

LIRE L'AVENIR DU CLIMAT DANS LES GLACES DU PASSÉ

En montrant comment l'analyse des glaces polaires a permis de reconstituer le passé de notre climat, **Jean Jouzel** fait valoir le rôle crucial de ces recherches dans la lutte contre le réchauffement climatique.

CLIMATOLOGIE

Dans le cadre de notre partenariat avec l'Académie des sciences, des académiciens nouvellement élus présentent un éclairage sur l'actualité de la recherche scientifique dans leur discipline à travers leur expérience personnelle.

En octobre 1968, j'arrivais à Saclay pour y préparer une thèse au centre de recherche du CEA, le Commissariat à l'énergie atomique, aujourd'hui Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives ; cinquante ans plus tard, j'y suis toujours comme chercheur émérite. J'y ai effectué l'essentiel de ma carrière scientifique largement consacrée à l'analyse des neiges et des glaces, et des informations auxquelles celle-ci nous permet d'accéder.

Comme l'eau (H₂O), la glace est formée d'atomes d'hydrogène et d'oxygène, mais ceux-ci peuvent

être remplacés par leurs isotopes, des atomes presque semblables, différant seulement par le nombre de neutrons et donc par leur masse. Il y a, en très petites quantités, des molécules dans lesquelles l'hydrogène (H) est remplacé par de l'hydrogène lourd, appelé aussi deutérium (D), ou l'oxygène 16 (¹⁶O) par de l'oxygène 18 (¹⁸O). La concentration des molécules HDO et H₂¹⁸O – ou composition isotopique – varie d'une pluie à l'autre, d'une chute de neige à la suivante... Et ces variations ne doivent rien au hasard mais à des lois physiques qui font qu'elles dépendent directement de paramètres météorologiques, avec, en dehors des régions tropicales et équatoriales, une remarquable propriété : plus il fait froid, plus les précipitations sont

appauvries en molécules HDO et H₂¹⁸O. Nous avons là un véritable thermomètre isotopique qui permet aussi bien de reconstituer l'altitude de formation des couches successives d'un grêlon que le climat de l'Antarctique à partir de l'analyse de carottes de glace.

Tout cela, je l'ignore lorsque, jeune ingénieur chimiste frais émoulu de l'Escil, l'École supérieure de chimie industrielle de Lyon, j'arrive à Saclay chez Étienne Roth. Et je suis très surpris par le sujet de thèse qu'il me propose : étudier la formation de la grêle à partir de sa composition isotopique. L'idée est simple : les couches successives d'un grêlon sont formées à des altitudes, et donc à des températures, différentes. En conséquence, leur analyse isotopique permet de reconstituer l'histoire de leur formation. Ma thèse d'État se focalise sur l'analyse de gros grêlons – jusqu'à 8 cm dans leur plus grande dimension –, dont l'analyse isotopique montre qu'ils se forment au cours d'ascensions et de descentes successives.

800 000 ANNÉES DE CLIMAT DANS UNE CAROTTE

Thèse passionnante et enrichissante car elle familiarise avec la vie fort complexe des cumulonimbus. Gouttelettes, gouttes, cristaux de glace, grêlons y échangent leurs isotopes, ce qui me donne un goût prononcé pour leur modélisation. Cet intérêt ne m'a jamais quitté, d'autant que les premiers modèles de circulation générale de l'atmosphère voient alors le jour. Destinés à l'étude du climat, ils sont remarquablement adaptés à la modélisation de la répartition des molécules HDO et H₂¹⁸O. Je me suis beaucoup intéressé



PROFIL

Jean Jouzel est une grande figure de la lutte contre le réchauffement climatique. Vice-président, de 2002 à 2015, du groupe scientifique du Giec (organisation coprésidente du prix Nobel de la paix en 2007), directeur de recherche émérite au CEA et membre de l'Académie des sciences, il a notamment reçu la médaille d'or du CNRS en 2002 et le prix Vetlesen, le « Nobel des sciences de la Terre et de l'Univers », en 2012.

au cas de la neige avec l'objectif de mieux cerner le lien entre température de formation et composition isotopique.

Mais surtout, j'avais, pendant six ans, côtoyé les glaciologues Claude Lorius, mais aussi Dominique Raynaud et Robert Delmas formés, comme moi, au CEA. Ils me transmettent leur enthousiasme. À la fin de ma thèse, Claude Lorius suggère que je m'intéresse de plus en plus aux glaces polaires et de moins en moins à la grêle. Sa grande affaire, c'est l'Antarctique, avec l'objectif de remonter le plus loin possible dans le temps : plus on creuse, plus la glace est ancienne et son analyse est source inépuisable d'informations sur l'évolution passée de notre climat et de notre environnement.

Avec son équipe grenobloise, il m'entraîne dans cette exceptionnelle aventure scientifique qui, dès la fin des années 1970, permet de couvrir les 40 000 dernières années grâce à un forage réalisé au site du dôme C en Antarctique de l'Est. Au début des années 1980, le forage soviétique de Vostok couvre 150 000 ans, soit un cycle glaciaire-interglaciaire complet. L'analyse de l'air piégé dans cette glace permet à nos collègues grenoblois, Dominique Raynaud, Jean-Marc Barnola et Jérôme Chappellaz, de reconstituer sur l'ensemble

de cette période les variations des concentrations en dioxyde de carbone, CO_2 , et en méthane, CH_4 . À la clé, la mise en évidence d'une corrélation entre la température, déduite de l'analyse isotopique de la glace, et les concentrations de ces deux gaz à effet de serre, plus faibles en période glaciaire très froide qu'en période interglaciaire au climat assez analogue à celui que nous connaissons aujourd'hui. Cet enregistrement sera ensuite étendu aux 400 000 dernières années. Dans les années 2000, le forage européen réalisé au dôme C permet de doubler la mise et de documenter sur 800 000 ans la succession des périodes glaciaires et interglaciaires et le lien toujours aussi étroit entre climat et gaz à effet de serre. Les résultats confirment que le rythme de ces grandes glaciations est gouverné par la position de la Terre sur son orbite autour du Soleil et indiquent que les variations de l'effet de serre jouent un rôle d'amplificateur. Et que jamais sur cette période les concentrations de CO_2 et de CH_4 désormais influencées par nos activités n'ont été, et de loin, aussi élevées qu'aujourd'hui.

ANNÉES 1980, LA PRISE DE CONSCIENCE

Au début des années 1990, j'ai la chance de participer à une autre découverte également pertinente vis-à-vis de l'évolution future de notre climat. Les forages réalisés au centre du Groenland par les équipes européennes et américaines confirment l'existence de changements climatiques importants, supérieurs à 10°C , qui surviennent à l'échelle d'une vie humaine, voire beaucoup moins. La mise en évidence de ces variations rapides donne naissance à la notion de « surprise climatique » et nous interroge sur la stabilité de notre climat dans un contexte de réchauffement lié aux activités humaines.

Les années 1980 sont celles de la prise de conscience des problèmes que pose l'augmentation de l'effet de serre liée à nos activités. Les résultats obtenus sur les glaces de Vostok y contribuent. En 1988, cette prise de conscience conduit à la création du Giec, le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat. Je m'y suis impliqué de 1994 à 2015, comme auteur puis comme membre du bureau, vice-président de son groupe scientifique, avec cette conviction que porter un regard sur le passé de notre climat est indispensable pour appréhender correctement son »

«Années 1990, une étude confirme l'existence de changements importants (supérieurs à 10°C) et rapides: cette "surprise climatique" nous interroge sur la stabilité de notre climat dans un contexte de réchauffement lié aux activités humaines.»

» évolution future. Cette idée semble désormais aller de soi, mais cela n'a pas été sans mal.

Le constat du Giec est sans ambiguïté : un réchauffement sans équivoque affecte toutes les composantes du système climatique – atmosphère, océan, neiges et glaces. Il est sans précédent sur plus d'un millénaire et une large part de celui observé depuis les années 1950 est liée de façon quasi certaine à nos activités. Mais, ce sont surtout les projections qui interpellent. Si rien n'était fait pour diminuer nos émissions de gaz à effet de serre, nous irions à l'horizon 2100 vers un réchauffement moyen compris entre + 4 et + 5 °C. Ce sont les jeunes d'aujourd'hui qui auraient à y faire face – acidification de l'océan, intensification des événements extrêmes et phénomènes irréversibles comme la montée des océans et la fonte du permafrost. Les impacts d'un réchauffement non maîtrisé iraient bien au-delà : difficultés d'accès à l'eau, perte de biodiversité, problèmes de pollution et de sécurité alimentaire, risques pour la santé... en seraient exacerbés. Ce lien indéniable entre évolution du climat et détérioration de notre environnement a été pour beaucoup dans ma prise de conscience de l'urgence de l'action.

VERS UNE SOCIÉTÉ SOBRE EN CARBONE

L'accord de Paris devrait permettre d'éviter ce scénario pour lesquels tous les voyants sont au rouge mais, dans sa forme actuelle, il nous emmène au-delà de + 3 °C en 2100. Il faut en remonter très sérieusement l'ambition si nous voulons en respecter l'objectif : contenir le réchauffement nettement en dessous de + 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels, en pour-

suivant l'action pour le limiter à + 1,5 °C. Publié début octobre, le rapport spécial du Giec, dans la rédaction duquel ma collègue Valérie Masson-Delmotte s'est fortement impliquée, montre que chaque demi-degré compte. Par rapport à + 1,5 °C, un climat à + 2 °C ce sont des événements extrêmes plus intenses, une montée du niveau de la mer plus importante, une perte de biodiversité et des risques d'extinctions multipliés par deux, la disparition annoncée des récifs de coraux tropicaux et une chute plus importante du tonnage des pêcheries. Limiter le réchauffement à + 1,5 °C par rapport à + 2 °C pourrait réduire de plusieurs centaines de millions les personnes exposées aux risques climatiques et susceptibles de basculer dans la pauvreté.

Cela implique de réduire les émissions mondiales de CO₂ de 45 % en 2030 par rapport au niveau de 2010, d'atteindre la neutralité carbone en 2050 et d'extraire du CO₂ de l'atmosphère tout au long du XXI^e siècle. Ce n'est pas impossible et peut aller de pair avec l'amélioration de la qualité de vie de tous, mais demande des transitions sans précédent dans tous les aspects de la société.

Des progrès rapides ont été réalisés dans certains secteurs, notamment dans celui des énergies renouvelables. Il faudrait des progrès aussi rapides dans d'autres secteurs, en particulier les transports et l'aménagement du territoire. Comme nous le soulignons dans le pacte finance-climat européen (1) que nous avons lancé avec Pierre Larrourou, cette transition vers une société sobre en carbone requiert des investissements très importants. Inéluctable, elle est aussi créatrice d'emplois – de 600 000 à 900 000 en France –, porteuse de dynamisme économique et devrait être attractive pour les jeunes car recherche, inventivité et innovation seront au cœur de cette transition énergétique et écologique. ★

(1) Site Internet : www.pacte-climat.eu

Le site de l'Académie des sciences : www.academie-sciences.fr

Les rapports du Giec sont disponibles sur le site www.ipcc.ch (en version française pour les résumés pour décideurs et les résumés techniques).



« **Quel climat pour demain ?** 15 questions-réponses pour ne pas finir sous l'eau », de Jean Jouzel et Olivier Nouaillat, Dunod, 2015.



« **Nouveau Climat sur la Terre. Comprendre, prédire, réagir** », d'Hervé Le Treut, Flammarion, 2009.



GETTY IMAGES/ISTOCKPHOTO

« Si rien n'était fait nous irions à l'horizon 2100 vers un réchauffement compris entre + 4 et + 5 °C... Ce lien indéniable entre évolution du climat et détérioration de notre environnement a été pour beaucoup dans ma prise de conscience de l'urgence de l'action. »