

Les Savanturiers

En mission avec les scientifiques du CEA

n°10

À la recherche du temps perdu

Les climatologues parcourent les océans, les mers et les rivières pour prélever des sédiments. Ceux-ci, comme toutes les archives naturelles, sont précieux pour comprendre le climat passé et s'interroger sur le climat futur.

À bord du navire océanographique Marion Dufresne.



© Lei Shao



© D.R.



© A. Mazaud/CEA



Sommaire :

Comprendre :
Les archives climatiques naturelles

Pages 2-3



Du bateau au laboratoire, les principales analyses

Pages 4-5



© D.R.

Comprendre : les archives climatiques naturelles

Une archive climatique se construit, s'échantillonne et se déchiffre, couche par couche. Certaines archives, comme les coraux ou les cernes d'arbres, enregistrent les saisons sur quelques décennies à quelques centaines d'années. D'autres, comme les sédiments marins, permettent de remonter beaucoup plus loin dans le temps, jusqu'à plusieurs millions d'années. On peut y retrouver des variations plus lentes du climat, mais aussi des traces d'évènements abrupts et ponctuels.

Sédiments lacustres

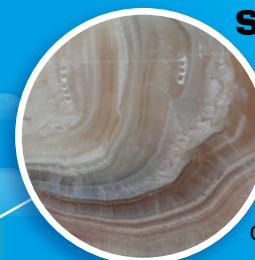
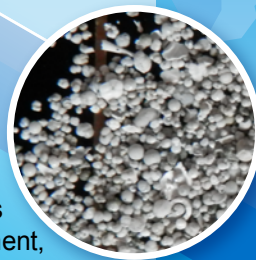
L'analyse des algues microscopiques renseigne sur l'évolution des lacs tandis que l'étude des pollens permet de reconstruire les changements de végétation autour des lacs. Il est aussi possible de suivre l'évolution des pluies et de dresser le bilan hydrique régional, jusqu'à plusieurs dizaines, voire centaines de milliers d'années.

Sédiments des estuaires et rivières

Ils sont constitués de matériaux érodés par le ruissellement et se caractérisent par leur granulométrie, leur composition minérale, leur teneur en eau et en matières organiques. Ils permettent d'étudier les variations de courant, les changements d'hydrologie, les pollutions anthropiques et les écosystèmes qui peuplent les rivières, sur des échelles de temps courtes.

Sédiments marins

Les sédiments déposés sur les fonds des bassins océaniques apportent de très nombreuses informations sur l'histoire du climat et de l'Océan. Les éléments terrigènes, issus des continents et transportés par les différentes masses d'eaux avant d'être déposés dans les fonds marins, permettent de caractériser les relations continents-océan (par exemple la variabilité des précipitations à terre) et de reconstruire la variabilité spatio-temporelle des courants de fond. Diverses échelles de temps sont étudiées, allant des variations climatiques rapides (dernière période glaciaire, **Holocène**) à celles liées au **forçage** orbital de la Terre. L'étude de la composition chimique et isotopique de coquilles d'organismes marins unicellulaires, les foraminifères notamment, permet d'estimer les variations passées de température, de salinité des océans et sa structure verticale. Dans ces sédiments se trouvent de petites particules qui enregistrent en continu les variations du champ magnétique terrestre. Par comparaison avec des courbes de références et par datation de points clés (voir encadré), elles constituent un outil de datation indépendant des variations climatiques.



Spéléothèmes

Ces formations résultent d'un lent processus de percolation des eaux souterraines, entraînant des dépôts de carbonate de calcium dans des grottes. Pour les dater, les chercheurs dosent principalement les isotopes de l'uranium ; cela permet de remonter de quelques millénaires au dernier million d'années.



Cernes d'arbres

Leur comptage permet de déterminer l'âge de l'arbre, mais aussi de caractériser les saisons, plus ou moins chaudes, humides... qui ont marqué sa croissance.

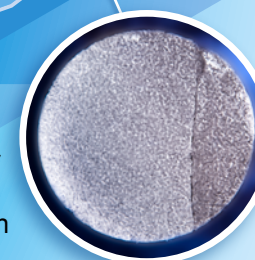


Coraux

Ils enregistrent les variations du niveau marin, les changements physico-chimiques, la température et la salinité des masses d'eau océanique, sur 50 000 ans environ.

Glaces polaires

Les chercheurs analysent la composition **isotopique** de la glace et les bulles d'air qui y sont piégées pour déterminer la température et la composition atmosphérique. Ils relèvent notamment l'abondance des gaz à effet de serre. La mission EPICA en Antarctique a ainsi montré que les fluctuations des concentrations en gaz à effet de serre sont parallèles à celles des températures depuis 800 000 ans. Les forages profonds réalisés au nord-ouest du Groenland par la mission NEEM ont permis d'extraire des carottes datant de 125 000 ans, durant la période chaude, appelée Eémien, qui a précédé la dernière glaciation.



Des archives pour dater

Les coulées volcaniques ne sont pas des archives du climat mais du champ magnétique terrestre. Ainsi la direction et l'intensité d'aimantation des laves, dont la datation est possible en mesurant leur teneur en argon et potassium. L'étude des coulées fournit donc des points d'encrage temporels aux enregistrements sédimentaires. Par ailleurs, les cendres de certaines éruptions volcaniques sont largement dispersées dans l'atmosphère avant de retomber et être sédimentées dans le milieu marin et/ou lacustre, fournissant ainsi des repères temporels.

En savoir +

• Livret pédagogique n°15 « Le Climat » et quiz à consulter et à commander sur le site www.cea.fr

Sur les traces du passé

Le climat est un système complexe mettant en jeu l'énergie reçue du Soleil et la réponse du système Terre : atmosphère, glaces, océans, végétation... Il varie naturellement, alternant épisodes chauds et épisodes froids, voire glaciaires. Plusieurs échelles de variations sont enregistrées dans les différentes archives naturelles, depuis les variations saisonnières jusqu'aux tendances à très long terme, sur plusieurs centaines de millions d'années.

En quête d'indices

Les observations directes issues, par

exemple, des stations météorologiques permettent de connaître l'évolution récente du climat mais ne permettent pas de remonter au-delà de quelques siècles. Pour remonter plus loin dans le temps, les techniciens, ingénieurs et chercheurs du **LSCE** prélèvent et analysent des archives naturelles (sédiment, eau, glace, roche, air, arbre...) dans lesquelles se sont imprimés les changements du climat passé. Ainsi, ils se déplacent dans les endroits les plus reculés de la planète pour recueillir leurs échantillons, mais consultent aussi les données consignées dans les

grimoires les plus divers, comme pour les dates des vendanges vieilles de six siècles.

Analyses croisées

L'étude des archives naturelles permet également de mesurer les impacts des changements climatiques sur différents écosystèmes, marins et terrestres. Toutes ces données servent donc à comprendre le système climatique et aussi à tester la capacité des gros modèles numériques complexes à restituer les climats du passé ; ceux-là mêmes qui sont utilisés pour simuler les évolutions futures du climat.

Lexique :

Forçage : Élément qui influe sur le bilan énergétique de notre planète. Il peut être naturel : configuration de l'orbite terrestre, composition atmosphérique, éruptions volcaniques ou anthropique : pollution, émission de gaz à effet de serre, déforestation, urbanisation...

Holocène : Époque géologique naturellement chaude s'étendant sur les 10 000 dernières années.

Isotopique : Tous les atomes d'un élément chimique donné ont le même nombre de protons, mais peuvent avoir un nombre de neutrons différent ; ce sont des isotopes. Ainsi, il existe le carbone 12, 13 et 14 (6 protons et 6, 7 ou 8 neutrons).

LSCE : Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, une unité mixte CEA-CNRS-Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ).

Du bateau au laboratoire, les principales analyses

Les échantillons sont analysés au laboratoire grâce à un ensemble d'instruments : spectromètres de masse et optiques, magnétomètres... Pour dater et quantifier des processus physiques, chimiques ou biologiques, les chercheurs ont recours à la mesure ultra-précise de leurs différentes caractéristiques (éléments chimiques et leurs isotopes, microfaune...).



Remontée du carottier à large section carrée sur le Marion Dufresne.



Carothèque à Gif-sur-Yvette.

Conservation en carothèque

Au fur et à mesure de leur prélèvement à bord du navire océanographique, les longues carottes sédimentaires (jusqu'à plus de 50 mètres !) font l'objet de premières mesures non-destructives avant d'être tronçonnées et ouvertes. Chaque tronçon de longueur standard (1,50 m) est référencé avant d'être conditionné et envoyé au laboratoire où il sera précieusement stocké et échantillonné.



Analyse par spectromètre de masse au laboratoire.

de remonter de 40 000 ans à quelques siècles. Les isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène sont quant à eux des traceurs des différents mécanismes naturels (évaporation, condensation...) liés notamment à la température.

L'analyse isotopique

La mesure des isotopes de l'environnement est un des moyens les plus efficaces pour l'étude des variations climatiques et de leurs effets sur l'environnement. Les méthodes de datation sont fondées sur la désintégration des radio-isotopes ou l'accumulation de leurs produits de filiation (uranium 234-thorium 230, potassium 40-argon 40 par exemple). La plus utilisée concerne le carbone 14 ; elle permet

Des centaines de carottes de sédiments marins sont ainsi entreposées dans la cave du château du CNRS à Gif-sur-Yvette. Les chercheurs effectuent ensuite des prélèvements à des endroits précis dans le sédiment afin de mener différents types d'analyses.

La datation au ^{14}C

Pendant sa vie, un organisme biologique équilibre sans cesse sa composition isotopique de son carbone avec celle du milieu ambiant. Après sa mort, ces échanges cessent : le ^{14}C qui se désintègre, disparaît progressivement de l'échantillon avec une demi-vie de 5 736 ans. La quantité restante dans l'échantillon permet donc de déduire la date de sa mort.

En savoir +

- Revue TDC n°1030 - « La radioactivité » éditée par Scéren-CNDP.
- Les Clés du CEA n°57 - « Terre et environnement » en ligne sur www.cea.fr

Des analyses complémentaires

Pour les océans

Les foraminifères sont des protozoaires marins caractérisés par leur squelette minéral, le plus souvent en carbonate de calcium. Ils forment un groupe de microfossiles marins parmi les plus abondants et diversifiés depuis des millions d'années. On retrouve leurs coquilles dans les sédiments au fond des océans. Le rapport oxygène 18/oxygène 16 de ces coquilles est fonction de la température et de la composition isotopique de l'eau de mer, qui elle-même dépend du volume des glaces sur les continents. L'étude de ces organismes est une branche de la **micro-paléontologie**. L'évolution des assemblages de foraminifères donne aussi des indications sur les changements de l'environnement (température, quantité d'éléments nutritifs...).

L'étude de la taille, de la nature, de l'organisation préférentielle et de la quantité des grains de minéraux magnétiques présents dans les roches sédimentaires permet de connaître leur provenance et d'estimer les variations et la force des courants qui les ont transportés. C'est le **magnétisme environnemental**. Ces minéraux, ainsi que les roches volcaniques, gardent également la trace de la direction et de l'intensité du champ magnétique terrestre. Ils délivrent donc des informations sur le comportement passé de ce champ, les renversements et **excursions** géomagnétiques. Le champ magnétique étant généré au sein du noyau terrestre, les changements sont globaux, indépendants des variations climatiques et fournissent une échelle de temps utilisée comme un outil géochronologique. C'est le **paléomagnétisme** et la **stratigraphie magnétique**. Le champ magnétique étant une propriété de notre planète, il n'y a pas de limite temporelle à cette discipline.



© S. Renard/CEA

Magnétomètre dans la chambre amagnétique du laboratoire.

Pour les lacs

Les sédiments lacustres sont des matières contenant des carbonates dont la teneur en isotopes de l'oxygène (oxygène 18 notamment) est analysée. Lorsque le lac est ouvert et à renouvellement rapide, la composition isotopique des eaux est la même que celles des précipitations, lesquelles dépendent à leur tour de la température. L'étude des lacs fermés est plus complexe car elle dépend de l'évaporation et de l'humidité atmosphérique. Les études isotopiques ont permis de reconstituer les conditions climatiques et hydrologiques en Europe centrale, Afrique du Nord et Amérique du Nord. Par exemple, les chercheurs ont trouvé trace de fluctuations humidité/aridité dans des dépôts lacustres du Sahara, région verdoyante il y a plus de 6 000 ans !

Pour les estuaires et les rivières

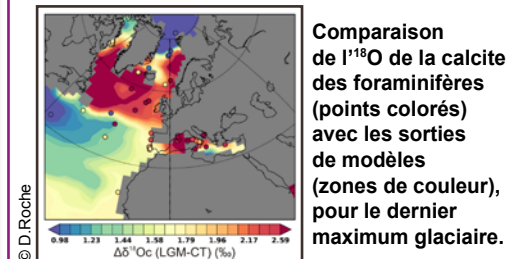
Les estuaires et les golfes sont des lieux d'échanges entre fleuves et océans. Les prélèvements sédimentaires qui y sont effectués donnent des indications sur la dynamique de ces échanges et les conditions atmosphériques des continents. Les grands fleuves asiatiques ont la plus grande charge **détritique** au monde. L'analyse de leurs sédiments permet par exemple, de cerner les conditions de pluviométrie à terre et de suivre le transport des particules par les différentes masses d'eau à différentes profondeurs, ces particules étant transférées à la Mer de Chine. Ces études peuvent ensuite servir de base pour comprendre la variabilité passée à la fois de la nature des sources terrigènes sur le continent et du transport océanique. Autre exemple, les séries sédimentaires qui se déposent dans le Golfe du Bengale constituent des enregistrements de la variabilité passée des moussons et de leur impact sur l'érosion de l'Himalaya.

Zoom

Les données recueillies alimentent les modèles

Les archives paléoclimatiques montrent que la Terre a connu des climats variés, différents de celui d'aujourd'hui. Un modèle est un outil d'expérimentation numérique qui permet d'explorer les périodes climatiques différentes ; non seulement d'identifier des différences entre deux périodes, mais aussi d'isoler les rôles respectifs des forçages et de certains processus. Il faut pour cela développer des outils spécifiques permettant de simuler chaque indicateur (isotopes de l'eau, carbone) dans tous les compartiments du système climatique (atmosphère, végétation, océan). Modéliser les climats passés permet d'améliorer la compréhension des processus conduisant aux changements climatiques pour mieux comprendre leur impact dans le futur.

Un autre volet nécessaire est la comparaison des différents résultats de modèles à l'échelle mondiale. Deux modèles français ont participé au dernier exercice international de comparaison de simulations des climats passés (**PMIP-3**), actuels et futurs (**CMIP5**), qui ont nourri le dernier rapport intergouvernemental sur le changement climatique.



© D. Roche

Comparaison de l' ^{18}O de la calcite des foraminifères (points colorés) avec les sorties de modèles (zones de couleur), pour le dernier maximum glaciaire.

Lexique :

CMIP5 et PMIP-3 : Coupled Model Intercomparison Project phase 5 – Paleoclimate Modelling Intercomparison Project Phase 3 – Projets internationaux proposant des protocoles communs pour réaliser des simulations climatiques et mettre à disposition les résultats.

Détritique : Qui provient de la désintégration de roches.

Excursion : Instabilité rapide du champ magnétique terrestre qui consiste en une diminution très significative de l'intensité accompagnée par un changement de direction et un retour très rapide à l'état initial.



© M. Klotz

« La construction des modèles est un travail collectif, chacun avec sa spécialisation. »

Didier Roche
Chercheur chargé de la simulation des données paléoclimatiques

Les Savanturiers : Sur quel modèle travaillez-vous ?

Didier Roche : La construction des modèles est un travail de groupe, avec plusieurs spécialisations (atmosphère, océan, continent, végétation) et beaucoup de moyens de calcul... pour reproduire le mouvement des fluides à la base du fonctionnement du climat.

Je ne construis pas de modèle de climat mais en utilise un qui existe déjà. J'introduis de nouvelles équations, basées sur la physique et la chimie, pour reproduire l'évolution de traceurs isotopiques sur une période de 10 000 à 100 000 ans ; ce qui permet de comparer le modèle avec les données réelles. Je travaille sur les isotopes de l'eau. Ce sont les traceurs parmi les plus intéressants en paléoclimatologie, car présents dans les glaces polaires, les océans, les rivières, mais aussi dans d'autres archives comme

les spéléothèmes ou les foraminifères marins. Les données sont générées en continu, ce qui constitue un grand stock de mesures, permettant nombres d'interprétations et comparaisons.

Existe-t-il des modèles de référence ?

Au niveau français, il y a 3 classes : les modèles « en boîte », simples et sur des grandes échelles de temps, ceux à complexité intermédiaire (que j'utilise), qui permettent de calculer sur des grandes périodes de temps, et enfin des modèles de circulation générale dérivés des modèles météo, avec des maillages fins.

Comment travaillez-vous avec les scientifiques de terrain ?

Ma formation de géologue m'est utile, par exemple pour comprendre le lien entre les changements de couleur dans un spéléothème et les processus physiques climatiques. L'interaction avec les « gens des données » se fait à plusieurs niveaux. On obtient des données, on émet des hypothèses. Il arrive parfois d'avoir des surprises, comme une hypothèse de travail qui n'est pas en cohérence avec les données ou le modèle. Par exemple, un changement abrupt de l'oxygène 18

lors de la dernière glaciation était interprété comme un changement de température. Nous avons mis en évidence qu'il fallait aussi prendre en compte des changements d'origine et de trajectoire de masses d'air.

Comment vos modèles permettent-ils de prévoir le climat futur ?

L'émission des gaz à effet de serre par l'homme est tellement exceptionnelle qu'il n'y a pas d'équivalent dans le passé. Des groupes de travail à l'échelle mondiale s'attachent à ce que les modèles décrivent le même processus physique afin de calculer l'évolution du climat et proposer des scénarios utilisés dans les rapports du Giec.

Formation :

- Bac S
- Université de mathématiques et informatique (2 ans)
- ENS : Terre, atmosphère et océan
- Master de mécanique des fluides-géophysique
- Thèse au LSCE et post-doc à l'Université d'Amsterdam

Quelle a été votre dernière mission ?

Elle m'a conduit en baie du Bengale, 3 semaines en mai 2012. Il y avait une cinquantaine de scientifiques à bord (dont 23 étudiants), de 6 laboratoires français et chinois. L'objectif était d'étudier la mousson indienne sur différentes échelles de temps : 1,4 million d'années et 100 000 ans (dernier grand cycle climatique). Ce qui caractérise les moussons sont les précipitations, les changements entre période sèche et période humide. Ont-elles été plus intenses ? Ont-elles évolué ? Nous avons ramené une quinzaine de carottes, des prélèvements d'eau de mer, du plancton vivant, des sédiments de surface...

Une anecdote ?

Cette campagne a été physiquement assez dure. Au départ à Singapour, le Soleil brillait mais sitôt arrivés en baie de Bengale, ça a été la purée de pois. Il y a eu des orages, une température étouffante et un niveau d'humidité élevé. Le plus dur était de déplacer sur le bateau les tronçons de carottes (1,50 mètre pour 15-20 kg). Mais il y avait une bonne ambiance, un bon dynamisme.

Formation :

- Bac S
- Master de géochimie-géophysique
- Thèse en paléocéanographie

Des programmes de formation

Le Marion Dufresne peut recevoir une centaine de voyageurs, d'où l'idée de proposer des formations à des étudiants et des enseignants du secondaire.

Les « **Universités à la mer** » sont constituées d'étudiants et d'un coordinateur des programmes. Par exemple des jeunes chinois qui, en plus d'aider aux carottages et aux premières mesures sur le bateau, ont bénéficié de conférences, rédigent des rapports, des posters, des compte-rendus...

Le programme **EGU-IPEV « Teachers at sea »** embarque des professeurs de différentes nationalités. Ils envoient des informations à un réseau mondial de collègues, sur la vie quotidienne et la partie technique de la mission. En complément, chaque année, un colloque organisé à Vienne accueille 80 enseignants pour 2 jours ½ de formation : conférences, activités... leur sont proposées.



© S. Vivier

Lors de la campagne Circea dans le nord de la Mer de Chine du Sud.

En savoir +

- Retrouvez ces interviews en vidéos sur www.cea.fr
- Le programme « Teachers at sea » sur le blog www.egu.eu/education/

Lexique :

EGU : European Geoscience Union

IPEV : Institut Paul Emile Victor



© M. Klotz

« Je suis partie sur tous les océans du globe ! »

Catherine Kissel
Chercheur géologue

Les Savanturiers : Quelle est votre spécialité ?

Catherine Kissel : Mon outil principal est le magnétisme, qui permet d'aborder de nombreux champs de recherche, dont la paléocéanographie. Cela consiste à étudier les particules magnétiques (nature, taille, concentration et agencement) contenues dans les sédiments. Elles apportent des informations sur les changements environnementaux des océans dans le passé. Les sédiments contiennent des éléments marins (plancton, foraminifères...) et des éléments érodés des continents, charriés par les fleuves puis déposés ou transportés par les masses d'eau entre les différents océans. En travaillant à proximité des continents ou au delta des grands fleuves, là où les sédiments s'accumulent vite, on essaie de comprendre la variabilité rapide du climat et le rôle des océans. La période de temps à laquelle on peut remonter dépend du sédiment ; s'il se dépose de 1 ou de 10 cm tous les 1 000 ans, pour une carotte de la même taille cela permet de remonter plus ou moins loin.



© P. Sangiardi

Catherine Kissel, à droite, lors de la campagne Pachyderme dans l'Océan Pacifique Sud-Est.

Formation :

- Bac S
- 1 an de classe préparatoire d'agronomie
- Master de géologie-géophysique
- Thèse au LSCE « Apport du paléomagnétisme à la compréhension de la construction des chaînes de montagnes récentes »

Climat : 5^e rapport du GIEC en 5 chiffres

Réchauffement de l'atmosphère, montée et acidification des océans... le dernier rapport du **GIEC** confirme l'évolution inquiétante du climat. Ce document compile près de 20 000 études de plus de 800 chercheurs ; 8 de ses rédacteurs travaillent au LSCE.



© C. Morel/Our Polar Heritage-CEA

95 %

Les climatologues sont sûrs à 95 % que l'activité humaine est la cause principale du réchauffement climatique observé depuis le milieu du XX^e siècle. L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (GES : dioxyde de carbone, méthane, CFC (chlorofluorocarbones) et oxyde nitreux) est l'indicateur de cette influence de l'activité humaine sur le climat.

-70 %

70 % serait la réduction nécessaire des émissions mondiales de GES en 2050, par rapport à leur niveau de 2010, pour maintenir la hausse moyenne des températures en dessous de 2 °C. Mais les émissions augmentent plus vite encore que lors des décennies précédentes et leur concentration atteint des niveaux sans précédent depuis au moins 800 000 ans.

4,8 °C

L'augmentation des températures moyennes à la surface de la planète devrait atteindre 4,8 °C à l'horizon 2100 (après une hausse de 0,85 °C en moyenne entre 1880 et 2012), dans le scénario le plus pessimiste, c'est-à-dire si les émissions de GES continuent à leur rythme actuel.

COP21 : Conférence Climat Paris 2015

En novembre 2015, la France présidera la 21^e Conférence des Parties de la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques. Cette échéance est cruciale : l'objectif est d'aboutir à l'adoption d'un premier accord universel sur le climat pour maintenir la température globale en deçà de 2 °C.

0,8 cm

Le niveau des océans pourrait s'élever de quasiment un mètre en 2100 par rapport à la période 1986-2005. En comparaison, les océans se sont élevés de 19 cm depuis la fin du XIX^e siècle.

Le protocole de Kyoto

Signé en 1997, il est entré en vigueur en 2005 en raison de ratifications tardives et prévoyait une réduction de 5 % des gaz à effet de serre en 2012 par rapport au niveau de 1990. Si cet objectif est loin d'être atteint au niveau mondial avec une augmentation globale de 34 %, il a été rempli par l'Union européenne, qui avait diminué ses émissions de 18 %. L'accord de 2011 à Durban, en Afrique du Sud, a prolongé ce protocole jusqu'en 2017.

54 %

Les émissions annuelles de CO₂ d'origine humaine (combustibles fossiles, production de ciment) sur la période 2002-2011 étaient de 54 % au-dessus du niveau de 1990.

Source : Le Monde.fr du 04/11/2014.

Sites :

CEA : www.cea.fr
CEA jeunes : www.cea.fr/jeunes
LSCE : www.lsce.ipsl.fr/
IPSL : www.ipsl.fr/Actualites/A-decouvrir/Le-climat-en-questions
Retrouvez les Savanturiers en version web : www.cea.fr/le_cea/publications/les_savanturiers/

Lexique :

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, créé en 1988 en vue de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles...
www.ipcc.ch/home_languages_main_french.



Éditeur : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, RCS Paris B 775 685 019
Directeur de la publication : Xavier Clément
Ont participé à ce numéro : Franck Bassinot, Catherine Kissel, Florence Klotz, Lucia Le Clech, Alain Mazaud, Didier Roche.
Infographies : Antoine Levesque
Création, réalisation et impression : NPO* - www.nepasoublier.fr - Décembre 2014
ISSN 2271-6262

Nous remercions Fabienne Chauvière d'avoir accepté que nous empruntions le titre de son émission.

