



**HAL**  
open science

## La concentration moyenne de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère atteint 400 ppm

Francois-Marie Breon, Camille Risi, Didier Renaut, Alexandre Peltier,  
Laurent Terray, Julien Boé, Jean-Pierre Javelle

► **To cite this version:**

Francois-Marie Breon, Camille Risi, Didier Renaut, Alexandre Peltier, Laurent Terray, et al.. La concentration moyenne de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère atteint 400 ppm. *La Météorologie*, 2013, 8 (82), pp.2. 10.4267/2042/51475 . hal-03501213

**HAL Id: hal-03501213**

**<https://hal.science/hal-03501213>**

Submitted on 23 Dec 2021

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

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

Dans le monde...

## La concentration moyenne de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère atteint 400 ppm

La concentration moyenne du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dans l'atmosphère continue d'augmenter à un rythme d'environ 2 ppm (parties par millions) par an. Les mesures réalisées au sommet du Mauna Loa (figure 1) depuis 1958 viennent pour la première fois de dépasser 400 ppm. Grâce aux bulles d'air piégées dans la glace en Antarctique, on connaît la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique sur le dernier million d'années. On peut affirmer que, sur cette période et avant 1750, cette concentration n'a jamais dépassé 300 ppm.

Plus loin dans le passé, la Terre a déjà connu des périodes pendant lesquelles cette concentration était plus élevée qu'aujourd'hui. Le climat était alors plus chaud, de plusieurs degrés, et le niveau des mers plus élevé de plusieurs mètres.

La concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> n'est pas parfaitement homogène. Elle est plus importante à proximité des sources d'émission humaines, majoritairement dans l'hémisphère Nord, et montre un cycle annuel d'une dizaine de ppm qui est la conséquence du cycle annuel de la végétation. La mesure effectuée au Mauna Loa est cependant considérée comme représentative de la concentration moyenne de l'atmosphère, car elle est située loin des masses végétales et des principales sources anthropiques. Cette mesure est complétée par un réseau d'une centaine de stations qui permettent d'analyser les variations spatiales et temporelles de concentration du CO<sub>2</sub> et d'en déduire la distribution des flux. La France participe à ce réseau avec plusieurs stations en France



Figure 1. L'observatoire de la NOAA à Hawaii, au sommet du Mauna Loa (altitude 3400 m). Le 9 mai 2013, la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> au Mauna Loa a dépassé les 400 ppm pour la première fois depuis le début des mesures en 1958. Photo NOAA.

métropolitaine, mais aussi en Inde, en Afrique et dans des îles de l'océan Indien.

L'augmentation continue des concentrations de CO<sub>2</sub> est la conséquence directe des émissions anthropiques qui atteignent 35 milliards de tonnes par an, avec une tendance à l'accélération (de 3,5 % par an sur les 15 dernières années). La moitié des émissions anthropiques est absorbée par l'océan et la végétation, tandis que le reste s'accumule dans l'atmosphère. Les émissions par les volcans sont très faibles en comparaison.

Les mesures au Mauna Loa, comme celles des autres sites de mesures dans l'hémisphère Nord, montrent un cycle annuel. La concentration est maximale au début du printemps, puis diminue jusqu'à l'été, une conséquence de l'absorption du CO<sub>2</sub> par la végétation.

À l'automne et en hiver, la respiration des plantes et des sols l'emporte sur la photosynthèse, et les concentrations atmosphériques augmentent à nouveau. Année après année, le maximum du printemps augmente de 2 à 3 ppm, un nouveau record étant ainsi battu chaque année (figure 2).

Le seuil des 400 ppm est purement symbolique. Il est cependant utile pour nous rappeler que les concentrations atteignent des niveaux qui sont considérés comme dangereux par la communauté des climatologues.

Le CO<sub>2</sub> n'est pas un polluant au sens où il n'a pas d'impact direct sur la santé, même à des concentrations bien supérieures à celles que l'on rencontre dans l'atmosphère. Il est en revanche le principal responsable de l'augmentation de l'effet de serre et donc du réchauffement climatique. Les travaux des climatologues permettent de faire le lien entre l'augmentation du CO<sub>2</sub> et celle des températures. Ces travaux se basent sur la connaissance de l'impact du gaz sur le rayonnement infrarouge émis par la Terre. Ils sont confortés par l'analyse du climat de la Terre sur les dernières centaines de milliers d'années, qui montre un lien très fort entre concentration de CO<sub>2</sub> et température conduisant à une rétroaction positive forte, qui amplifie la perturbation initiale.

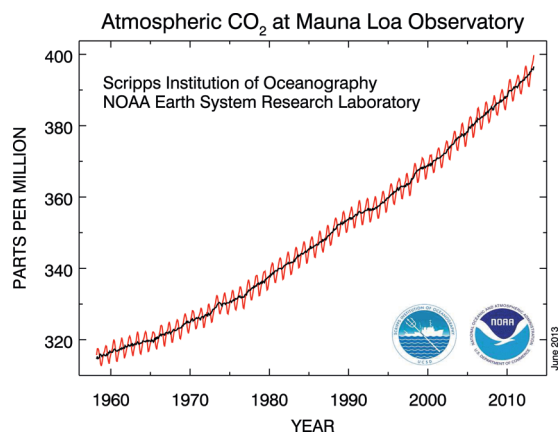


Figure 2. Évolution de la moyenne mensuelle de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> mesurée au Mauna Loa. En rouge, les valeurs des moyennes mensuelles. En noir, valeurs corrigées du cycle saisonnier annuel. Source : Scripps Institution of Oceanography et NOAA.

Le danger potentiel de l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique est mis en avant depuis une trentaine d'années par la communauté scientifique. Les messages des climatologues ont conduit à la création du GIEC (Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution

du climat) qui publie un rapport tous les 5 ans sur l'état des connaissances sur le climat, les impacts potentiels du changement climatique attendu et les mesures qui peuvent être prises. Malgré les alertes, les États n'ont pas su prendre les mesures pour infléchir

les émissions anthropiques. Au contraire, on observe une augmentation rapide des émissions, en particulier dans les pays émergents, au premier rang desquels on trouve la Chine.

François-Marie Bréon

Dans le monde...

## L'augmentation du CO<sub>2</sub> agit directement sur les précipitations

Le changement climatique lié à l'augmentation du CO<sub>2</sub> se manifeste par un réchauffement global, mais aussi par des changements de pluviosité. Ceux-ci peuvent avoir des conséquences dramatiques pour les sociétés et l'économie, avec, selon les régions, un accroissement des risques d'inondations ou une aggravation des sécheresses.

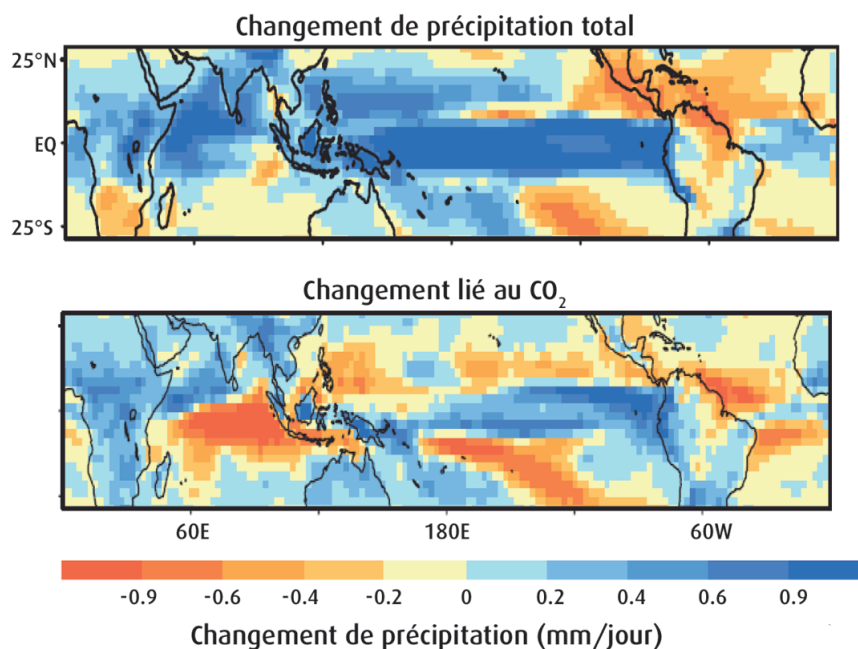
Jusqu'à présent, on pensait que les changements de pluviosité à venir seraient principalement liés au réchauffement global, par le biais d'une humidification de l'atmosphère et d'une réorganisation de la circulation atmosphérique, elle-même provoquée par les hétérogénéités du réchauffement à la surface du Globe. L'étude de S. Bony (Laboratoire de météorologie dynamique) et de ses co-auteurs (2013), montre au contraire qu'une part significative des changements de pluviosité dans les tropiques serait indépendante du réchauffement climatique, mais directement liée à une augmentation de la concentration du CO<sub>2</sub> atmosphérique. En effet, le CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, en tant que gaz à effet de serre, contrôle le refroidissement de l'atmosphère par rayonnement. Celui-ci, en retour, joue un rôle important dans les mouvements verticaux de l'atmosphère, et donc dans la circulation atmosphérique.

Pour arriver à cette conclusion, S. Bony et ses co-auteurs ont analysés plus d'une vingtaine de modèles de climat participants au projet CMIP5

(Coupled Model Intercomparison Project version 5), dont les simulations permettent d'établir les projections climatiques présentées par le GIEC. Ils ont trouvé qu'au-delà des différences fortes entre les modèles de climat, le rôle important du CO<sub>2</sub> sur la circulation tropicale et la pluviosité était une caractéristique commune des différents modèles. Ils ont aussi trouvé que ce rôle était maintenu même dans des modèles très simplifiés. Cela renforce leur confiance dans leurs résultats.

Cette étude a des implications en géo-ingénierie : même si on essayait de réduire le réchauffement climatique en augmentant la réflexion du rayonnement solaire (par exemple en injectant des aérosols dans la stratosphère ou en ensemençant des nuages), on ne pourrait pas éviter les effets du CO<sub>2</sub> sur la pluviosité. Seule une stabilisation de la teneur en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère permettrait d'éviter ces changements.

Camille Risi



En haut : changement de précipitation totale dans les tropiques entre la période préindustrielle et 2090, en moyenne, sur tous les modèles de climat de CMIP5. En bas : changement lié au CO<sub>2</sub> uniquement. On voit que de nombreux aspects du changement total de précipitation sont liés aux CO<sub>2</sub>, comme l'augmentation sur le Pacifique central et Est, sur l'Indonésie et l'Afrique centrale, ou encore l'assèchement sur l'Amazonie.

Dans le monde...

## BIOMASS, 7<sup>e</sup> mission spatiale « Earth Explorer » de l'ESA

La mission spatiale BIOMASS, conçue pour mesurer et surveiller la biomasse forestière à l'échelle planétaire, vient d'être retenue par l'Agence spatiale européenne (ESA) en tant que 7<sup>e</sup> mission « Earth Explorer » (voir encadré), pour un lancement aujourd'hui prévu en 2020.

Candidate en 2005 au programme « Earth Explorer Core missions » de l'ESA parmi 24 propositions, la mission BIOMASS a été choisie en mars 2013 par le Comité scientifique pour les sciences de la Terre de l'ESA comme le projet le plus pertinent techniquement et scientifiquement des trois propositions de mission encore en piste<sup>1</sup>. Cette recommandation a été ratifiée en mai 2013 par le Comité de programme d'observation de la Terre de l'ESA, composé des représentants des vingt États membres de l'agence.

La biomasse forestière, définie comme la masse de matière végétale sèche contenue dans les forêts, est un élément clé du cycle du carbone. En effet, grâce à la photosynthèse, les écosystèmes végétaux synthétisent de la matière organique en prélevant le CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Cependant, les quantités et les variations de la biomasse sont connues de façon imprécise, en particulier pour les forêts tropicales et pour ce qui concerne les conséquences de la déforestation. Cela induit des incertitudes importantes sur la connaissance des échanges de CO<sub>2</sub> entre la surface terrestre et l'atmosphère (figure 1), et donc sur la prévision des changements climatiques futurs.

1. Les deux autres projets de missions spatiales encore en lice début 2013 étaient CORE-H2O, destiné à mesurer globalement la quantité d'eau contenue dans la couverture neigeuse à l'aide de radars à synthèse d'ouverture bi-fréquence, et PREMIER, destiné à mieux connaître les processus reliant les gaz traces, la chimie et le rayonnement dans la haute troposphère et la basse stratosphère à l'aide d'un spectro-imageur infrarouge et d'un sondeur à ondes millimétriques visant tous deux au limbe.

2. En fait, BIOMASS ne pourra pas effectuer de mesures de la biomasse forestière au-dessus d'une vaste partie du globe comprenant l'Amérique du Nord, l'Amérique centrale et l'Europe. En effet, pour ces régions, le faisceau radar de BIOMASS pourrait perturber le fonctionnement des radars au sol du réseau américain de surveillance des objets spatiaux. Le Département de la Défense américain a récemment demandé à l'ESA de ne pas opérer BIOMASS dans les régions correspondantes. Si cette restriction limite la couverture mondiale de BIOMASS, elle affecte peu l'objectif principal de la mission, puisque seule une faible partie de la forêt tropicale (située en Amérique centrale) serait exclue des mesures.

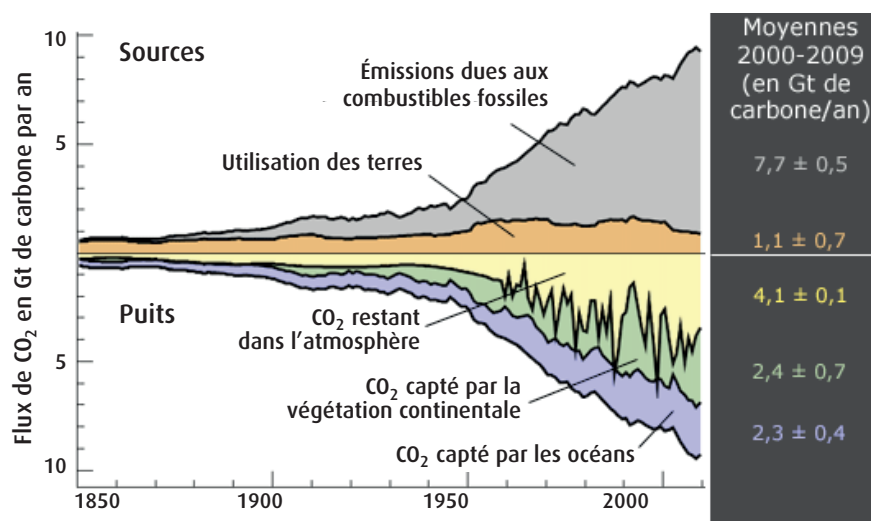


Figure 1. Évolution temporelle de 1850 à nos jours des principaux flux de CO<sub>2</sub> entre la surface terrestre et l'atmosphère. On note que la déforestation (utilisation des terres) contribue aux émissions à hauteur de 1,1 Gt/an et que les plus grandes incertitudes sur les flux sont liées au comportement des sols de la végétation continentale. (© ClimObs, Le Quéré et al., 2010, *Nature Geoscience*)

La mission BIOMASS permettra de relever ce défi en fournissant une cartographie semestrielle de la biomasse des forêts à l'échelle mondiale<sup>2</sup> et en permettant d'améliorer les estimations des stocks et des flux de carbone des écosystèmes forestiers. À cette fin, BIOMASS comportera un radar à synthèse d'ouverture (SAR) à basse fréquence (bande P, fréquence 435 MHz, longueur d'onde 69 cm), un instrument encore jamais mis en orbite, qui mesurera la biomasse forestière avec une résolution horizontale de 200 mètres (figure 2). Le satellite suivra une orbite héliosynchrone à une altitude d'environ 660 km, pour une durée de vie nominale de 5 ans. Autre innovation, BIOMASS fournira les premières images spatiales interférométriques et

tomographiques en bande P, grâce auxquelles il sera possible de caractériser la structure tridimensionnelle des forêts.

Les investigateurs scientifiques principaux de BIOMASS sont Thuy Le Toan (CESBIO, France) et Shaun Quegan (Université de Sheffield, Royaume-Uni). À leurs côtés, plusieurs centres de recherche ont contribué à la conception et à la définition précise de la mission BIOMASS avec l'ESA, que ce soit en France ou au Royaume-Uni, en Allemagne, en Italie, en Suède, au Danemark et aux États-Unis. En France, de nombreuses équipes ont reçu un soutien important du Cnes pour travailler sur les aspects scientifiques du projet.

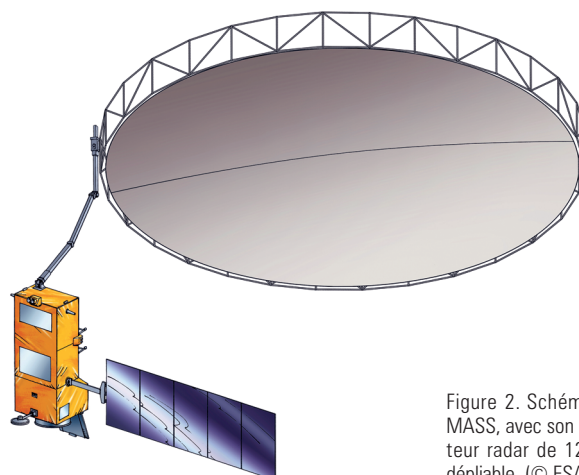


Figure 2. Schéma de principe du satellite BIOMASS, avec son bras déployable et son grand réflecteur radar de 12 mètres de diamètre, lui aussi déployable. (© ESA, P. Carril, 2012)

## Les missions spatiales « Earth Explorer » de l'ESA

Les Earth Explorer sont des missions spatiales de recherche, de taille moyenne ou petite, qui explorent des aspects spécifiques de l'environnement terrestre (atmosphère, biosphère, hydrosphère, cryosphère et intérieur de la Terre), tout en démontrant la faisabilité de nouvelles technologies dans l'espace. Elles comprennent deux catégories : les « Core missions », dont l'intérêt scientifique est jugé crucial, et les « Opportunity missions », de moindre coût et plus rapides à développer. Le tableau suivant résume les caractéristiques des six premiers Earth Explorer et du 8e qui est encore en cours de sélection (pour plus de détails, voir [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Earth\\_Explorers\\_overview](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Earth_Explorers_overview)).

Nom	Catégorie	Objectif scientifique	Statut actuel	Date de lancement
<b>GOCE</b> (Gravity Field and Steady-State Ocean Explorer)	Core mission	Mesure du champ de gravité terrestre et modélisation du géoïde pour améliorer la connaissance de la circulation océanique	En exploitation	17 mars 2009
<b>SMOS</b> (Soil Moisture and Ocean Salinity)	Opportunity mission	Mesure de l'humidité des sols des surfaces continentales et mesure de la salinité des océans	En exploitation	2 novembre 2009
<b>CryoSat</b>	Opportunity mission	Mesure de l'épaisseur de la banquise et surveillance des glaciers continentaux	En exploitation	8 avril 2010
<b>Swarm</b>	Opportunity mission	Constellation de 3 satellites pour la mesure du champ magnétique terrestre	En développement	Prévu en 2013
<b>ADM-Aeolus</b> (Atmospheric Dynamics Mission)	Core mission	Mesure des profils de vent à l'échelle planétaire	En développement	Prévu en 2015
<b>EarthCARE</b> (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer)	Core mission	Suivi des interactions entre les aérosols, les nuages et le rayonnement pour le climat	En développement	Prévu en 2016
<b>Earth Explorer 8</b>	Opportunity mission, 2 candidats	<b>FLEX</b> (Fluorescence Explorer) : cartographie mondiale de la fluorescence de la végétation, dont on peut déduire l'activité de photosynthèse. <b>CarbonSat</b> : suivi de la distribution du CO <sub>2</sub> et du CH <sub>4</sub> atmosphériques, pour en déduire les sources et les puits en surface.	À l'étude	Sélection de la mission en 2014

Didier Renaut

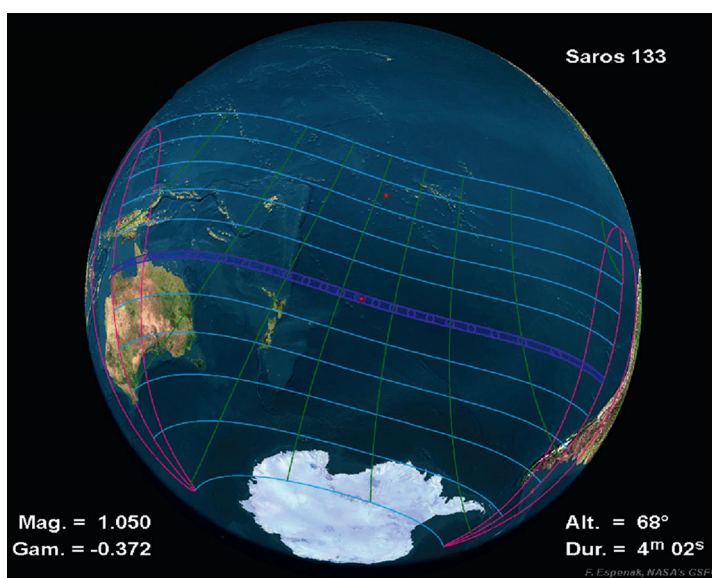
## En Bref...

# Observations météorologiques pendant l'éclipse totale du Soleil survenue le 13 novembre 2012

## Une éclipse totale... surtout en pleine mer !

Le 13 novembre 2012 (UTC), le Soleil a été complètement occulté par la Lune. L'ombre, c'est-à-dire la zone étroite où le Soleil disparaît complètement, a pu être observée en Australie, dans le nord du Queensland et des Territoires du Nord, ainsi qu'en plein océan Pacifique par quelques navigateurs aventureux (figure 1). En effet, en Mélanésie et en Polynésie, l'ombre n'a survolé aucune terre émergée. L'île du Pacifique où l'occultation a été quasiment complète est Norfolk avec 98 %. Avec l'extrême nord de la Nouvelle-Zélande et l'île de Robinson Crusoë, la Nouvelle-Calédonie fait partie des territoires privilégiés puisqu'on a pu y observer l'astre solaire masqué à 90 %.

Figure 1. Prédiction de l'éclipse réalisée par Fred Espenak (NASA/GSFC). La zone d'ombre figure en bleu foncé. La zone où l'éclipse est partielle, appelée pénombre, apparaît en bleu clair.



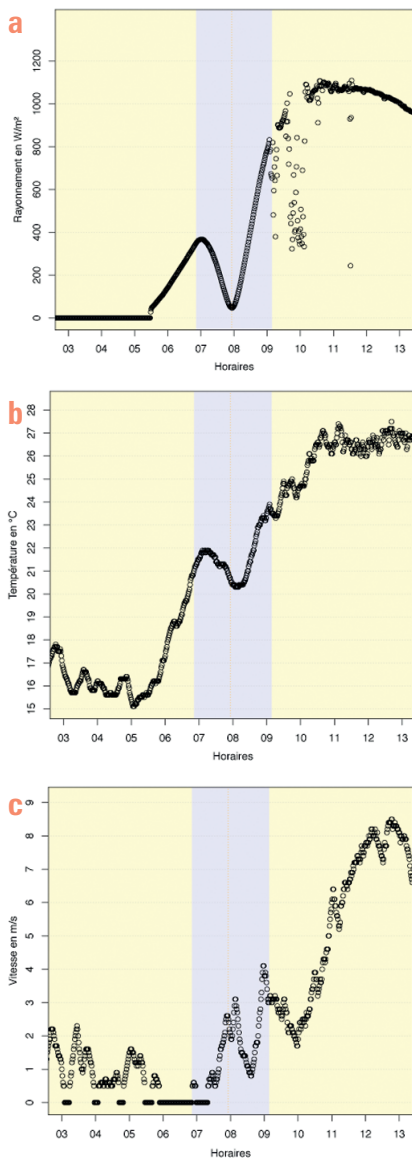


Figure 2. Mesures effectuées chaque minute à Tontouta le 14/11/2012. La période d'occultation figure en gris. Le maximum d'occultation est symbolisé par le trait vertical orange.

a. Rayonnement solaire global (en  $W/m^2$ ).  
 b. Température atmosphérique mesurée à 1 mètre dans l'abri météorologique (en  $^{\circ}C$ ).  
 c. Vitesse du vent mesuré à 10 mètres (en m/s).

## Soleil masqué, « Caillou » frigorifié !

C'est le 14 novembre 2012, une dizaine de minutes avant 7 heures (heure locale), que les Calédoniens ont vu la Lune commencer à passer devant le Soleil. Environ une heure après, aux alentours de 7 h 55, l'occultation a atteint son maximum (90 %). À partir de ce moment, la Lune a commencé à s'effacer pour complètement disparaître du disque solaire vers 9 h 05.

Les nombreux observateurs de l'éclipse ont certainement frêmi lorsque la Lune s'est dévoilée à leurs yeux ébahis, mais l'émotion n'en était certainement pas la seule cause. En effet, nos instruments de mesure ont enregistré de nombreux changements dans l'évolution des paramètres atmosphériques. Le plus notable d'entre eux est un refroidissement ensile.

C'est sur l'ouest de la Grande Terre, notamment à l'aéroport de La Tontouta, que le ciel était le plus propice à l'observation de l'éclipse, à peine quelques nuages cumuliformes. Non loin des pistes, les météorologues ont installé des capteurs pour mesurer en continu la température, le vent, la pression atmosphérique, l'humidité, l'intensité du rayonnement solaire global, etc. et ainsi participer à la sécurité des vols commerciaux.

Ce matin-là, dès que la pénombre est arrivée, à 6h51, notre pyranomètre a enregistré une baisse significative du rayonnement solaire global, comme le montre la figure 2a. Le minimum d'énergie solaire reçue pendant la période d'occultation correspond exactement au paroxysme de l'éclipse à 7 h 55 précisément. La valeur mesurée alors est égale à 10 % de la valeur normalement mesurée à cette heure. Puis, à mesure que la Lune s'est effacée, la quantité d'énergie reçue par notre capteur a rapidement augmenté pour atteindre des valeurs normales. Ensuite, quelques passages nuageux ont obscurci le ciel, ce qui explique les baisses sporadiques relevées après 9 h 00.

À mesure que l'énergie solaire reçue diminuait, les différentes couches de l'atmosphère se sont refroidies. À 1 mètre au-dessus du sol, dans l'abri météorologique, notre sonde de température a enregistré une baisse notable de la température (figure 2b). D'ordinaire, un peu après le levé du soleil, la température observe une croissance jusqu'à atteindre son maximum l'après-midi. Durant l'éclipse, la tendance s'est inversée peu de temps après le début de la pénombre. Une dizaine de minutes après le maximum d'occultation, la température a atteint un minimum,  $20,3^{\circ}C$ , soit  $1,6^{\circ}C$  de moins qu'au début du phénomène astronomique. Des baisses sensiblement équivalentes ont aussi été mesurées à Magenta, Touho, Koumac et Ouana-ham. Ces constatations sont corroborées par des études bien plus approfondies sur le sujet (Segal, 1996).

L'humidité relative a bien évidemment augmenté de manière significative pendant l'éclipse, en phase avec la diminution de la température. On observe une hausse de l'ordre de +5 %. Cependant, nous ne sommes pas en mesure de conclure quant à l'évolution du contenu en eau de l'atmosphère à proximité du sol en lien avec l'éclipse, car les variations observées d'un poste à l'autre sont différentes.

Pour ce qui concerne la vitesse du vent, l'éclipse semble avoir eu pour effet de freiner l'évolution diurne du vent, qui a tendance à augmenter au cours de la matinée. On enregistre en effet une diminution notable de la vitesse du vent de 3 à 5 nœuds à Tontouta et Koné après le maximum d'occultation, ainsi qu'une stabilisation de la vitesse du vent à Magenta, où le vent commençait déjà à bien se renforcer avant le début de la pénombre (figure 2c). On peut avancer l'hypothèse que les mécanismes à l'origine de la variation du vent pendant la pénombre soient similaires à ce qui se produit au coucher du soleil, lors de la mise en place de la couche limite nocturne. La température en surface diminuant, il en résulte une stabilisation de la couche limite près du sol. Du fait de cette stabilisation, le mélange vertical turbulent devient limité. Le vent dans les basses couches se trouve alors découplé du vent plus en altitude. Comme la présence du sol freine le vent et que celui-ci n'est plus couplé par turbulence avec le vent plus fort au-dessus (qui aurait tendance à l'accélérer), le vent diminue. Dès que le rayonnement solaire augmente, le chauffage au sol recommence, la turbulence aussi, d'où un accroissement de la vitesse du vent mesuré. Cette hypothèse permet d'expliquer le décalage observé entre le début du refroidissement et le début de la diminution du vent : il faut d'abord que la température soit bien descendue pour que la couche soit stable afin d'ensuite freiner le vent.

Quant à la pression atmosphérique, elle semble ne pas avoir été affectée par l'éclipse d'après nos mesures, bien que des études météorologiques portant sur d'autres éclipses aient pu mettre en évidence une augmentation de quelques dixièmes d'hectopascals, initiée, semble-t-il, par le refroidissement accru de la stratosphère (Eckermann, 2007).

**Alexandre Peltier**

En Europe...

## Sur le contraste saisonnier du réchauffement climatique projeté en France et en Europe au XXI<sup>e</sup> siècle<sup>1</sup>

Dans une étude publiée prochainement (Terray et Boé, 2013), nous estimons les changements climatiques projetés pour la France au XXI<sup>e</sup> siècle, à partir d'un vaste ensemble multimodèle de simulations climatiques réalisées dans le cadre de l'exercice international d'intercomparaison CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project version 5*) coordonné par le Programme mondial de recherche sur le climat. Au préalable, nous évaluons la fiabilité des modèles climatiques utilisés en comparant les évolutions observées et simulées de température et précipitation au cours du XX<sup>e</sup> siècle. Les simulations climatiques contraintes par les forçages anthropiques et naturels observés indiquent une augmentation des températures françaises en moyenne annuelle depuis les années 1900, avec une accentuation au cours des trente dernières années, ce qui est en accord avec le réchauffement observé de 1 °C. Elles suggèrent également que 70 % environ du réchauffement observé est directement lié aux effets anthropiques. Nous montrons également que les simulations du XX<sup>e</sup> siècle soumises uniquement aux forçages externes naturels (variations solaires et éruptions volcaniques) sont incapables de reproduire le réchauffement et son accélération dans les dernières décennies.

Sous l'hypothèse d'un scénario à forte croissance des concentrations de gaz à effet de serre (1370 ppmv en CO<sub>2</sub> équivalent en 2100), le climat de la France pourrait se réchauffer de 4,5 °C en moyenne annuelle à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle par rapport au début du XX<sup>e</sup> siècle. Un scénario plus modéré (650 ppmv stabilisé après 2100) donne sur la France un réchauffement en moyenne annuelle de 2,6 °C.

Dans cette étude, nous détaillons les caractéristiques du contraste entre le réchauffement projeté en été et en hiver ainsi que les mécanismes associés. En plus de l'amplitude quasiment deux fois plus forte du réchauffement de la France en période estivale (6 °C) par rapport à la période hivernale (3,7 °C), un fort contraste saisonnier existe également sur la structure spatiale du réchauffement (figure 1). Le réchauffement hivernal est caractérisé par un gradient zonal et des

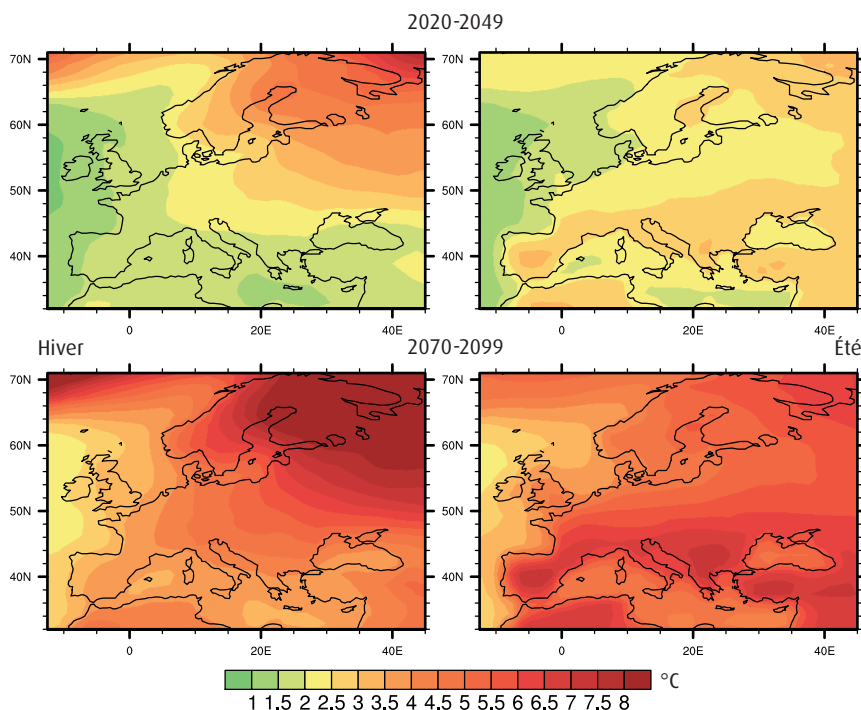


Figure 1. Augmentation projetée des températures moyennes de l'air en surface en France (en °C) pour la période 2020-2049 (en haut) et la période 2070-2099 (en bas), en hiver (à gauche) et en été (à droite), par rapport aux températures moyennes de la période 1900-1929 prise comme référence, calculée en faisant la moyenne des résultats obtenus à l'aide de 25 modèles différents dans le cadre du scénario avec la plus forte concentration projetée des gaz à effet de serre (scénario RCP 8.5).

valeurs croissantes de la façade atlantique vers la Scandinavie et le nord-est de l'Europe. La structure estivale est fort différente et montre un gradient nord-sud avec une augmentation du réchauffement de la Scandinavie vers la zone méditerranéenne. Ces contrastes sont également présents à l'échelle de la France, mais font clairement partie d'une structure spatiale cohérente à l'échelle du continent européen. Remarquons aussi que cette asymétrie saisonnière est déjà bien présente sur la période 2020-2049 et qu'elle voit son amplitude multipliée par deux à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle.

En été, les modèles climatiques simulent au cours du XXI<sup>e</sup> siècle une diminution de la couverture nuageuse en Europe avec de fortes valeurs sur la région méditerranéenne. Cette diminution entraîne une augmentation du bilan net des flux radiatifs (solaire et infrarouge) et de l'énergie disponible à la surface. Cette dernière est alors dissipée par les flux de chaleur sensible et latente. L'assèchement et les conditions de stress hydrique projetés par les modèles climatiques sur le sud de l'Europe (où le contrôle de l'évapotranspiration est contraint principalement par

l'humidité du sol) entraînent une diminution du flux de chaleur latente et une augmentation du flux de chaleur sensible et par conséquent un réchauffement marqué. Plus on remonte vers le nord de l'Europe (où le contrôle de l'évapotranspiration se fait majoritairement par l'énergie radiative incidente), plus cette répartition s'inverse avec une augmentation plus forte du flux de chaleur latente que celle du flux sensible et en conséquence un réchauffement plus faible.

Les changements en hiver obéissent à des mécanismes bien différents. Le maximum de réchauffement simulé sur le nord-est de l'Europe est en grande partie lié à la diminution du couvert neigeux (à l'albédo très élevé) et à la rétroaction neige-albédo qui vient amplifier la perturbation initiale liée aux modifications du bilan radiatif consécutives à l'augmentation des gaz à effet de serre. Les couplages/interactions entre les changements du couvert neigeux et ceux de la circulation atmosphérique hivernale peuvent également jouer un rôle important. Par exemple, les changements de transport de chaleur associé aux masses d'air océanique liées à une phase négative de l'oscillation nord-atlantique peuvent

1. Cette note est reprise de la lettre Météo & Climat Infos parue en mai 2013, lettre bimestrielle réservée aux adhérents de la Société (<http://meteoclimat.fr/newsletter-meteo-et-climat-info/>)

diminuer voire annuler complètement l'effet de refroidissement associé à une augmentation des fréquences d'occurrence de ce régime de temps sur le nord de l'Europe.

En conclusion, les contrastes spatiaux entre les projections estivales et hivernales semblent principalement liés à des mécanismes différents d'interaction entre

l'atmosphère et les surfaces continentales. Il faut souligner que ces mécanismes sont aussi à l'origine de la dispersion importante qui existe entre les réponses des différents modèles climatiques sur certaines régions européennes, en particulier sur la France en été et le nord-est de l'Europe en hiver. De nouvelles métriques basées sur les processus qui relient la dispersion des projections à des biais de modélisation sur

le climat présent semblent des pistes prometteuses pour réduire cette source d'incertitude. Notons pour finir que les changements de précipitation seraient également contrastés avec une diminution importante en été et une légère augmentation en hiver et caractérisés par de fortes incertitudes sur leur amplitude et répartition géographique.

Laurent Terray et Julien Boé

Terray L. et J. Boé, 2013 : Quantifying 21st-century France climate change and related uncertainties. *C. R. Geoscience*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2013.02.003>

En France...

## Les 20 ans d'ORCHIDÉE

ORCHIDEE est un modèle numérique de surface continentale, qui permet de calculer le bilan d'eau et d'énergie sur les continents. Il est utilisé dans le modèle de climat de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), qui inclut des modèles d'atmosphère, d'océan et de glace de mer. Lors d'un séminaire, les chercheurs viennent de fêter les 20 ans d'existence d'ORCHIDEE tout en discutant de ses évolutions futures...

Dès les années 1980, le développement d'un modèle de circulation générale atmosphérique au Laboratoire de météorologie dynamique avait stimulé le développement d'un modèle de surface continentale associé. Lorsqu'il vit le jour en 1993, SECHIBA était un modèle très simple : le sol n'était considéré que comme un «seau» d'eau qui se remplissait par les pluies et se vidait par évaporation ou ruissellement.

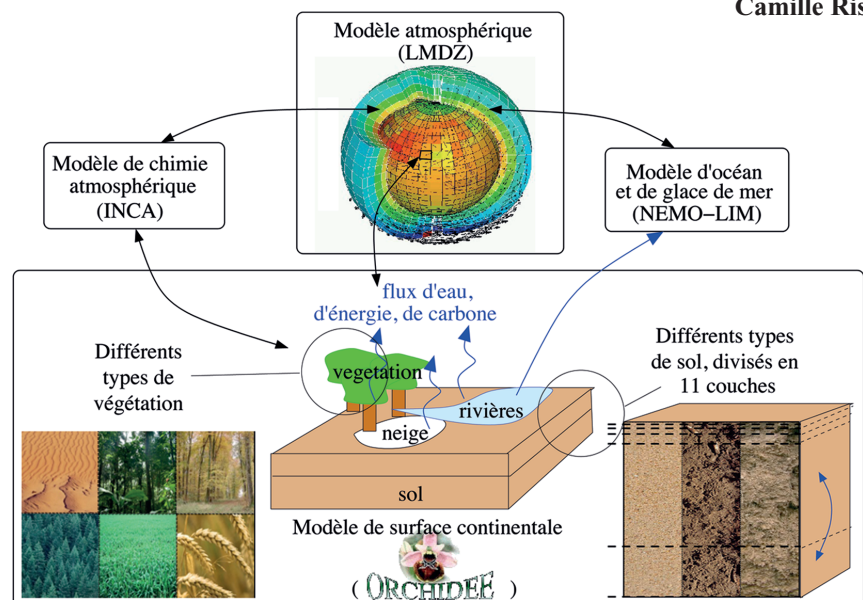
SECHIBA a évolué à la fois sur le plan des contenus, en représentant plusieurs types de végétation et un bilan d'eau dans le sol plus physique, et sur le plan de la forme, en devenant un modèle indépendant. Par la suite, SECHIBA a été complété de modèles simulant l'évolution de la végétation et les flux de carbone entre le sol, les plantes et l'atmosphère. Le modèle ainsi obtenu, permettant de décrire de manière complète et détaillée la surface continentale et son évolution, à différentes échelles de temps, a été baptisé ORCHIDEE (Organising Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems, <http://labex.ipsl.fr/orchidee/>).

Vingt ans plus tard, ORCHIDEE est utilisé dans le monde entier, soit couplé avec un modèle de circulation atmosphérique, soit, de manière indépendante, pour étudier le fonctionnement des surfaces

continentales. Il est toujours en permanente évolution, développé à l'IPSL ainsi que dans d'autres laboratoires en région parisienne, à Grenoble et à Pékin. D'importants efforts sont faits pour améliorer la représentation des processus physiques dans le sol, tels que l'infiltration de la pluie, la diffusion de l'eau dans le sol ou l'extraction de l'eau par les racines des plantes. De nombreux développements ont aussi permis d'étendre considérablement le champ

d'application. Par exemple, en plus du bilan d'eau et d'énergie, ORCHIDEE permet aujourd'hui de représenter les composantes continentales du cycle du carbone et prochainement celles du cycle de l'azote. C'est un pas important vers la représentation des cycles biogéochimiques pour le modèle de climat de l'IPSL, qui devient alors un modèle dit de «système Terre». D'autres développements visent à représenter l'impact des pratiques agricoles (différentes cultures, irrigations, gestion des forêts), des feux ou de la pollution atmosphérique sur le bilan d'eau, d'énergie et de carbone.

Camille Risi



En haut : Schéma illustrant le modèle ORCHIDÉE et ses couplages dans le cadre du modèle de «Système Terre» de l'IPSL. En bas : Photo du groupe (non complet) développant et utilisant le modèle ORCHIDÉE.



En France...

## Le portail documentaire de Météo-France enrichi par une bibliothèque numérique et un musée virtuel<sup>1</sup>

Un premier ensemble de 1075 documents en texte intégral et de 250 instruments météorologiques anciens ont rejoint respectivement la bibliothèque numérique et le musée virtuel du portail documentaire Doc-Météo, à l'adresse <http://bibliotheque.meteo.fr>

La bibliothèque numérique propose une sélection de livres sur la météorologie et la climatologie, publiés entre le XVI<sup>e</sup> et la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle et conservés par la bibliothèque de Météo-France. Elle permet aussi de télécharger gratuitement une série d'ouvrages et de périodiques édités par Météo-France au cours des dernières années.

Les publications numérisées sont choisies en raison de la présence d'observations anciennes en France ou de leur intérêt pour l'histoire des concepts, des instruments et des pratiques en météorologie et en climatologie.

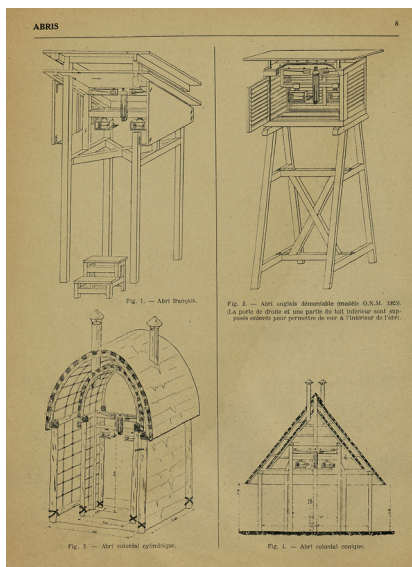
Quelques ouvrages à découvrir parmi les nouveaux documents en ligne sur la bibliothèque numérique :

- 7 atlas des nuages, publications destinées à harmoniser les relevés d'observation dans les différents pays. Ainsi, le superbe *Atlas des nuages* de 1890, par H. H. Hildebrandsson, W. Koppen et F. Neumeyer, se compose d'un texte traduit en quatre langues (anglais, suédois, allemand et français) suivi de 10 grandes planches peintes en couleurs, une par type de nuages, et de deux planches de six photographies chacune.
- 33 ouvrages de référence et anciens cours de météorologie, dont le *Lexique météorologique* publié sous la direction du Général Delcambre dans les années 1930. Le fascicule 1 du *Lexique météorologique* présente par exemple différents plans d'abri destinés à la mesure de la température et de l'humidité, ainsi que les méthodes utilisées à l'époque pour afficher les renseignements météorologiques pour l'aviation.

1. La numérisation des publications anciennes bénéficie du soutien de la Bibliothèque nationale de France ou de programmes de recherche d'informations anciennes sur le climat (Data Rescue). Le catalogage des instruments anciens s'effectue dans le cadre d'un partenariat avec la mission nationale de sauvegarde du patrimoine scientifique et technique contemporain (Patstec) du Conservatoire national des Arts et Métiers.

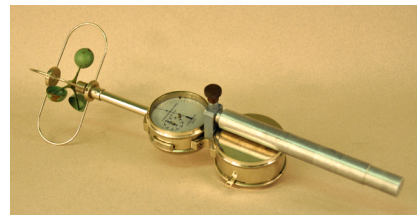


Cumululus, planche peinte, Atlas des nuages, 1890. (photo Météo-France)



Schémas d'abris météorologiques, *Lexique météorologique*, 1926 (photo Météo-France).

- Plus de 500 bulletins climatologiques locaux, édités par les commissions météorologiques départementales à la fin du XIX<sup>e</sup> et au début du XX<sup>e</sup> siècle. Par exemple, le *Bulletin de la Commission météorologique des Deux-Sèvres (1891-1892)* comporte un ensemble de tableaux d'observations météorologiques et phénologiques ainsi qu'une carte des orages de l'année 1891.
- 6 anciens catalogues d'instruments météorologiques dont le catalogue



Anémomètre à main, 1955. (photo Météo-France, F. Perin)

*Anémomètres et anémoscopes* édité par la maison Richard Frères en 1899.

- 82 livres anciens de météorologie, datant de 1548 à 1807.

Le musée virtuel présente en images la collection d'instruments météorologiques anciens de Météo-France, qui est en cours d'inventaire et de catalogage. Quelques instruments remarquables :

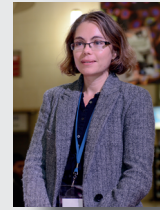
- la radiosonde de Présalé, qui date de 1947, utilisée à la station de Trappes pour la mesure des paramètres météorologiques de base en altitude : pression, température et humidité ;
- un anémomètre à main construit en 1955 par Jules Richard ;
- un enregistreur de girouette fabriqué en 1951 ;
- un théodolite de sondage Pilot qui date de 1954. Cet instrument servait à déterminer la vitesse et la direction du vent en altitude, par tranche de 100 mètres environ. Ces sondages aérologiques étaient particulièrement utiles à l'aviation.

Jean-Pierre Javelle



Camille Yver  
2011

Laure Raynaud  
2012



## Concours Jeunes Chercheurs Dotation : 1 600 €

### GÉNÉRALITÉS

Le prix Prud'homme a été créé par la SMF-Météo et Climat, Société météorologique de France, pour honorer la mémoire d'André Prud'homme (1920-1959), météorologiste français, mort accidentellement en Terre Adélie pendant l'Année géophysique internationale.

### RÈGLEMENT & MODALITÉS DU CONCOURS

#### 1 - Domaines de la thèse

Météorologie | Physique et chimie de l'atmosphère | Paléoclimatologie | Climatologie, y compris les aspects océanographiques | Planétologie si lien explicite avec les aspects terrestres.

#### 2 - Lieu et année de soutenance de la thèse

La thèse doit avoir été soutenue dans une université ou une école doctorale française en 2012 ou en 2013.

Une candidature peut être présentée deux années consécutives.

#### 3 - Engagement du(de la) lauréat(e)

Le(a) lauréat(e) s'engage à publier ultérieurement un article présentant les points essentiels de ses travaux dans revue scientifique *La Météorologie*.

#### 4 - Que contient le dossier de candidature et comment l'envoyer ?

a) Liste des documents à envoyer sous format électronique à : [morgane.daudier@meteoetclimat.fr](mailto:morgane.daudier@meteoetclimat.fr)

- Votre lettre de candidature au prix André Prud'homme avec vos coordonnées postales, votre numéro de téléphone et votre adresse électronique ;
- Le résumé de votre thèse (1 page A4 maximum) ;
- La liste de vos publications ;
- Les avis des rapporteurs de votre thèse.

b) Document à envoyer par courrier postal à :  
SMF-Météo et Climat - À l'attention de Morgane Daudier  
73, avenue de Paris - 94165 Saint-Mandé Cedex.

- Votre thèse (version papier), reliée, en 2 exemplaires.

#### 5 - Date limite de la candidature

Le dossier de candidature et ses pièces doivent être envoyés avant le 1<sup>er</sup> février 2014.

### ATTRIBUTION DU PRIX

La décision d'attribution du prix sera communiquée au printemps 2014.

Le prix d'un montant de 1600€ sera remis début 2015, au cours d'une cérémonie à l'issue de laquelle le(a) lauréat(e) fera un exposé sur sa thèse.

### JURY

L'évaluation des dossiers sera effectuée par un jury présidé par Éric Brun de Météo-France.

Organisé par



Avec le soutien de



Sous la présidence d'honneur de Jacques Blamont, membre de l'Académie des sciences.

Contact : Morgane Daudier. Tél. : 01 77 94 73 64 - [morgane.daudier@meteoetclimat.fr](mailto:morgane.daudier@meteoetclimat.fr) - [www.meteoetclimat.fr](http://www.meteoetclimat.fr)