2016], p. 1-18, ISSN : 1314-2011, DOI : [10.3897/phytokeys.74.9723](https://doi.org/10.3897/phytokeys.74.9723).
- McElwain, J. C., C. Yiotis et T. Lawson [2016], "Using modern plant trait relationships between observed and theoretical maximum stomatal conductance and vein density to examine patterns of plant macroevolution", *New Phytologist*, 209, 1, p. 94-103.
- Müller, R. D., M. Seton, S. Zahirovic, S. E. Williams, K. J. Matthews, N. M. Wright, G. E. Shephard, K. T. Maloney, N. Barnett-Moore, M. Hosseinpour, D. J. Bower et J. Cannon [2016], "Ocean Basin Evolution and Global-Scale Plate Reorganization Events Since Pangea Breakup", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 44, 1 [juin 2016], p. 107-138, ISSN : 0084-6597, 1545-4495, DOI : [10.1146/annurev-earth-060115-012211](https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060115-012211).
- O'Dea, A., H. A. Lessios, A. G. Coates, R. I. Eytan, S. A. Restrepo-Moreno, A. L. Cione, L. S. Collins, A. De Queiroz, D. W. Farris, R. D. Norris et al. [2016], "Formation of the Isthmus of Panama", *Science advances*, 2, 8, e1600883.
- Port, U., M. Claussen et V. Brovkin [2016], "Radiative Forcing and Feedback by Forests in Warm Climates : A Sensitivity Study", *Earth System Dynamics*, 7, 3 [juil. 2016], p. 535-547, ISSN : 2190-4987, DOI : [10.5194/esd-7-535-2016](https://doi.org/10.5194/esd-7-535-2016).
- Sepulchre, P. [2016], "Links between Solid Earth, Climate Changes, and Biodiversity through Time : Insights from the Cenozoic", in *Climatic and Environmental Challenges : Learning from the Horn of Africa*, sous la dir. de D. Ambrosetti, J.-R. Boisserie, D. Ayenachew et T. Guindeuil, Centre français des études éthiopiennes, ISBN : 978-2-8218-7300-1, DOI : [10.4000/books.cfee.359](https://doi.org/10.4000/books.cfee.359).
- Sepulchre, P. et V. Masson-Delmotte [2016], "L'histoire de l'englacement du Groenland", in *Le Groenland Climat, Écologie, Société*, CNRS Editions, Paris, p. 21-25.

- Bacon, C. D., D. Silvestro, C. Jaramillo, B. T. Smith, P. Chakrabarty et A. Antonelli [2015], "Biological Evidence Supports an Early and Complex Emergence of the Isthmus of Panama", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 19, p. 6110-6115.
- Ladant, J.-B. [2015], *Interactions Climat-Calotte Durant La Greenhouse Crétacé-Paléogène (120-34 Ma) : Influence de La Paléogéographie et Du CO₂ Atmosphérique*, Thesis, Université Paris-Saclay (ComUE).
- Masson-Delmotte, V., P. Braconnot, M. Kageyama et P. Sepulchre [2015], "Qu'apprend-on des grands changements climatiques passés?", *La Météorologie*, 8, 88, p. 25, ISSN : 0026-1181, DOI : [10.4267/2042/56359](https://doi.org/10.4267/2042/56359).
- Vérard, C., C. Hochard, P. O. Baumgartner, G. M. Stampfli et M. Liu [2015], "3D Palaeogeographic Reconstructions of the Phanerozoic versus Sea-Level and Sr-Ratio Variations", *Journal of Palaeogeography*, 4, 1 [jan. 2015], p. 64-84, ISSN : 20953836, DOI : [10.3724/SP.J.1261.2015.00068](https://doi.org/10.3724/SP.J.1261.2015.00068).
- Zhang, X., H. Liu et M. Zhang [2015], "Double ITCZ in Coupled Ocean-Atmosphere Models : From CMIP₃ to CMIP₅", *Geophysical Research Letters*, 42, 20, p. 8651-8659, ISSN : 1944-8007, DOI : [10.1002/2015GL065973](https://doi.org/10.1002/2015GL065973).
- Chaboureaud, A.-C., P. Sepulchre, Y. Donnadiou et A. Franc [2014], "Tectonic-Driven Climate Change and the Diversification of Angiosperms", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 39 [sept. 2014], p. 14066-14070, ISSN : 0027-8424, 1091-6490, DOI : [10.1073/pnas.1324002111](https://doi.org/10.1073/pnas.1324002111).
- Favre, A., M. Päckert, S. U. Pauls, S. C. Jähnig, D. Uhl, I. Michalak et A. N. Muellner-Riehl [2014], "The Role of the Uplift of the Qinghai-Tibetan Plateau for the Evolution of Tibetan Biotas", *Biological Reviews* [avr. 2014], n/a-n/a, ISSN : 1469-185X, DOI : [10.1111/brv.12107](https://doi.org/10.1111/brv.12107).
- Goddéris, Y., Y. Donnadiou, G. Le Hir, V. Lefebvre et E. Nardin [2014], "The Role of Palaeogeography in the Phanerozoic History of Atmospheric CO₂ and Climate", *Earth-Science Reviews*, 128 [jan. 2014], p. 122-138, ISSN : 0012-8252, DOI : [10.1016/j.earscirev.2013.11.004](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.11.004).
- Ladant, J.-B., Y. Donnadiou, V. Lefebvre et C. Dumas [2014], "The Respective Role of Atmospheric Carbon Dioxide and Orbital Parameters on Ice Sheet Evolution at the Eocene-Oligocene Transition : Ice Sheet Evolution at the EOT", *Paleoceanography*, 29, 8 [août 2014], p. 810-823, ISSN : 08838305, DOI : [10.1002/2013PA002593](https://doi.org/10.1002/2013PA002593).
- Paillard, D. et Y. Donnadiou [2014], "A 100 Myr History of the Carbon Cycle Based on the 400 Kyr Cycle in Marine $\delta^{13}\text{C}$ Benthic Records", *Paleoceanography*, 29, 12, p. 1249-1255, ISSN : 1944-9186, DOI : [10.1002/2014PA002693](https://doi.org/10.1002/2014PA002693).
- Sepulchre, P., T. Arsouze, Y. Donnadiou, J.-C. Dutay, C. Jaramillo, J. Le Bras, E. Martin, C. Montes et A. J. Waite [2014], "Consequences of Shoaling of the Central American Seaway Determined from Modeling Nd Isotopes", *Paleoceanography*, 29, 3 [mar. 2014], 2013PA002501, ISSN : 1944-9186, DOI : [10.1002/2013PA002501](https://doi.org/10.1002/2013PA002501).
- Vrac, M. et P. Friederichs [2014], "Multivariate—Intervariable, Spatial, and Temporal—Bias Correction", *Journal of Climate*, 28, 1 [sept. 2014], p. 218-237, ISSN : 0894-8755, DOI : [10.1175/JCLI-D-14-00059.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00059.1).
- Coates, A. G. et R. F. Stallard [2013], "How old is the Isthmus of Panama?", *Bulletin of Marine Science*, 89, 4, p. 801-813.
- Condamine, F. L., J. Rolland et H. Morlon [2013], "Macroevolutionary Perspectives to Environmental Change", *Ecology Letters*, 16 [mai 2013], sous la dir. de H. Maherali, p. 72-85, ISSN : 1461023X, DOI : [10.1111/ele.12062](https://doi.org/10.1111/ele.12062).
- Contoux, C., A. Jost, G. Ramstein, P. Sepulchre, G. Krinner et M. Schuster [2013], "Megalake Chad Impact on Climate and Vegetation during the Late Pliocene and the Mid-Holocene", *Climate of the Past*, 9, 4 [juil. 2013], p. 1417-1430, ISSN : 1814-9332, DOI : [10.5194/cp-9-1417-2013](https://doi.org/10.5194/cp-9-1417-2013).
- Dufresne, J.-L., M.-A. Foujols, S. Denvil, A. Caubel, O. Marti, O. Aumont, Y. Balkanski, S. Bekki, H. Bellenger, R. Benshila et al. [2013], "Climate change projections using the IPSL-CM₅ Earth System Model : from CMIP₃ to CMIP₅", *Climate Dynamics*, 40, 9-10, p. 2123-2165.

- Hamon*, N., P. Sepulchre, V. Lefebvre et G. Ramstein [2013], "The Role of Eastern Tethys Seaway Closure in the Middle Miocene Climatic Transition (ca. 14 Ma)", *Climate of the Past*, 9, 6 [nov. 2013], p. 2687-2702, ISSN : 1814-9332, DOI : [10.5194/cp-9-2687-2013](https://doi.org/10.5194/cp-9-2687-2013).
- Lefebvre, V., Y. Donnadieu, Y. Goddéris, F. Fluteau et L. Hubert-Th ou [2013], "Was the Antarctic Glaciation Delayed by a High Degassing Rate during the Early Cenozoic?", *Earth and Planetary Science Letters*, 371-372 [juin 2013], p. 203-211, ISSN : 0012821X, DOI : [10.1016/j.epsl.2013.03.049](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.03.049).
- Yin, L., R. Fu, E. Shevliakova et R. E. Dickinson [2013], "How Well Can CMIP5 Simulate Precipitation and Its Controlling Processes over Tropical South America?", *Climate Dynamics*, 41, 11 [d c. 2013], p. 3127-3143, ISSN : 1432-0894, DOI : [10.1007/s00382-012-1582-y](https://doi.org/10.1007/s00382-012-1582-y).
- Chaboureaud, A.-C., Y. Donnadieu, P. Sepulchre, C. Robin, F. Guillocheau et S. Rohais [2012], "The Aptian Evaporites of the South Atlantic : A Climatic Paradox?", *Climate of the Past*, 8, 3 [juin 2012], p. 1047-1058, ISSN : 1814-9332, DOI : [10.5194/cp-8-1047-2012](https://doi.org/10.5194/cp-8-1047-2012).
- Hamon*, N., P. Sepulchre, Y. Donnadieu, A.-J. Henrot, L. François, J.-J. Jaeger et G. Ramstein [2012], "Growth of Subtropical Forests in Miocene Europe : The Roles of Carbon Dioxide and Antarctic Ice Volume", *Geology*, 40, 6 [juin 2012], p. 567-570, ISSN : 0091-7613, DOI : [10.1130/G32990.1](https://doi.org/10.1130/G32990.1).
- Krinner, G., A.-M. L zine, P. Braconnot, P. Sepulchre, G. Ramstein, C. Grenier et I. Gouttevin [2012], "A Reassessment of Lake and Wetland Feedbacks on the North African Holocene Climate", *Geophysical Research Letters*, 39, 7 [avr. 2012], n/a-n/a, ISSN : 00948276, DOI : [10.1029/2012GL050992](https://doi.org/10.1029/2012GL050992).
- Lefebvre, V., Y. Donnadieu, P. Sepulchre, D. Swingedouw et Z.-S. Zhang [2012], "Deciphering the Role of Southern Gateways and Carbon Dioxide on the Onset of the Antarctic Circumpolar Current", *Paleoceanography*, 27, 4 [d c. 2012], n/a-n/a, ISSN : 08838305, DOI : [10.1029/2012PA002345](https://doi.org/10.1029/2012PA002345).
- Montes, C., G. Bayona, A. Cardona, D. M. Buchs, C. A. Silva, S. Mor n, N. Hoyos, D. A. Ramírez, C. A. Jaramillo et V. Valencia [2012], "Arc-Continent Collision and Orocline Formation : Closing of the Central American Seaway", *Journal of Geophysical Research*, 117, B4 [avr. 2012], ISSN : 0148-0227, DOI : [10.1029/2011JB008959](https://doi.org/10.1029/2011JB008959).
- Sepulchre, P. [2012], "Les données majeures du climat de la fin de l'ère tertiaire", in *Des climats et des hommes*, Recherches, La Découverte, p. 43-56, ISBN : 978-2-7071-6771-2.
- Wilson, D. S., S. S. Jamieson, P. J. Barrett, G. Leitchenkov, K. Gohl et R. D. Larter [2012], "Antarctic topography at the Eocene-Oligocene boundary", *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 335, p. 24-34.
- Herbert, C., D. Paillard, M. Kageyama et B. Dubrulle [2011], "Present and Last Glacial Maximum climates as states of maximum entropy production", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 657, p. 1059-1069.
- Jeandel, C., B. Peucker-Ehrenbrink, M. T. Jones, C. R. Pearce, E. H. Oelkers, Y. Goddéris, F. Lacan, O. Aumont et T. Arsouze [2011], "Ocean margins : The missing term in oceanic element budgets?", *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 92, 26, p. 217-218.
- Le Hir, G., Y. Donnadieu, Y. Goddéris, B. Meyer-Berthaud, G. Ramstein et R. C. Blakey [2011], "The climate change caused by the land plant invasion in the Devonian", *Earth and Planetary Science Letters*, 310, 3-4, p. 203-212.
- Nardin, E., Y. Goddéris, Y. Donnadieu, G. L. Hir, R. C. Blakey, E. Puc at et M. Aretz [2011], "Modeling the early Paleozoic long-term climatic trend", *Bulletin*, 123, 5-6, p. 1181-1192.
- Sepulchre, P. [2011], "Paleoclimatology And Paleoecology", *Encyclopedia Life Support Systems (UNESCO-EOLSS)*, Evolution of Phylogenetic Tree of Life, p. 9.
- Sepulchre, P., L. C. Sloan et F. Fluteau [2011], "Modelling the Response of Amazonian Climate to the Uplift of the Andean Mountain Range", in *Amazonia : Landscape and Species Evolution*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 211-222, ISBN : 978-1-4443-0640-8, DOI : [10.1002/9781444306408.ch13](https://doi.org/10.1002/9781444306408.ch13).

- Boyce, C. K., J.-E. Lee, T. S. Feild, T. J. Brodribb et M. A. Zwieniecki [2010], "Angiosperms Helped Put the Rain in the Rainforests : The Impact of Plant Physiological Evolution on Tropical Biodiversity ¹", *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 97, 4 [déc. 2010], p. 527-540, ISSN : 0026-6493, DOI : [10.3417/2009143](https://doi.org/10.3417/2009143).
- Davin, E. L. et N. de Noblet-Ducoudré [2010], "Climatic Impact of Global-Scale Deforestation : Radiative versus Nonradiative Processes", *Journal of Climate*, 23, 1, p. 97-112.
- Edwards, P. N. [2010], *A vast machine : Computer models, climate data, and the politics of global warming*, Mit Press.
- Marti, O., P. Braconnot, J.-L. Dufresne, J. Bellier, R. Benshila, S. Bony, P. Brockmann, P. Cadule, A. Caubel, F. Codron, N. de Noblet, S. Denvil, L. Fairhead, T. Fichefet, M.-A. Foujols, P. Friedlingstein, H. Goosse, J.-Y. Grandpeix, E. Guilyardi, F. Hourdin, A. Idelkadi, M. Kageyama, G. Krinner, C. Lévy, G. Madec, J. Mignot, I. Musat, D. Swingedouw et C. Talandier [2010], "Key Features of the IPSL Ocean Atmosphere Model and Its Sensitivity to Atmospheric Resolution", *Climate Dynamics*, 34, 1 [jan. 2010], p. 1-26, ISSN : 1432-0894, DOI : [10.1007/s00382-009-0640-6](https://doi.org/10.1007/s00382-009-0640-6).
- Pennington, R. T. et C. W. Dick [2010], "Diversification of the Amazonian flora and its relation to key geological and environmental events : a molecular perspective.", in Blackwell.
- Poulsen, C. J., T. A. Ehlers et N. Insel [2010], "Onset of convective rainfall during gradual late Miocene rise of the central Andes", *science*, 328, 5977, p. 490-493.
- Risi, C., S. Bony, F. Vimeux et J. Jouzel [2010], "Water-stable isotopes in the LMDZ4 general circulation model : Model evaluation for present-day and past climates and applications to climatic interpretations of tropical isotopic records", *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 115, D12.
- Sepulchre, P., D. Jolly, S. Ducrocq, Y. Chaimanee, J.-J. Jaeger et A. Raillard [2010], "Mid-Tertiary Paleoenvironments in Thailand : Pollen Evidence", *Climate of the Past*, 6, 4 [juil. 2010], p. 461-473, ISSN : 1814-9332, DOI : [10.5194/cp-6-461-2010](https://doi.org/10.5194/cp-6-461-2010).
- Benton, M. J. [2009], "The Red Queen and the Court Jester : species diversity and the role of biotic and abiotic factors through time", *science*, 323, 5915, p. 728-732.
- Boyce, C. K., T. J. Brodribb, T. S. Feild et M. A. Zwieniecki [2009], "Angiosperm leaf vein evolution was physiologically and environmentally transformative", *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences*, 276, 1663, p. 1771-1776.
- Dufresne, J. et J. Ghattas [2009], *Description du schema de la couche limite turbulente et l'interface avec la surface planétaire dans LMDZ*, rapp. tech., Tech. rep., LMDZ, Paris, France.
- Newkirk, D. R. et E. E. Martin [2009], "Circulation through the Central American Seaway during the Miocene carbonate crash", *Geology*, 37, 1, p. 87-90.
- Schuster, M., P. Düringer, J.-F. Ghienne, C. Roquin, P. Sepulchre, A. Moussa, A.-E. Lebatard, H. T. Mackaye, A. Likius, P. Vignaud et M. Brunet [2009], "Chad Basin : Paleoenvironments of the Sahara since the Late Miocene", *Comptes Rendus Geoscience*, 341, 8-9 [août 2009], p. 603-611, ISSN : 16310713, DOI : [10.1016/j.crte.2009.04.001](https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.04.001).
- Sepulchre, P., G. Ramstein et M. Schuster [2009a], "Modelling the Impact of Tectonics, Surface Conditions and Sea Surface Temperatures on Saharan and Sub-Saharan Climate Evolution", *Comptes Rendus Geoscience*, 341, 8-9 [août 2009], p. 612-620, ISSN : 16310713, DOI : [10.1016/j.crte.2009.08.006](https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.08.006).
- Sepulchre, P., L. C. Sloan, M. Snyder et J. Fiechter [2009b], "Impacts of Andean Uplift on the Humboldt Current System : A Climate Model Sensitivity Study", *Paleoceanography*, 24, 4 [déc. 2009], ISSN : 08838305, DOI : [10.1029/2008PA001668](https://doi.org/10.1029/2008PA001668).
- Banks, W. E., F. d'Errico, A. T. Peterson, M. Vanhaeren, M. Kageyama, P. Sepulchre, G. Ramstein, A. Jost et D. Lunt [2008], "Human Ecological Niches and Ranges during the LGM in Europe Derived from an Application of Eco-Cultural Niche Modeling", *Journal of Archaeological Science*, 35, 2 [fév. 2008], p. 481-491, ISSN : 03054403, DOI : [10.1016/j.jas.2007.05.011](https://doi.org/10.1016/j.jas.2007.05.011).

- Sepulchre, P., M. Schuster, G. Ramstein, G. Krinnezr, J. Girard, P. Vignaud et M. Brunet [2008], "Evolution of Lake Chad Basin Hydrology during the Mid-Holocene : A Preliminary Approach from Lake to Climate Modelling", *Global and Planetary Change*, 61, 1-2 [mar. 2008], p. 41-48, ISSN : 09218181, DOI : [10.1016/j.gloplacha.2007.08.010](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.08.010).
- Zachos, J. C., G. R. Dickens et R. E. Zeebe [2008], "An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics", *Nature*, 451, 7176, p. 279-283.
- Arsouze, T., J.-C. Dutay, F. Lacan et C. Jeandel [2007], "Modeling the neodymium isotopic composition with a global ocean circulation model", *Chemical Geology*, 239, 1-2, p. 165-177.
- Guillemot, H. [2007], *La modélisation du climat en France des années 1970 aux années 2000 : histoire, pratiques, enjeux politiques*, thèse de doct., Paris, EHESS.
- Jeandel, C., T. Arsouze, F. Lacan, P. Techine et J.-C. Dutay [2007], "Isotopic Nd compositions and concentrations of the lithogenic inputs into the ocean : A compilation, with an emphasis on the margins", *Chemical Geology*, 239, 1-2, p. 156-164.
- Sellar, A. [2007], *Tripolar Grid Generation Code : User Guide and Code Overview*.
- Sepulchre, P., G. Ramstein, M. Kageyama, M. Vanhaeren, G. Krinner, M.-F. Sánchez-Goñi et F. d'Errico [2007], "H₄ Abrupt Event and Late Neanderthal Presence in Iberia", *Earth and Planetary Science Letters*, 258, 1-2 [juin 2007], p. 283-292, ISSN : 0012821X, DOI : [10.1016/j.epsl.2007.03.041](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.03.041).
- Donnadieu, Y., Y. Goddérés, R. Pierrehumbert, G. Dromart, F. Fluteau et R. Jacob [2006], "A GEOCLIM simulation of climatic and biogeochemical consequences of Pangea breakup", *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7, 11.
- Marshall, A. G. et A. H. Lynch [2006], "Time-Slice Analysis of the Australian Summer Monsoon during the Late Quaternary Using the Fast Ocean Atmosphere Model", *Journal of Quaternary Science*, 21, 7, p. 789-801, ISSN : 1099-1417, DOI : [10.1002/jqs.1063](https://doi.org/10.1002/jqs.1063).
- Sepulchre, P., G. Ramstein, F. Fluteau, M. Schuster, J.-J. Tiercelin et M. Brunet [2006], "Tectonic Uplift and Eastern Africa Aridification", *Science*, 313, 5792 [sept. 2006], p. 1419-1423, ISSN : 0036-8075, 1095-9203, DOI : [10.1126/science.1129158](https://doi.org/10.1126/science.1129158).
- Hijmans, R. J., S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones et A. Jarvis [2005], "Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas", *International Journal of Climatology : A Journal of the Royal Meteorological Society*, 25, 15, p. 1965-1978.
- Kageyama, M., N. C. Nebout, P. Sepulchre, O. Peyron, G. Krinner, G. Ramstein et J.-P. Cazet [2005], "The Last Glacial Maximum and Heinrich Event 1 in Terms of Climate and Vegetation around the Alboran Sea : A Preliminary Model-Data Comparison", *Comptes Rendus Geoscience*, 337, 10 [août 2005], p. 983-992, ISSN : 1631-0713, DOI : [10.1016/j.crte.2005.04.012](https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.04.012).
- Kirby, M. X. et B. MacFadden [2005], "Was Southern Central America an Archipelago or a Peninsula in the Middle Miocene? A Test Using Land-Mammal Body Size", *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 228, 3-4 [déc. 2005], p. 193-202, ISSN : 00310182, DOI : [10.1016/j.palaeo.2005.06.002](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.06.002).
- Lacan, F. et C. Jeandel [2005], "Neodymium isotopes as a new tool for quantifying exchange fluxes at the continent-ocean interface", *Earth and Planetary Science Letters*, 232, 3-4, p. 245-257.
- Delsuc, F., S. F. Vizcaíno et E. J. Douzery [2004], "Influence of Tertiary Paleoenvironmental Changes on the Diversification of South American Mammals : A Relaxed Molecular Clock Study within Xenarthrans", *BMC Evolutionary Biology*, p. 13.
- Goddérés, Y. et M. M. Joachimski [2004], "Global change in the Late Devonian : modelling the Frasnian-Famennian short-term carbon isotope excursions", *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 202, 3-4, p. 309-329.
- Laskar, J., P. Robutel, F. Joutel, M. Gastineau, A. Correia et B. Levrard [2004], "A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth", *Astronomy & Astrophysics*, 428, 1, p. 261-285.

- Tachikawa, K., V. Athias et C. Jeandel [2003], "Neodymium budget in the modern ocean and paleo-oceanographic implications", *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 108, C8.
- Claussen, M., V. Brovkin et A. Ganopolski [2001], "Biogeophysical versus biogeochemical feedbacks of large-scale land cover change", *Geophysical research letters*, 28, 6, p. 1011-1014.
- Zachos, J., M. Pagani, L. Sloan, E. Thomas et K. Billups [2001], "Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present", *science*, 292, 5517, p. 686-693.
- Meyer-Berthaud, B., S. E. Scheckler et J.-L. Bousquet [2000], "The development of Archaeopteris : new evolutionary characters from the structural analysis of an Early Famennian trunk from southeast Morocco", *American Journal of Botany*, 87, 4, p. 456-468.
- Frank, M., B. C. Reynolds et R. Keith O'Nions [1999], "Nd and Pb isotopes in Atlantic and Pacific water masses before and after closure of the Panama gateway", *Geology*, 27, 12, p. 1147-1150.
- Oreskes, N. [1999], *The Rejection of Continental Drift : Theory and Method in American Earth Science*, Oxford University Press, ISBN : 978-0-19-535360-0.
- Reynolds, B., M. Frank et R. O'Nions [1999], "Nd-and Pb-isotope time series from Atlantic ferromanganese crusts : implications for changes in provenance and paleocirculation over the last 8 Myr", *Earth and Planetary Science Letters*, 173, 4, p. 381-396.
- Fleming, J. R. [1998], "Charles Lyell and climatic change : speculation and certainty", *Geological Society, London, Special Publications*, 143, 1, p. 161-169.
- Madec, G. et M. Imbard [1996], "A Global Ocean Mesh to Overcome the North Pole Singularity", *Climate Dynamics*, 12, 6 [mai 1996], p. 381-388, ISSN : 1432-0894, DOI : [10.1007/BF00211684](https://doi.org/10.1007/BF00211684).
- Romm, J. [1994], "A New Forerunner for Continental Drift", *Nature*, 367, 6462 [fév. 1994], p. 407-408, ISSN : 0028-0836, 1476-4687, DOI : [10.1038/367407a0](https://doi.org/10.1038/367407a0).
- Warnant, P., L. François, D. Strivay et J.-C. Gérard [1994], "CARAIB : a global model of terrestrial biological productivity", *Global biogeochemical cycles*, 8, 3, p. 255-270.
- Kutzbach, J., W. Prell et W. F. Ruddiman [1993], "Sensitivity of Eurasian climate to surface uplift of the Tibetan Plateau", *The Journal of Geology*, 101, 2, p. 177-190.
- Broccoli, A. J. et S. Manabe [1992], "The effects of orography on midlatitude Northern Hemisphere dry climates", *Journal of Climate*, 5, 11, p. 1181-1201.
- Raymo, M. E. et W. F. Ruddiman [1992], "Tectonic forcing of late Cenozoic climate", *Nature*, 359, 6391, p. 117-122.
- Maier-Reimer, E., U. Mikolajewicz et T. Crowley [1990], "Ocean General Circulation Model Sensitivity Experiment with an Open Central American Isthmus", *Paleoceanography*, 5, 3 [juin 1990], p. 349-366, ISSN : 08838305, DOI : [10.1029/PA005i003p00349](https://doi.org/10.1029/PA005i003p00349).
- Manabe, S., K. Bryan et M. J. Spelman [1990], "Transient response of a global ocean-atmosphere model to a doubling of atmospheric carbon dioxide", *Journal of Physical Oceanography*, 20, 5, p. 722-749.
- Frankel, H. [1988], "From Continental Drift to Plate Tectonics", p. 4.
- Ball, J. T., I. E. Woodrow et J. A. Berry [1987], "A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions", in *Progress in photosynthesis research*, Springer, p. 221-224.
- Miller, K. G. et M. E. Katz [1987], "Oligocene to Miocene benthic foraminiferal and abyssal circulation changes in the North Atlantic", *Micropaleontology*, p. 97-149.
- Barron, E. J. et W. M. Washington [1984], "The Role of Geographic Variables in Explaining Paleoclimates : Results from Cretaceous Climate Model Sensitivity Studies", *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 89, D1, p. 1267-1279, ISSN : 2156-2202, DOI : [10.1029/JD089iD01p01267](https://doi.org/10.1029/JD089iD01p01267).
- Barron, E. J. [1983], "A Warm, Equable Cretaceous : The Nature of the Problem", *Earth-Science Reviews*, 19, 4 [août 1983], p. 305-338, ISSN : 0012-8252, DOI : [10.1016/0012-8252\(83\)90001-6](https://doi.org/10.1016/0012-8252(83)90001-6).

- Barron, E. J. et W. M. Washington [1982], "Cretaceous Climate : A Comparison of Atmospheric Simulations with the Geologic Record", *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Paleogeography and Climate*, 40, 1 [nov. 1982], p. 103-133, ISSN : 0031-0182, DOI : [10.1016/0031-0182\(82\)90086-4](https://doi.org/10.1016/0031-0182(82)90086-4).
- Donn, W. L. et D. M. Shaw [1977], "Model of Climate Evolution Based on Continental Drift and Polar Wandering", *Geological Society of America Bulletin*, 88, 3, p. 390, ISSN : 0016-7606, DOI : [10.1130/0016-7606\(1977\)88<390:MOCEBO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1977)88<390:MOCEBO>2.0.CO;2).
- Kennett, J. P. [1977], "Cenozoic Evolution of Antarctic Glaciation, the Circum-Antarctic Ocean, and Their Impact on Global Paleoceanography", *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, 82, 27, p. 3843-3860, ISSN : 2156-2202, DOI : [10.1029/JC082i027p03843](https://doi.org/10.1029/JC082i027p03843).
- Charney, J. G. [1975], "Dynamics of Deserts and Drought in the Sahel", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 101, 428, p. 193-202.
- Sellers, A. et A. J. Meadows [1975], "Long Term Variations in the Albedo and Surface Temperature of the Earth", *Nature*, 254, 5495 [mar. 1975], p. 44-44, ISSN : 0028-0836, 1476-4687, DOI : [10.1038/254044a0](https://doi.org/10.1038/254044a0).
- Shackleton, N. J. [1975], "Paleotemperature history of the Cenozoic and the initiation of Antarctic glaciation : oxygen and carbon isotope analyses in DSDP Sites 277,279, and 281", *Initial Reports of Deep Sea Drilling Project*, 29, p. 743-756.
- Manabe, S. et T. B. Terpstra [1974], "The effects of mountains on the general circulation of the atmosphere as identified by numerical experiments", *Journal of the atmospheric Sciences*, 31, 1, p. 3-42.
- Frakes, L. A. et E. M. Kemp [1972], "Influence of Continental Positions on Early Tertiary Climates", *Nature*, 240, 5376 [nov. 1972], p. 97-100, ISSN : 0028-0836, 1476-4687, DOI : [10.1038/240097a0](https://doi.org/10.1038/240097a0).
- Luyendyk, B. P., D. Forsyth et J. D. Phillips [1972], "Experimental Approach to the Paleocirculation of the Oceanic Surface Waters", *Geological Society of America Bulletin*, 83, 9, p. 2649, ISSN : 0016-7606, DOI : [10.1130/0016-7606\(1972\)83\[2649:EATTP0\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1972)83[2649:EATTP0]2.0.CO;2).
- Gill, A. E. et K. Bryan [1971], "Effects of Geometry on the Circulation of a Three-Dimensional Southern-Hemisphere Ocean Model", *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 18, 7 [juil. 1971], p. 685-721, ISSN : 0011-7471, DOI : [10.1016/0011-7471\(71\)90086-6](https://doi.org/10.1016/0011-7471(71)90086-6).
- Le Pichon, X. [1968], "Sea-floor spreading and continental drift", *Journal of Geophysical Research*, 73, 12, p. 3661-3697.
- Morgan, W. J. [1968], "Rises, trenches, great faults, and crustal blocks", *Journal of Geophysical Research*, 73, 6, p. 1959-1982.
- Bryan, K. et M. D. Cox [1967], "A numerical investigation of the oceanic general circulation", *Tellus*, 19, 1, p. 54-80.
- McKenzie, D. P. et R. L. Parker [1967], "The North Pacific : an example of tectonics on a sphere", *Nature*, 216, 5122, p. 1276-1280.
- Blackett, P. M. S. [1965], "Introduction", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 258, 1088, p. vii-x, ISSN : 00804614.
- Heezen, B. C. et M. Tharp [1965], "Tectonic Fabric of the Atlantic and Indian Oceans and Continental Drift", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 258, 1088, p. 90-106, ISSN : 00804614.
- Runcorn, S. K. [1965], "Palaeomagnetic Comparisons between Europe and North America", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 258, 1088, p. 1-11, ISSN : 0080-4614.
- Vine, F. J. et D. H. Matthews [1963], "Magnetic Anomalies Over Oceanic Ridges", *Nature*, 199 [sept. 1963], p. 947.
- Emiliani, C. [1961], "The temperature decrease of surface sea-water in high latitudes and of abyssal-hadal water in open oceanic basins during the past 75 million years", *Deep Sea Research (1953)*, 8, 2, p. 144-147.

- Heezen, B. C., M. Tharp et M. Ewing [1959], *The Floors of the Oceans : I. The North Atlantic*, Geological Society of America, ISBN : 978-0-8137-2065-4.
- Lowenstam, H. et S. Epstein [1954], "Paleotemperatures of the post-Aptian Cretaceous as determined by the oxygen isotope method", *The Journal of Geology*, 62, 3, p. 207-248.
- Arx, W. S. V. [1952], "A laboratory study of the wind-driven ocean circulation", *Tellus*, 4, 4, p. 311-318.
- Bolin, B. [1950], "On the influence of the earth's orography on the general character of the westerlies", *Tellus*, 2, 3, p. 184-195.
- Wegener, A. (-1. [1937], *La genèse des continents et des océans. Théorie des translations continentales*, cinquième édition, Nouvelle traduction française d'après la cinquième et dernière édition allemande par Armand Lerner, Librairie Nizet et Bastard (Paris), 3bis, Place de la Sorbonne, Paris.
- Wallace, A. R. [1889], *Darwinism : An Exposition of the Theory of Natural Selection, with Some of Its Applications*, Macmillan and Company.
- Lyell, C. [1867], *Principles of Geology Or the Modern Changes of the Earth and Its Inhabitants, Considered as Illustrative of Geology by Charles Lyell : Illustrated with Maps, Plates and Woodcuts*, J. Murray.
- Snider-Pellegrini, A. [1858], *La création et ses Mystères dévoilés*, Libr. Franck & Dentu : Paris.
- Ortelius, A. [1587], *Thesaurus Geographicus*.

4

SÉLECTION DE CINQ PUBLICATIONS