

LA FONTE DES GLACIERS TROPICAUX

Bernard Francou, Pierre Ribstein, Bernard Pouyaud

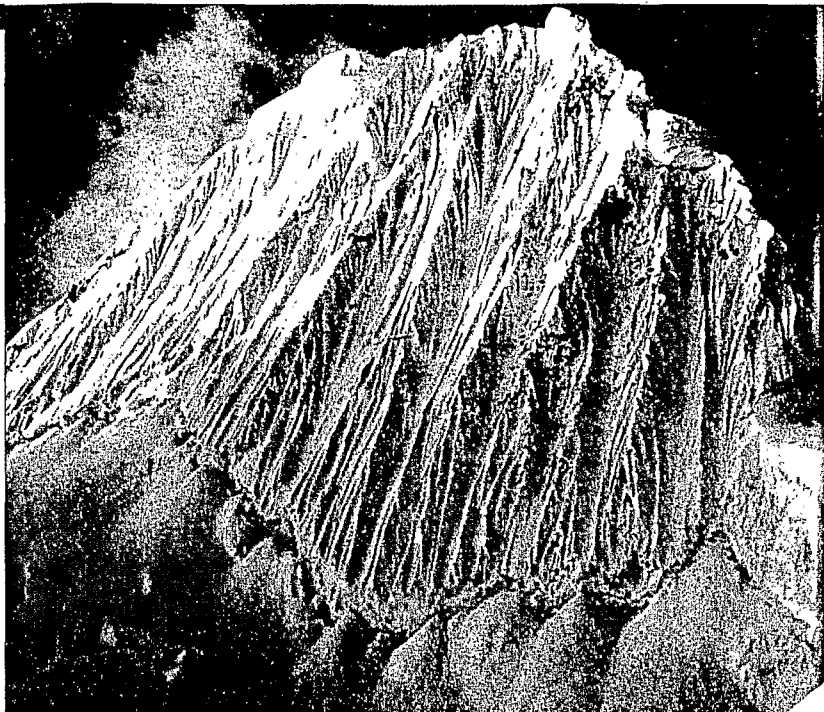
Ils comptent parmi les indicateurs les plus fiables d'un réchauffement global

**BERNARD FRANCOU,
PIERRE RIBSTEIN,
BERNARD POUYAUD**
Programme neiges et
glaciers tropicaux
ORSTOM-CNRS
CP 9214 La Paz
Bolivie.

Il existe des glaciers sous les tropiques, essentiellement dans les Andes : ils sont petits et très sensibles aux variations climatiques, ce qui les rend extrêmement fragiles. Les glaciologues constatent un net recul de ces glaciers depuis cent ans : certains ont ainsi perdu près des trois quarts de leur surface en moins d'un siècle. Un argument de poids pour les partisans de l'hypothèse du réchauffement climatique.

Les glaciers tropicaux, associés aux phénomènes sismiques et volcaniques, peuvent être extrêmement meurtriers^(1,2). Ils représentent aussi d'importantes réserves d'eau potable. Ils régulent le régime des cours d'eau en soutenant les débits pendant les 3 à 6 mois que dure la saison sèche, surtout les années à pluviométrie déficitaire. De grands territoires comme la côte désertique du Pérou et trois capitales, La Paz, Lima et Quito, dépendent en grande partie de ces glaciers pour leur alimentation en eau potable. Enfin, leur situation particulière, à de hautes altitudes et sous les tropiques, en fait de précieux auxiliaires pour les climatologues : à l'abri des variations locales du climat induites par les activités humaines, ils en subissent en revanche les influences globales, dans une zone où les échanges énergétiques entre le sol et l'atmosphère sont considérables.

Le fonctionnement des glaciers de montagne est bien connu. La glace se dépose en amont, dans la zone d'accumulation, grâce aux chutes de neige. Elle se déplace ensuite par gravité, vers l'aval où elle fond, sous l'action conjuguée du soleil, de la chaleur et des pluies : c'est la zone dite d'ablation. Une ligne d'équilibre imaginaire sépare ces deux zones : elle relie les points du glacier où les apports de glace (par glissement ou par chute de neige) compensent tout juste la fonte. Les glaciers enregistrent précisément les événements climatiques : variations dans les précipitations, les températures et l'hu-



midité atmosphérique, évolution des flux radiatifs. Cela se traduit par des changements importants dans la masse, le volume et la longueur des glaciers. Les glaciologues mesurent ces variations et cherchent à les relier à l'évolution du climat. A l'aide de carottes prélevées dans la partie haute des glaciers, ils reconstituent indirectement l'histoire du climat en étudiant les couches de glace qui se superposent année après année, comme les cernes d'un arbre.

Flûtes de glaces de l'Alpamayo (6 000m) dans la Cordillère blanche au Pérou. Sous les tropiques, la neige tombe au cours d'orages qui la plaquent sur des parois très raides. L'importance du rayonnement solaire crée les canelures caractéristiques : dans les creux, l'énergie est concentrée par réflexion des bords vers le centre, ce qui conduit à la fonte de la neige au milieu. Les bords, eux, fondent beaucoup moins vite et peuvent même augmenter de taille par accretion de givre. (Cliché Bernard Francou)

Une carotte de 140 m de long extraite d'un glacier bolivien va permettre de reconstituer le climat des quinze mille dernières années

La concentration relative des divers isotopes de l'oxygène ou de l'hydrogène donne des indications sur la température de l'air au moment des chutes de neige. Les poussières et les pollens permettent de reconstituer l'environnement régional et l'épaisseur des couches indique l'importance des précipitations. Plus longue est la carotte,

plus il est possible de remonter dans le temps. Lonnie Thompson et son équipe de l'Ohio State University viennent d'extraire une carotte de 308 m de long d'un glacier himalayen qui révèle 130 000 ans de climat tropical⁽³⁾. En juillet 1997, la même équipe appuyée par l'ORSTOM a extrait une carotte de 140 m de long au sommet du glacier bolivien du Sajama à 6 550 m d'altitude. Les archives climatiques incluses dans cette carotte vont permettre de reconstituer le climat des 15 à 20 000 dernières années.

A l'instar des glaciers alpins, les glaciers tropicaux témoignent des grandes

(1) L. Lliboutry et al., *Journal of glaciology*, 18, 79, 1977.

(2) A. Ames et B. Francou, *Bull. IFAA*, 24, 1, 1995.

(3) L.G. Thompson et al., *Science*, 276, 1821, 1997.

(4) L.G. Thompson et al., *Science*, 234, 1986.

(5) G. Kaser et al., *Z. Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 32, 75, 1996.

(6) B. Francou et al., *Bull. IFAA*, 24, 3, 1995.

(7) B. Francou et al., *Estudios glaciológicos*, ORSTOM-Bolivie, 1997.

(8) P. Wagnon et al., « Energy balance and Runoff seasonality of a Bolivian glacier », in *Earth-Ocean-Atmosphere, force of change*, IAMAS-IAPOS Joint Assembly, Melbourne, 1997.

*ALBEDO

Fraction des rayons du Soleil réfléchis par un corps, ici la neige. Il diminue rapidement sous les tropiques du fait de la poussière et de la prolifération des micro-organismes qui s'y développent.

... fluctuations climatiques à l'échelle du siècle. Il est ainsi apparu que la dernière crue glaciaire d'ampleur remonte au petit âge glaciaire, du XVI^e siècle au milieu du XIX^e siècle⁽⁴⁾. Le recul est observé depuis 1850, tant dans les Andes que dans les Alpes, mais il s'est brusquement accéléré sous les tropiques à partir du début des années 1980⁽⁵⁾.

A la différence de leurs cousins des Alpes, les glaciers tropicaux sont petits, d'une taille le plus souvent inférieure à 5 km². Ils ne possèdent pas ces fameuses langues glaciaires qui remplissent les vallées alpines, comme le glacier d'Alersch en Suisse ou la mer de Glace en France, même ceux dont la zone d'accumulation atteint les 6 000 m. Cela vient du fait que sous les tropiques la fonte est intense et s'exerce tout au long de l'année : au flux de chaleur sensible de l'air s'ajoute celui apporté par les pluies. Le bilan de masse varie rapidement avec l'altitude entre la ligne d'équilibre et le front du glacier : quand on descend de 100 m, la perte en eau augmente de 1 000 mm pendant l'année, alors qu'elle ne dépasse jamais

500 à 800 mm dans les Alpes. L'ablation croissant fortement vers le bas du glacier, elle a peu de chance d'être compensée par l'apport de glace qui s'écoule depuis la zone d'accumulation. Une première analyse a montré que les glaciers tropicaux sont surtout sensibles aux variations des températures : sur quinze ans, celles-ci expliquent 70% de la variance du bilan dans la Cordillère blanche⁽⁶⁾.

Un cas constaté de plus en plus fréquemment depuis le début des années 1980 : une remontée spectaculaire de la ligne d'équilibre de nombreux petits glaciers au point qu'ils perdent leur zone d'accumulation et que toute leur surface devient une zone d'ablation.

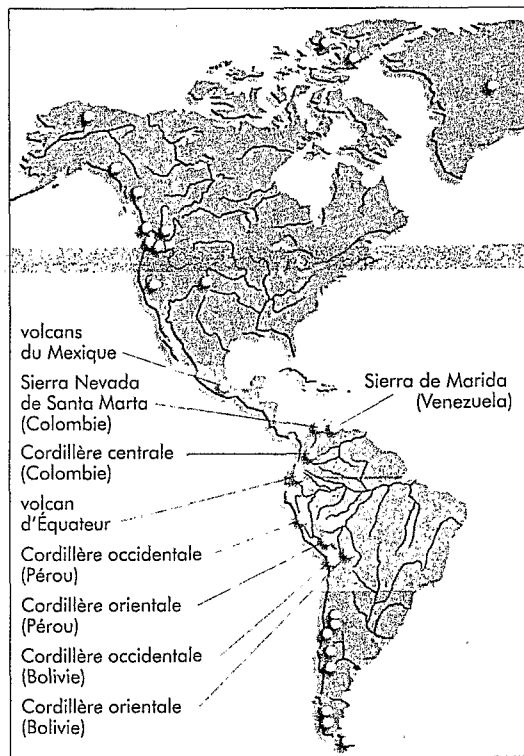
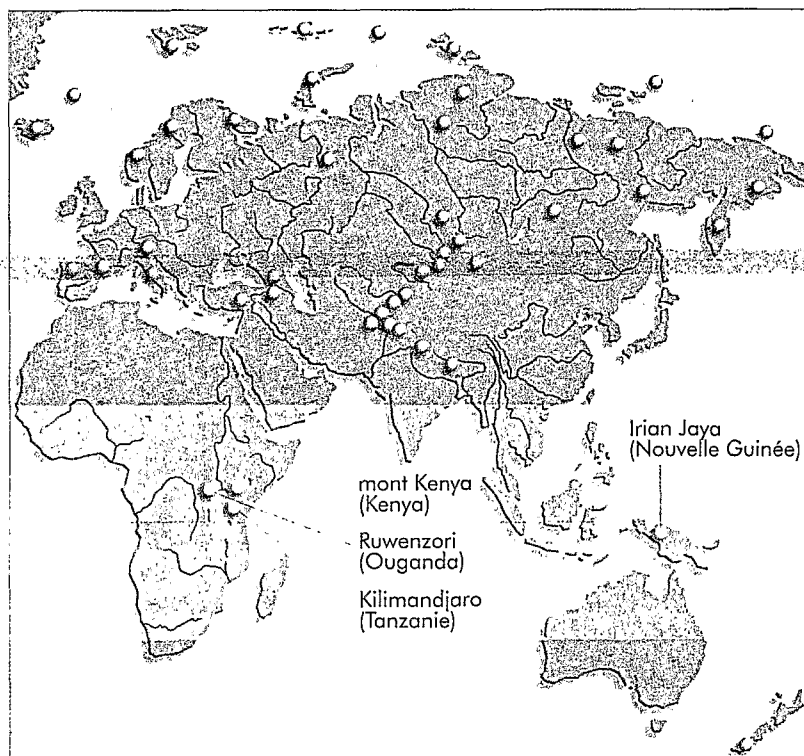
La partie basse du glacier est soumise à des températures positives, une humidité élevée et un albedo diminuant après chaque chute de neige

Cela donne des bilans de masse très défavorables. Ainsi le glacier de Chacaltaya, en Bolivie, situé à moins de 5 400 m d'altitude, perd actuellement un à deux mètres d'eau par an. Son épaisseur moyenne actuelle est de 15 m seulement : depuis 1991, il a déjà perdu le quart de son épaisseur, soit une couche de près de 5,50 m. Les prévisions les plus pessimistes prévoient la disparition de ce petit glacier (moins de

1 km²) dans les toutes prochaines décennies⁽⁷⁾.

Autre originalité : l'accumulation de neige sur les glaciers tropicaux s'effectue uniquement en été, pendant la saison humide, alors que dans le même temps, l'énergie rayonnée est la plus forte, le Soleil étant à la verticale des glaciers. Cela crée des conditions particulières d'accumulation et d'ablation à l'origine de paysages glaciaires spectaculaires, avec flûtes de glaces et corniches géantes typiques de la Cordillère blanche péruvienne. L'énergie disponible à la surface du glacier étant très élevée, la fusion transforme en quelques jours la neige fraîchement tombée en névé. Ce phénomène prend des mois voire des années dans les Alpes ou en Antarctique. Dans le même temps, la partie basse du glacier est soumise à des températures souvent positives, une humidité élevée et un albedo* diminuant très rapidement après chaque chute de neige. La neige fond donc très vite. L'ablation est particulièrement marquée les années où les chutes de neige sont faibles et espacées et le ciel plus clair. Notre équipe a mesuré des taux de fonte remarquables pouvant atteindre 1 m d'eau en un mois à une altitude de 5 100 m. Une légère modification de la température ou d'un terme ayant un rôle important dans le bilan d'énergie, comme l'humidité de l'air atmosphérique, et le glacier peut perdre rapidement d'importants volumes d'eau⁽⁸⁾. Le ...

La surface totale des glaciers tropicaux (2 800 km²) est inférieure à la surface des seuls glaciers alpins (2 900 km²). 99% d'entre eux se trouvent dans les Andes. Ils représentent moins de 5% des glaciers de montagne du monde et à peine 0,16% des glaces continentales (glaciers de montagne et calottes polaires).



PLANS D'EXPERIENCES

APPLICATIONS À L'ENTREPRISE
 Le meilleur protocole expérimental pour modéliser ou prédire une réponse en fonction de facteurs de variabilité.

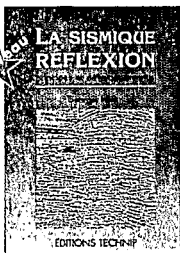
J.-J. DROESBEKE
 J. FINE,
 G. SAPORTA.
 Relié, 16 x 24,
 520 p. 350 F



LA SISMIQUE REFLEXION :

PRINCIPES ET DEVELOPPEMENTS
 Une présentation complète de la méthode géophysique la plus utilisée en exploration.

G. HENRY.
 Broché, 17 x 24, 192 p. 340 F



HIGH-PERFORMANCE POLYMERS
 CHEMISTRY AND APPLICATIONS

1. Conductive Adhesives

An up-to-date review of the electrically and thermally conductive adhesive technology. G. RABILLOUD. *Paperback*, 17 x 24, 376 p. 680 F



RAFFINAGE DU PÉTROLE

2. Procédés de séparation

J.-P. WAUQUIER. 16 x 24, 600 p. 780 F

3. Procédés de transformation

P. LEPRINCE. 16 x 24, 750 p. 790 F



PHYSICO-CHIMIE DES LUBRIFIANTS

ANALYSES ET ESSAIS

L'essentiel des méthodes d'analyses, d'évaluation et de contrôle des lubrifiants liquides. J. DENIS, J.-C. HIPEAUX, J. BRIANT. Relié, 17 x 24, 460 p. 650 F



TRAITEMENT DU SIGNAL POUR GÉOLOGUES ET GÉOPHYSIENS

Notions fondamentales, compréhension des algorithmes et modélisation. F. GLANGEAUD, J.-L. MARI, F. COPPENS. Broché, 17 x 24, 480 p. 480 F

THERMODYNAMIQUE

APPLICATION AU GÉNIE CHIMIQUE ET À L'INDUSTRIE PÉTRIOLÈRE

Propriétés thermodynamiques des fluides et équilibre de phases : méthodes de calcul, modèles et applications numériques. J. VIDAL. Relié, 17 x 24, 520 p. 680 F

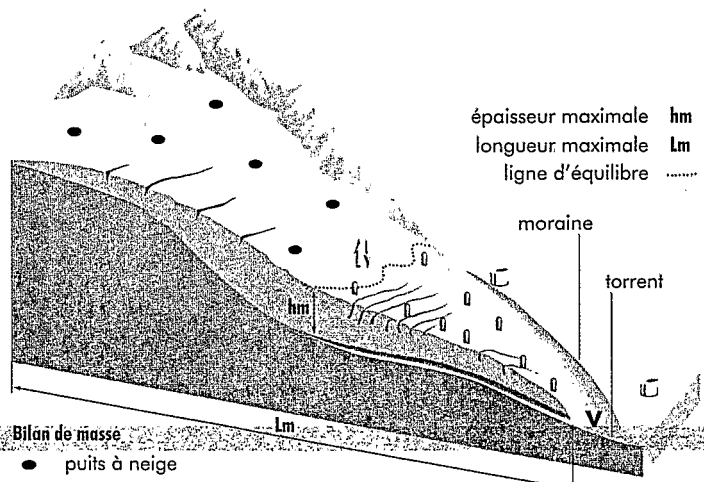
... glacier tropical ne dispose pas de cette sorte « d'assurance-vie » propre aux glaciers alpins : pendant les sept à huit mois que dure l'hiver, ces derniers sont assurés de récupérer une bonne partie de l'eau qu'ils abandonnent durant l'été, car il y a très peu d'ablation. Le bilan des glaciers alpins se joue sur une période cruciale courte, les trois ou quatre mois d'été, tandis que le bilan des glaciers tropicaux est dépendant d'une variabilité du climat qui s'étend sur toute l'année.

Dans la Cordillère blanche, les petits glaciers péruviens ont perdu 25 à 50% de leur longueur depuis les années 1950

Conséquence de leur extrême sensibilité aux variations climatiques, les glaciers tropicaux sont capables d'enregistrer des changements de courte durée comme les phénomènes ENSO (El Niño Southern Oscillation)*. C'est en quelque sorte un test grandeur nature de ce que pourrait devenir le climat des montagnes tropicales au cours d'un scénario de réchauffement

accélééré. On s'est aperçu que ces événements ENSO contrôlent le bilan des glaciers andins de deux façons. D'abord, en agissant sur les précipitations reçues par la cordillère au Pérou et en Bolivie, qui proviennent pour l'essentiel de l'Atlantique et du bassin amazonien. L'ENSO est d'abord connu pour les perturbations hydroclimatiques qu'il provoque dans le Pacifique. Ces perturbations ont des répercussions sur l'Atlantique Sud et le continent sud-américain en renforçant les hautes pressions sub-tropicales, ce qui affaiblit le déplacement d'air humide de l'Amazonie vers les Andes. La plupart des événements ENSO se marquent donc par un déficit hydrique plus ou moins important selon les cas : les chutes de neige se font plus rares. En carottant dans les glaces sommitales vers 6 000 m comme l'a fait Lonnie Thompson sur la calotte de Quelccaya au Pérou⁽⁹⁾, ou comme nous le faisons régulièrement en Bolivie, il apparaît que les strates de glace déposées pendant les années ENSO sont en effet plus minces et indiquent des précipitations plus réduites que la normale.

Ceci permet, avec d'autres données, comme les variations des isotopes de



Bilan de masse

- puits à neige
- balises d'ablation

Bilan énergétique

- ☀ rayonnement incident (réfléchi)
- ☀ bilan radiatif
- température, humidité, vent

Bilan hydrologique

- V station limnigraphique
- ☒ pluviomètre

Variations géométriques

- Variations de longueur (Lm) : topographie du fond
- Variations de vitesse : topographie des balises d'ablation
- Variations d'épaisseur (hm) : prospection géophysique (sismique-réfraction-radar)

Pour étudier l'impact du climat sur un glacier, il faut calculer :

- 1) le bilan de masse en évaluant à partir de mesures faites directement sur le glacier le gain ou la perte de volume d'eau qu'il subit au cours de l'année ;
- 2) le bilan hydrologique en comparant les volumes d'eau écoulés par le torrent émissaire avec les volumes d'eau apportés par les précipitations tombées au cours de l'année ;
- 3) le bilan énergétique en quantifiant les flux d'énergie à tout moment et en tout point du glacier et en déterminant comment cette énergie est utilisée dans l'ablation de la glace. Le glacier de Zongo, en Bolivie, est le seul actuellement sous les tropiques à bénéficier de ces trois types de mesures.

...

***ENSO (El Niño Southern Oscillation)**

Phénomènes climatiques dont les phases négatives perturbent les circulations océaniques et atmosphériques du Pacifique tropical. Ils durent un à trois ans et reviennent épisodiquement tous les deux à cinq ans. Voir *La Recherche* n° 280, octobre 1995.

***TROPOSPHÈRE**

Couche la plus basse de l'atmosphère, comprise entre 0 et 9 000 m d'altitude au niveau des pôles et 0 et 17 000 m sous les tropiques.

l'oxygène de la glace, d'identifier les événements ENSO historiques et de les dater. Mais les ENSO se caractérisent aussi par un échauffement inhabituel de la troposphère* au-dessus du Pacifique et des Andes et de toute la ceinture tropicale pour les événements de forte intensité. Les stations météo des hautes Andes enregistrent alors des augmentations de 0,5 °C à 1 °C⁽¹⁰⁾. Ces deux facteurs sont suffisants pour repousser les isothermes d'une bonne centaine de mètres en altitude. Plus d'ablation et moins d'accumulation : les bilans de masse des glaciers tropicaux deviennent fortement négatifs. Ainsi, en Bolivie ou au Pérou, la ligne d'équilibre des glaciers se situe, les années ENSO, 150 à 300 m au-dessus de sa position moyenne et les glaciers perdent au moins deux fois plus d'eau qu'ils n'en reçoivent par les précipitations⁽¹¹⁾. Très pénalisant pour la santé du glacier, qui puise ainsi dans son capital, cette situation a l'avantage de montrer le rôle régulateur des glaces dans les régimes hydrologiques : les cours d'eau descendant des glaciers maintiennent leur débit à un bon niveau, tandis que les autres sont à sec, faute de précipitations...

Le Pacifique et les Andes ont vécu, de 1991 à 1996, un événement ENSO exceptionnellement long, durant lequel la fonte des glaciers comme le Chacaltaya, a été particulièrement sévère. La situation s'est inversée en 1996 et les bilans que nous calculons actuellement sont plus équilibrés.

La vitesse à laquelle les glaciers tropicaux se retirent permet de se demander si l'on n'est pas déjà entré dans le scénario de réchauffement prévu par certains modèles climatiques⁽¹²⁾. Dans la Cordillère blanche péruvienne, les glaciers de petite taille étudiés (moins de 1 km de long) ont perdu 25 à 50% de leur longueur depuis les années 1950. Et ce recul s'est fortement accéléré à partir des années 1980, passant à des vitesses trois fois plus élevées. Nos mesures montrent une tendance identique en Bolivie, Cordillère royale, et en Équateur. Même accélération en Afrique, selon Stefan Hastenrath⁽¹³⁾, de l'université du Wisconsin, qui a étudié les glaciers du mont Kenya pendant plus de vingt ans : ces derniers ont perdu 75% de leur surface entre 1899 et 1987, mais le taux de recul annuel est passé de 0,8% par an entre 1899 et 1963, à 1,6% par an entre 1963 et 1987. Durant ces seules vingt-quatre dernières années, ces glaciers ont perdu 40% de leur surface.

Comprendre cette accélération du recul demande une analyse approfondie de la sensibilité des glaciers vis-à-vis des différents paramètres climatiques,

ce que l'on ne peut faire qu'avec un suivi étalé sur plusieurs décennies. Ainsi, Hastenrath a démontré que le retrait des glaciers du mont Kenya entre la fin du XIX^e siècle et 1963 est imputable à une baisse marquée des précipitations dans cette région d'Afrique, accompagnée d'une augmentation de la température de l'ordre de 0,3 °C.

En revanche, la perte plus élevée de 500 mm d'eau par an intervenue après 1963 serait due surtout à un renforcement en altitude de l'effet de serre par suite d'une augmentation de l'humidité atmosphérique. En effet, l'humidité agit comme un levier sur trois paramètres : sur le rayonnement infrarouge, qui est davantage absorbé par l'atmosphère, sur la température de l'air dont la chaleur se transmet à la surface du glacier, et sur les transferts de chaleur latente. Dans le bilan énergétique, l'humidité atmosphérique apparaît, de loin, comme le facteur prédominant.

Ces glaciers sont des plaques sensibles susceptibles de donner une image précise de l'évolution du climat de la planète

Or, c'est bien une augmentation de l'humidité qui a été mesurée par les météorologues⁽¹⁴⁾ au niveau de la moyenne troposphère de la ceinture équatoriale depuis 1965 : les quantités de vapeur d'eau supplémentaires mesurées sont suffisantes à elles seules pour expliquer l'accélération du retrait des glaciers du Kenya depuis 1963. Cet apport d'humidité est en relation avec le réchauffement global qui active les échanges entre l'océan et l'atmosphère. Une étude de sensibilité comparable est en cours dans les Andes et on a déjà pu observer, grâce aux événements ENSO, que l'activation des échanges sur un océan surchauffé intervient puissamment sur le bilan des glaciers de la région.

Quelle est l'importance de l'humidité, de l'énergie rayonnée par le Soleil ? Quels sont les jeux respectifs des températures et des précipitations ? Comment démêler les facteurs qui font évoluer si rapidement les glaciers tropicaux et en extraire les éléments clés ? Beaucoup d'interrogations subsistent à propos de ces glaciers, car ils restent les moins connus de la planète. Ce sont pourtant de véritables plaques sensibles capables de nous donner en temps réel une image haute résolution de l'évolution climatique de toute la ceinture tropicale et, partant, de la planète entière.

B.F., P.R. et B.P. ■

3IP


présente en
exclusivité

Compilateurs
Parallèles PGI*

HPF/F90

C/C++

F77

*The Portland Group Inc.
Pour Cray, Sun, SGI,
HP, IBM, Intel et
Pentium Pro

Retrouvez 3IP
NAg Ltd et PGI à ...

La Semaine de la
Physique 97

Paris 7-8-9 octobre

Hall 7/1-stand F80

...et sur le web

www.3ip.fr

3IP-Groupe CS

104 rue Castagnary

75015 Paris

Tél 01 53 68 99 00

Fax 01 53 68 99 01

Email produits@3ip.fr

(9) L.G. Thompson et al., *Science*, 226, 1984.

(10) B. Francou et al., *Journal of Glaciology*, 41, 137, 1995.

(11) P. Ribstein et al., *Journal of Hydrology*, 165, 1995.

(12) S. Hastenrath et P.D. Kruss, *Annals of Glaciology*, 16, 1992.

(13) A.P. Hense et al., *Meteorol. Atmos. Phys.*, 38, 4, 1989.

La Recherche a publié :

(1) Hervé Le Treut, « Climat : pourquoi les modèles n'ont pas tort », mai 1997.

LA RECHERCHE

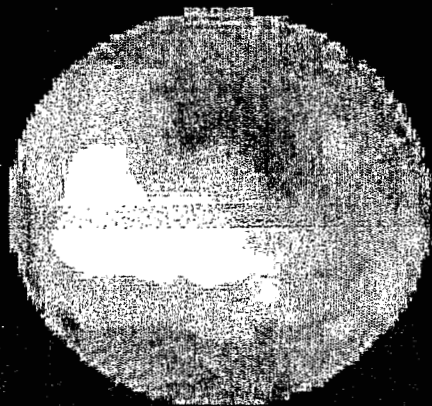
Le cannabis, une drogue comme les autres? p 32

DOSSIER

Aux origines de la diversité humaine

LA SCIENCE ET LA NOTION DE RACE

p 55



Objectif TITAN, petite
Terre en hibernation
autour de Saturne

p 42

MONTAGNE PELÉE un nouveau scénario catastrophe p 48

La science omnivore d'Alexander von Humboldt p 90

