

de s'élargir et de progresser vers le Sud par sauts successifs ; elle est limitée par le chevauchement (C). Ainsi, depuis le début de sa formation, l'Himalaya a fonctionné comme un prisme d'accrétion crustal (accumulation de lambeaux de croûte dans une zone triangulaire, voir la figure 2). Et pour la première fois, la déformation affecte l'Asie, avec un chevauchement (C') vers le Nord, qui correspond à une subduction continentale qui plonge vers le Sud. La chaîne s'est donc encore élargie et présente une allure en éventail dissymétrique.

Quel est le mécanisme qui a permis d'aboutir à cette structure générale de la chaîne ? Dès le début de la collision, le continent indien a été soumis à des forces compressives d'autant plus importantes que l'on se rapprochait du contact Inde-Asie. En raison de sa faible densité (2,7) par rapport à celle du manteau (3,3), la croûte ne peut être entraînée à grande profondeur, et elle se désolidarise du manteau plus dense et plus rigide. En avant du chevauchement himalayen, à intervalles réguliers, les forces tectoniques atteignent le seuil de rupture des roches en provoquant des séismes. De nouvelles failles apparaissent par cassures successives, et le prisme d'accrétion s'élargit.

Actuellement, au stade 4, le continent indien n'est ébréché que par quelques séismes rares, mais de forte puissance, tels ceux de Kutch et de Bhuj. Un séisme encore plus puissant s'est produit en 1897 dans l'Est du continent indien, sur le versant Sud du massif de Shillong, à 200 kilomètres du front de l'Himalaya. Ce séisme de magnitude 8,7 s'est manifesté par une faille de chevauchement Est-Ouest et un ressaut de plus de dix mètres de haut (plus haut que le Mur de Dieu !)

Comme, aujourd'hui, le front himalayen s'avance vers le Sud à une vitesse de deux centimètres par an, il ne tardera pas à absorber le massif de Shillong, dans à peine cinq millions d'années. Revenons à l'Ouest ; les séismes de Kutch et de Bhuj sont à environ 1 000 kilomètres du front himalayen ; celui-ci n'avancera pas aussi loin, mais cette partie de l'Inde sera profondément modifiée, car le continent indien aura certainement continué sa marche tranquille à la même vitesse qu'aujourd'hui, soit cinq centimètres par an, 500 kilomètres en 10 millions d'années.

Les failles de Kutch et de Bhuj pourraient être une préfiguration d'une grande faille (nouvelle cassure D) qui coupera le Nord-Ouest de l'Inde et qui finira par rejoindre vers l'Est le front d'une chaîne himalayenne qui aura beaucoup changé et qui aura bien avancé vers le Sud.

Hervé PHILIP et Maurice MATTAUER

Nouveau thermomètre intergalactique

Des astrophysiciens ont mesuré la température du fond diffus cosmologique dans un nuage intergalactique lointain.

La théorie du Big Bang stipule que notre univers est issu d'une gigantesque explosion primordiale et que, depuis, son rayon croît et sa température diminue. Il y a environ 15 milliards d'années, cette température est passée au-dessous d'une valeur critique telle que les électrons et les protons ont pu se combiner. L'Univers est devenu transparent, car les photons ont cessé d'interagir avec le mélange des particules qui emplissait l'Univers primordial. Un gaz de photons s'est maintenu dans tout l'espace. Ce gaz que les astrophysiciens nomment le fond diffus cosmologique se refroidit selon une loi décrite par la relativité générale : la température du cosmos décroît comme l'inverse du rayon de l'Univers. Une nouvelle évaluation de cette température vient d'être réalisée par Patrick Petitjean de l'Institut d'astrophysique de Paris, Cédric Ledoux de l'Observatoire européen austral et Raghunatan Srianand du Centre interuniversitaire pour l'astronomie et l'astrophysique de Pune, en Inde.

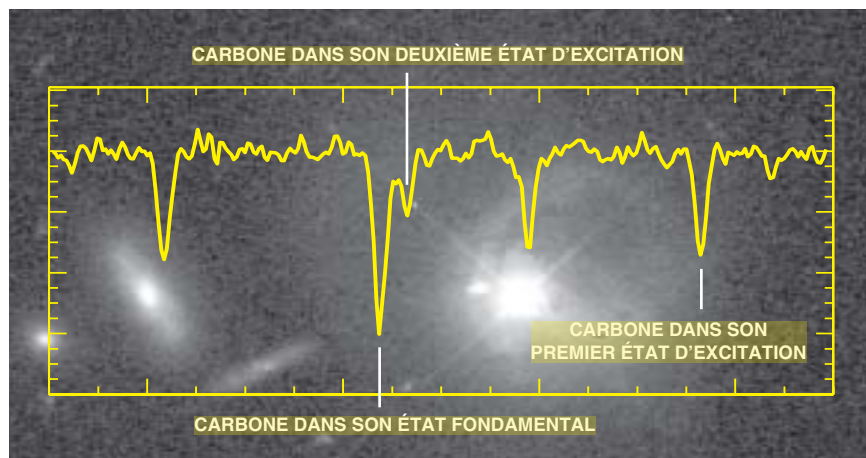
La loi de refroidissement constitue l'un des piliers du modèle cosmologique standard, la théorie cosmologique acceptée aujourd'hui. Découvert fortuitement par

Arno Penzias et Robert Wilson en 1965, ce « rayonnement fossile » a pu être mesuré il y a une dizaine d'années par le satellite COBE, et le résultat était en parfait accord avec ce que prévoit le modèle cosmologique standard.

Toutefois, il n'a été testé qu'au voisinage immédiat de la Terre. Il se pourrait que le rayonnement perçu sur la Terre n'existe que dans son voisinage, ou dans celui de la galaxie. Il s'agirait alors non pas d'un fond cosmologique, qui, par définition, doit être présent dans tout l'Univers, mais d'un fond local qui créerait, dans notre voisinage, l'illusion d'une explosion primordiale. P. Petitjean et ses collègues viennent de lever le doute.

Ils ont découvert un moyen indirect de mesurer la température du fond diffus cosmologique dans les nuages du milieu intergalactique situés sur le chemin qui nous sépare des quasars. Les quasars (en anglais *quasi stellar objects*, c'est-à-dire objets quasi stellaires) sont des objets très lumineux situés aux confins de l'Univers observable, qui seraient en cours d'effondrement dans un trou noir. Pour évaluer cette température, les astrophysiciens utilisent le fait que des nuages de gaz composés d'éléments divers se trouvent sur l'axe qui nous relie à ces géants éloignés. Ainsi, ils ont découvert la présence de raies d'absorption dans le rayonnement qui nous parvient du quasar PKS1232+0815. Ces raies sont les signatures spectrales des éléments chimiques présents dans le nuage intergalactique analysé.

Les électrons superficiels des atomes responsables de ces raies ont subi des transitions qui les ont fait passer de leur



Les trois formes du carbone présent dans le nuage intergalactique analysé (neutre et dans deux états d'excitation) ont des raies d'absorption différentes : au centre, la plus grande des raies est celle du carbone dans son état fondamental ; les trois raies de taille voisine qui entourent la grande raie sont celles du carbone neutre excité dans son premier niveau d'énergie. Deux petites raies, l'une à droite de la grande raie centrale et l'autre à l'extrême droite, sont celles du carbone neutre excité dans un deuxième état d'énergie. Ces mesures montrent que le fond diffus cosmologique micro-onde a l'énergie et, par conséquent, la température adéquate pour faire passer les atomes de carbone présents dans ce nuage de leur état fondamental (raie principale) à leurs deux premiers états d'excitation. Ce spectre a été obtenu avec le spectrographe à haute résolution du télescope KUYEN de l'Observatoire européen austral au Chili.

état fondamental à un niveau d'énergie supérieur. Plusieurs mécanismes déclenchent de telles transitions, mais le plus fréquent est l'absorption de photons dont l'énergie correspond à celle du niveau excité. Les astrophysiciens ont constaté que le nuage qui entoure le quasar contient de nombreux atomes de «carbone neutre excité», c'est-à-dire comportant un électron dans son premier état d'excitation. Ils ont montré que seule la présence dans le nuage d'un rayonnement diffus à 10 kelvins pouvait expliquer l'énergie reçue par l'électron de ce carbone neutre excité.

Pour le prouver, les astrophysiciens ont estimé l'importance des mécanismes qui pourraient donner des signaux identiques à ceux du carbone neutre excité par le fond diffus cosmologique. Trois mécanismes – l'excitation des atomes de carbone par le rayonnement ultraviolet, leurs collisions avec des molécules d'hydrogène et leur collisions avec des électrons – devaient être pris en compte. P. Petitjean et ses collègues ont utilisé les raies du carbone ionisé et celles de l'hydrogène moléculaire pour estimer les quantités de carbone et d'hydrogène moléculaire

présents dans le nuage, ainsi que la densité et la température du nuage. Grâce à ces résultats, ils ont montré que les trois mécanismes concurrents ne peuvent, seuls, expliquer l'abondance du carbone neutre excité constatée dans le nuage. Ils en ont conclu qu'un fond diffus cosmologique y a aussi contribué et estimé que la température de ce rayonnement est comprise entre 6 et 12 kelvins, ce que prévoit la théorie de la relativité générale pour l'époque de l'émission de la lumière du quasar, il y a 15 milliards d'années.

Christophe PICHON

Des glaciers voués à la disparition

La fréquence accrue des épisodes El Niño accélère la fonte des petits glaciers des Andes tropicales

Contrairement aux glaciers alpins, qui fondent très peu en été et accumulent de grandes quantités de neige en hiver, les glaciers des tropiques fondent toute l'année dans leur partie inférieure, à cause de l'absence de saison froide marquée. De ce fait, ils sont particulièrement sensibles aux fluctuations climatiques. Quel sera leur devenir, dans le contexte actuel de réchauffement du climat ? Cette question est d'autant plus pré-occupante que l'approvisionnement en eau des régions andines dépend en grande partie des glaciers de la Cordillère. Bernard Francou et ses collègues de l'Institut de recherche pour le développement (IRD), ainsi que des glaciologues boliviens et équatoriens, ont montré que dans 10 ou 15 ans, un grand nombre de ces glaciers aura disparu.

Ils ont étudié le glacier de Chacaltaya, situé entre 5 100 et 5 400 mètres d'altitude, au Nord de la Bolivie, et celui de l'Antizana, entre 4 800 et 5 760 mètres, en Équateur. Par leur petite taille (inférieure à un kilomètre carré), ces glaciers sont représentatifs de ceux qui parsèment la Cordillère sous les tropiques. Depuis 1991 pour le premier, et 1995 pour le second, B. Francou et ses collègues évaluent chaque mois le volume de la glace dans la partie basse des glaciers : ils mesurent la hauteur émergente de balises fichées dans la glace et disposées en réseau dans cette zone du glacier. Ils ont ainsi estimé la différence entre la quantité d'eau reçue sous forme de précipitations solides et celle perdue par la fonte

et par la sublimation de la glace. Pour les périodes antérieures à ces mesures, les glaciologues ont réalisé ces «bilans de masse» d'après des photographies aériennes et des documents d'archives.

Les résultats montrent que l'avenir des petits glaciers andins est compromis. Depuis dix ans, Chacaltaya a perdu 1,4 mètre d'eau par an (l'équivalent en épaisseur moyenne d'eau répartie sur toute la surface du glacier du volume de la glace fondue). Entre 1991 et 1998, son épaisseur totale a diminué de 40 pour cent et son volume des deux tiers. Rien qu'entre 1992 et 1998, sa surface s'est rétrécie de 40 pour cent et ne représente plus, aujourd'hui, que 10 pour cent de celle de 1940. Si cette évolution se poursuit, Chacaltaya aura disparu d'ici 10 à 15 ans.

Antizana évolue de la même façon, mais à un rythme moins rapide : depuis 1956, il a perdu près du quart de sa surface. Dans les années 1990, les pertes d'eau se sont accrues, pour atteindre 0,6 mètre d'eau par an en moyenne.

Le recul des glaciers s'est-il intensifié récemment ? Des études plus anciennes portant sur d'autres glaciers andins de la zone tropicale, notamment au Pérou, montrent que l'accélération de ce phénomène date du début des années 1980. Les résultats obtenus sur Antizana et Chacaltaya le confirment : ce dernier a perdu 0,2 mètre d'eau par an entre 1940 et 1963, 0,6 de 1963 à 1983 et 0,9 depuis 1983. La surface de l'Antizana s'est, pour sa part, réduite trois fois plus vite entre 1993 et 1998 qu'entre 1956 et 1993. Globalement, la perte de volume d'eau des deux glaciers a été trois à cinq fois plus élevée au cours de la dernière décennie que pendant les précédentes.

En étudiant le contexte climatique de ce recul exceptionnel des glaciers, les glaciologues ont découvert qu'il était relié aux événements El Niño et La Niña, respectivement les phases chaudes et les phases froides d'un phénomène qui touche le climat global : les bilans mensuels sur

les glaciers montrent que la fonte a été maximale pendant ou juste après les événements El Niño, notamment les événements particulièrement intenses de 1991-1992 et de 1997-1998, qui ont encadré une période chaude anormalement longue de 1991 à 1995. En revanche, pendant les événements La Niña, la perte d'eau a diminué ou s'est arrêtée. C'est le cas d'Antizana, dont la fonte a pratiquement cessé depuis le milieu de l'année 1998, quand un événement La Niña s'est déclenché et a perduré. En 1999 et 2000, Antizana a même gagné de la glace, avançant de 40 mètres sur les pentes de la montagne. Ainsi, cette étude confirme que les glaciers proches de l'Équateur réagissent davantage et plus vite aux variations climatiques liées au phénomène El Niño que ceux de Bolivie ou du Pérou.

La même équipe a aussi étudié le glacier Zongo, proche de Chacaltaya en Bolivie, mais de plus grande taille et plus élevé (il culmine à 6 000 mètres) : il réagit de façon semblable aux oscillations climatiques du Pacifique. Ainsi, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements El Niño observée depuis plus de 20 ans, expliquerait, du moins en grande partie, la récente accélération du recul des glaciers tropicaux andins.



Le glacier Antizana, au Nord de la Bolivie.