

Rampe ou enveloppes ?

De nouvelles hypothèses remettent en cause l'utilisation de rampes pour la construction des pyramides d'Égypte.

Vous êtes l'architecte du pharaon Khéops et, il souhaite pour tombeau la plus grande pyramide jamais construite. Ses désirs étant des ordres divins – votre tête est en jeu – vous convoquez aussitôt votre cabinet d'étude pour réfléchir au problème. Comment peut-on assembler des milliers de blocs de calcaire de 2,5 tonnes et 90 blocs de granit de 25 tonnes ?

Les égyptologues se perdent encore en conjectures sur les méthodes des architectes égyptiens. Deux écoles s'opposent. La plus répandue propose la construction d'une rampe inclinée progressivement rehaussée et prolongée, sur laquelle des hommes tiraient les blocs de pierre. Selon la deuxième, des machines en bois utilisant le principe du levier hissaient les blocs de pierre d'une

couche horizontale à l'autre. Parmi les tenants de la thèse «machiniste», l'architecte Pierre Crozat a récemment proposé un système en accord avec les écrits de l'historien grec Hérodote (-484 ; -420).

Les partisans des rampes se réfèrent aux textes de Diodore de Sicile (premier siècle avant notre ère). La plus répandue des théories «rampistes» est due à l'égyptologue français Jean-Philippe Lauer qui indique qu'une rampe frontale rectiligne est le système d'érection de la pyramide de Khéops le plus probable (voir la figure). Ses détracteurs opposent le gigantisme nécessaire de cette rampe. En 1983, l'égyptologue Georges Goyon a proposé une rampe hélicoïdale qui enveloppe la pyramide à mesure qu'elle croît. Le volume de cette rampe, qui bénéficie de l'appui de la pyramide, est plus petit que celui de la rampe frontale. Néanmoins, le millier d'hommes nécessaire pour tracter un bloc de 25 tonnes devait manœuvrer difficilement dans les virages à angle droit.

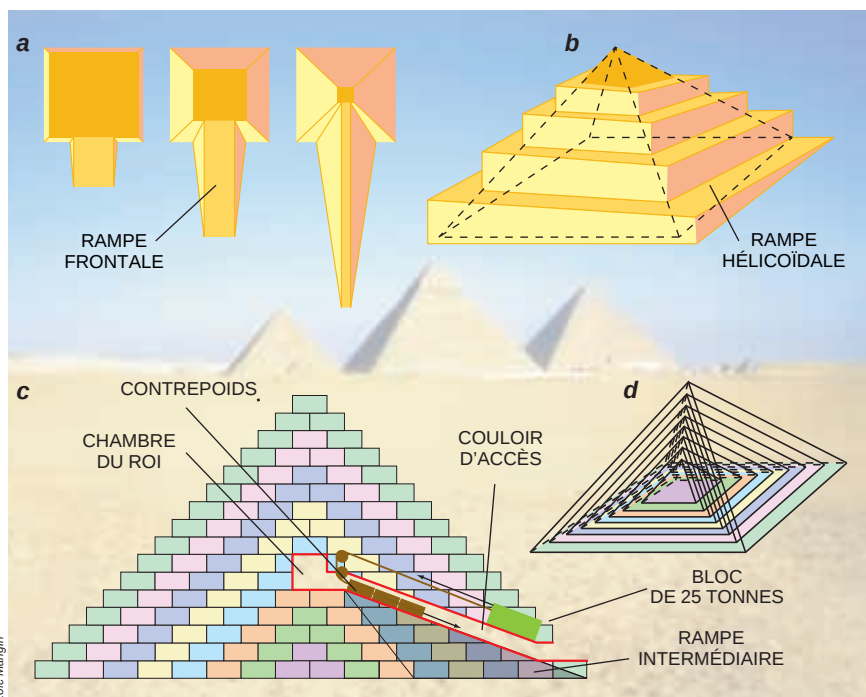
Hérodote évoque, dans *Histoires II*, des pierres utilisées tantôt comme *kro-saï*, c'est-à-dire, en grec, des pierres en surplomb qui dépassent de celles sur lesquelles elle sont posées, tantôt comme

bomides, des pierres d'appui. Ces pierres étaient soulevées par des leviers de bois. P. Crozat a reexaminé ce texte et observé l'agencement des blocs rocheux au sommet et sur les arêtes endommagées de la pyramide de Khéops. Il propose que la pyramide a été construite par juxtaposition d'enveloppes successives (voir c et d sur la figure) : une petite pyramide a été recouverte d'une couche de pierres pour former une nouvelle pyramide un peu plus grande ; puis une nouvelle couche uniforme a été ajoutée à la manière des enveloppes successives d'un oignon. D'une pyramide de cinq blocs (un bloc posé au-dessus de quatre autres arrangés en carré), on construit par ce système récurrent une pyramide qui atteindra, par exemple, les 147 mètres de hauteur de la pyramide de Khéops. Lorsqu'une pierre est soulevée et posée, elle sert d'appui pour la suivante.

Cette théorie expliquerait aussi la construction des couloirs internes qui mènent à la Grande galerie, à la chambre du roi et à la chambre de la reine : sur un côté d'une pyramide intermédiaire (la pyramide orange de la figure c), des ébauches des futures enveloppes sont construites de moins en moins hautes (les blocs sombres de la figure c). Elles créent ainsi une rampe qui devient le plancher du couloir d'accès, lorsque les enveloppes rocheuses sont complétées. Selon P. Crozat, des contrepoids qui glissaient dans cette galerie hissaient les blocs de granit de 25 tonnes. Placés au-dessus de la chambre du roi, ces blocs répartissent la pression exercée par le haut de la pyramide et évitent ainsi l'écrasement de la chambre. Une fois tous les blocs de granit hissés, les contrepoids ont été laissés en place pour obstruer le couloir.

Une vue aérienne du plateau de Gizeh montre que chacune des pyramides est située dans une dépression. De ce constat, ainsi que de la concordance d'orientation de la pyramide avec les fracturations du sol, qui suivent l'une des diagonales, l'architecte propose que les pierres des pyramides ont été prélevées sur le lieu même des constructions. De la même manière que la terre retirée pour creuser un fossé forme un talus à proximité, les pierres ont été prélevées et taillées sur le site de la pyramide.

Depuis 4 500 ans, les pyramides d'Égypte gardent le secret de leur construction et défient la sagacité des historiens. La question a-t-elle enfin sa réponse ?



Selon certains égyptologues, une rampe a été utilisée pour hisser les pierres d'une couche à une autre : elle a pu être frontale (la figure a montre trois étapes de la construction) ou hélicoïdale (b). Pierre Crozat propose un système où, par un mécanisme récurrent, une pyramide est progressivement enveloppée de couches régulières de pierres (c et d). Cette hypothèse permet la construction d'une rampe intermédiaire (blocs foncés de la figure c) qui devient, lorsque les enveloppes rocheuses sont complétées, le plancher du couloir d'accès. Dans celui-ci, des contrepoids (en marron) glissaient pour hisser des blocs de 25 tonnes (en vert).

Une minimouche

La mutation d'un gène montre que la croissance et la prolifération cellulaire sont indépendantes.

Chez certaines espèces de fourmis, lorsqu'une colonie devient trop importante, elle se scinde en deux et chacun des groupes prend possession d'un nouveau domaine. Cependant, en deçà d'un nombre critique d'individus, le groupe reste uni. Après des expériences sur les levures, les biologistes pensaient que toutes les cellules ont un comportement similaire : elles déclenchent le processus de division, nommée mitose, seulement après avoir atteint une taille critique. Or, Jacques Montagne, de l'Institut Friedrich Miescher, à Bâle, a montré que l'absence d'une protéine, nommée S6 kinase, déclenche, chez la drosophile, la division des cellules avant qu'elles n'aient la taille normale : les mécanismes de croissance et de division sont indépendants, l'un pouvant être perturbé sans que l'autre le soit.

La S6 kinase, présente également chez les mammifères, est une enzyme qui active la synthèse des ribosomes, c'est-à-dire des petits éléments cellulaires qui fabriquent toutes les protéines nécessaires à un organisme. Lorsque la S6 kinase est présente, les ribosomes et les protéines sont synthétisés en quantité suffisante, et les cellules croissent normalement jusqu'à avoir la taille nécessaire pour se diviser. Que se passe-t-il lorsque la S6 kinase est absente ?

J. Montagne a créé des mouches où le gène codant la S6 kinase est inactivé par une mutation : la plupart des insectes meurent pendant le stade

larvaire. Cependant, quelques-uns survivent jusqu'à l'âge adulte. Tandis qu'une drosophile normale se développe en neuf jours, ces drosophiles ont une croissance qui dure cinq jours de plus, et elles ont une taille réduite d'environ 40 pour cent par rapport à une mouche normale.

Un examen au microscope des cellules des ailes et des yeux a révélé que l'organisme est plus petit, car toutes les cellules de l'organisme sont réduites. Les insectes porteurs de la mutation sont des copies réduites des mouches normales ; cependant, ils ont autant de cellules que les insectes normaux (voir la figure). Malgré l'absence de S6 kinase, les drosophiles parviennent à se développer grâce aux ribosomes synthétisés en infime proportion et, surtout, à ceux hérités de l'ovocyte maternel, qui se répartissent à mesure du développement dans toutes les cellules de l'organisme.

Après l'observation des cellules d'une mouche adulte, J. Montagne a vérifié que la mutation a déjà des conséquences au cours du développement : il a observé des groupes de cellules, nommés disques imaginaux, situés à l'intérieur de la larve, qui formeront les ailes de l'insecte après la métamorphose. Les disques imaginaux présentent le même aspect en cercles concentriques (voir la figure ci-dessus) ; cependant, ceux des drosophiles porteuses de la mutation sont plus petits que ceux des drosophiles normales. De plus, les cellules des premiers sont également plus petites que celles des seconds, dans les mêmes proportions que les cellules des mouches adultes. C'est bien la preuve que la S6 kinase commande la taille des cellules.

La mise en évidence de l'action d'une enzyme sur la taille des cellules constitue un pas vers l'élucidation des mécanismes toujours inconnus par lesquels un organisme ou un organe «sait» qu'il a atteint sa taille normale.

BRÈVES

Métrique ou pas métrique

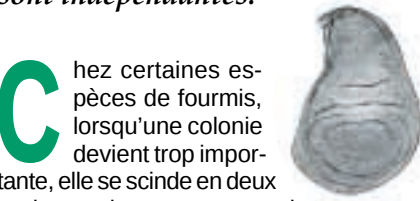
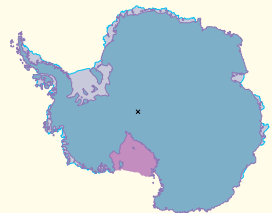
Dans son film *Brazil*, le cinéaste Terry Gilliam décrit des techniciens incapables de réparer une maison en raison d'un changement d'unités de mesure intervenu quelque temps plus tôt. La réalité dépasse parfois la fiction : c'est pour une erreur d'unités que le satellite de la NASA *Mars Climate Orbiter* a percuté la surface martienne le 23 septembre dernier. Une équipe de la Société *Lockheed Martin*, principal artisan de la sonde, a transmis des données exprimées en unités anglo-saxonnes (pieds, pouces, etc.) aux ingénieurs chargés de la navigation de la sonde, qui, eux, ont utilisé les unités du système international. Avant de penser à la mondialisation du commerce, pensons à la mondialisation des unités, entre les pays, et aussi entre les sociétés.

Ebola, es-tu là ?

Depuis 1976, les épidémies de fièvres hémorragiques dues au virus *Ebola* se manifestent de façon épisodique en Afrique centrale. Un tel comportement nécessite l'existence d'un «réservoir» où le virus se terre ; l'agent pathogène contamine l'homme au cours de contacts – directs ou indirects – occasionnels. Jusqu'à présent, les épidémiologistes situaient ce réservoir au cœur de la forêt équatoriale. Or, une équipe de l'Institut Pasteur a découvert des traces de ce virus chez des rongeurs et des musaraignes vivant à la périphérie des forêts, en bordure de la savane. Ce ne sont pas encore les réservoirs, mais ils pourraient nous y conduire.

Ainsi fond, fond,...

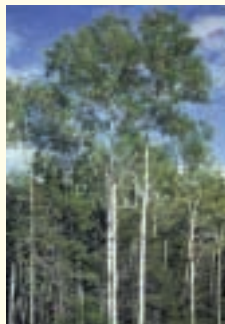
Le niveau de la mer remontera de six mètres... dans 7 000 ans lorsqu'en Antarctique, la banquise de Ross, qui s'étend sur la mer sur 1 000 kilomètres de longueur et 800 kilomètres de largeur (en rose sur la carte de l'Antarctique), se sera décrochée. L'équipe de Howard Conway, de l'Université de Washington, a établi cette prévision après avoir modélisé les courants internes de la calotte glaciaire d'après des données enregistrées par un satellite, et après avoir étudié le passé géologique des glaces et des terres qui bordent la calotte. Ils ont ainsi retracé le recul de la calotte et estimé, par extrapolation, la date de sa disparition.



L'absence de l'enzyme S6 kinase réduit la taille d'une drosophile adulte (à droite) d'environ 40 pour cent par rapport à une mouche normale (à gauche). Elle entraîne également la réduction des organes en cours de développement, tels les disques imaginaux, qui forment les ailes après la métamorphose (voir en haut). Sans influencer sur la prolifération, la mutation réduit la taille des cellules qui se divisent avant d'atteindre leur taille normale.

Un pauvre peuplier

La fabrication du papier à partir du bois est polluante, car elle nécessite l'élimination d'une substance indésirable, la lignine, qui confère au bois sa rigidité. En inhibant la synthèse d'une enzyme indispensable à la formation de lignine, une équipe du Centre de recherche sur les biotechnologies végétales, à Houghton, a créé des peupliers transgéniques dont la quantité de lignine est réduite de 40 pour cent par rapport aux arbres non modifiés. Une telle modification génétique d'espèces à



fort potentiel économique, tels l'eucalyptus et le pin, satisfera l'industrie papetière et les écologistes.

Hypernovæ

Le débat sur l'origine des sursauts gamma cosmiques est-il sur le point de s'achever? Après 20 ans d'observations et de travaux, les astronomes savent que ces éclairs de rayonnement gamma qui déchirent le ciel proviennent de galaxies qui entourent la nôtre, mais les avis restaient partagés sur l'événement initiateur : s'agissait-il de la coalescence de deux étoiles à neutrons ou de supernovæ particulièrement puissantes, des hypernovæ. Pour le sursaut du 26 mars 1998, la balance pencherait en faveur de la seconde hypothèse. Des astronomes ont observé que l'émission résiduelle dans le visible, qui a suivi le sursaut gamma, correspond à la courbe de lumière d'une supernova.

Détecteurs supersensibles

Comment suivre la piste d'un terroriste? En détectant des résidus d'explosifs ou d'agents biologiques. Grâce à une méthode de détection des molécules 100 fois plus sensible que les précédentes, les chimistes identifient des quantités infimes de molécules. L'identification est fondée sur la spectroscopie : les molécules absorbent la lumière d'une façon qui révèle leur nature. Malheureusement, lorsque les molécules sont rares, les interactions avec la lumière le sont aussi. Andrew Pipino, de l'Institut américain des standards et de la technologie, utilise un minuscule cube creux de silice. Un rayon laser y pénètre et y reste piégé, car il rebondit sur les faces internes du cube : il traverse ainsi 100 000 fois le cube, où sont placées les molécules à identifier. Grâce à cette méthode, la détection d'une molécule unique devient envisageable.

Prévention miracle?

Chez le rat, un laxatif usuel est un puissant agent contre le cancer du côlon.

Certains aliments favoriseraient l'apparition de cancers, d'autres les préviendraient. Ce qui fut longtemps une « croyance » semble de plus en plus solidement étayé. Nous avons étudié l'effet de la nourriture sur la survenue de cancers chez le rat, et cette étude nous a conduit à une découverte inattendue : le polyéthylène glycol utilisé, notamment, comme laxatif serait un traitement préventif du cancer du côlon.

Les molécules de polyéthylène glycol sont constituées d'un enchaînement de monomères d'oxyde d'éthylène, et ont pour formule $H-(O-CH_2-CH_2)_n-OH$, où n est compris entre 2 et 500 : ce sont des polymères hydrophiles. Le polyéthylène glycol n'est pas du tout toxique, et il est utilisé comme additif alimentaire : on en ajoute un peu aux glaces pour en améliorer la consistance. Il n'est pas absorbé par l'intestin, ni fermenté par la flore du côlon. Le polyéthylène glycol ayant un poids moléculaire égal à 4 000 sert de laxatif doux. On l'utilise aussi à forte dose pour préparer l'intestin avant une coloscopie.

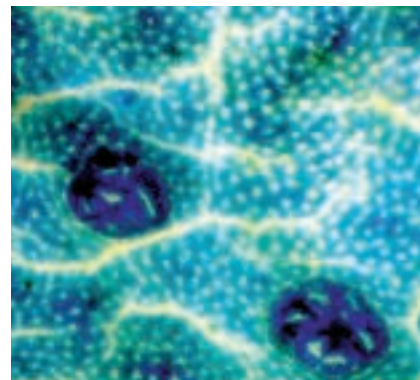
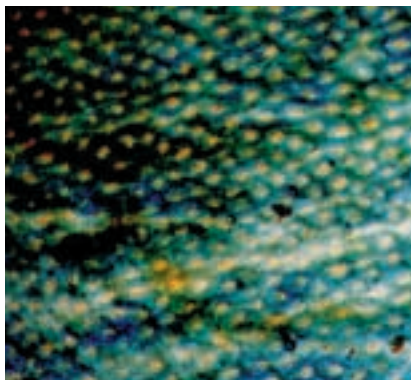
Si le cancer du poumon est le plus meurtrier chez les fumeurs, le cancer du côlon est le plus fréquent chez les non fumeurs. Aujourd'hui, plusieurs équipes recherchent s'il existe un aliment qui jouerait, dans le cancer du côlon, le rôle de la cigarette dans le cancer du poumon. Nous avons nourri des rats avec des régimes très riches en viandes, notamment en bacon grillé. Nous pensions, *a priori*, que le bacon, gras et contenant des nitrosamines cancérigènes, favoriserait

la croissance des tumeurs du côlon chez le rat. Or, nous avons découvert qu'au contraire, plus les rats mangent de bacon, moins vite les tumeurs de leur côlon grossissent. Nous avons alors émis l'hypothèse – la seule qui nous parut sensée – que le bacon, très salé, oblige les rats à boire beaucoup. Une forte consommation d'eau protégerait-elle contre le cancer du côlon? Des enquêtes récentes semblent confirmer, chez l'homme, cette première découverte.

Nous avons cherché si l'eau protégeait en favorisant l'excrétion fécale. Nous avons injecté à des rats un puissant agent cancérigène spécifique du côlon, l'azoxyméthane. On constate, un mois après l'injection, l'apparition de minuscules lésions, des microadénomes, sur la muqueuse du côlon. Plusieurs mois plus tard, les microadénomes ont grossi, et certains peuvent donner une tumeur nommée polype, ou un cancer.

Nous avons alors traité une partie des rats par un laxatif, le polyéthylène glycol : nous avons ajouté du polyéthylène glycol à la nourriture des rats pendant trois mois, en commençant une semaine après l'administration de l'agent cancérigène. Au bout de ces trois mois, les rats traités au polyéthylène glycol avaient 100 fois moins de gros microadénomes, et 20 fois moins de petits microadénomes, que les rats témoins qui n'avaient pas reçu de polyéthylène glycol.

Dans ce modèle, le polyéthylène glycol est dix fois plus efficace que tous les agents déjà testés. Il agit très vite, puisque trois jours de traitement suffisent à diminuer de moitié le nombre de microadénomes. Inversement, quand on arrête l'administration de polyéthylène glycol, le nombre de microadénomes augmente à nouveau. Le polyéthylène glycol agit sur des microadénomes récents, mais nous ignorons encore s'il peut détruire des cancers anciens. Chez le rat, il inhibe la formation des cancers du côlon.



Sur la face interne d'un côlon normal, on observe au microscope ($\times 40$) les ouvertures de « cryptes », très régulières (à gauche, en jaune), qui servent essentiellement au passage de l'eau à travers la paroi intestinale. Après l'injection d'un agent cancérigène à un rat, certaines cryptes se transforment et forment des masses sombres et protubérantes (à droite). Le polyéthylène glycol les fait disparaître.

Comment le polyéthylène glycol bloque-t-il la cancérogenèse intestinale ? Il ne modifie certainement pas le métabolisme de l'agent cancérogène, puisqu'il agit bien après son administration. Le polyéthylène glycol agit peut-être en protégeant mécaniquement la muqueuse : il s'interpose entre la muqueuse et le flux fécal et a un effet lubrifiant. Peut-être, le polyéthylène glycol agit-il, comme les fibres alimentaires, en diluant le contenu du côlon.

En effet, le polyéthylène glycol, qui est hydrophile et qui ne peut traverser la paroi intestinale, attire l'eau vers l'intérieur de l'intestin, par augmentation de la pression osmotique : deux milieux sépa-

rés par une paroi semi-perméable tendent à équilibrer les concentrations des éléments qu'ils contiennent en laissant passer de l'eau vers le milieu le plus concentré ; le contenu de l'intestin est ainsi dilué.

À cette dilution, s'ajouterait un effet délétère pour les cellules tumorales. Nous pensons que la pression osmotique due au polyéthylène glycol présent dans l'intestin déclenche un stress dans les cellules qui, pour maintenir leur volume, «luttent» contre cette aspiration d'eau. Les cellules tumorales seraient peut-être moins efficaces que les cellules normales pour lutter contre la pression osmotique ; elles

se déshydrateraient rapidement, se détacheraient de leurs voisins et seraient balayées par le flux fécal.

Les chercheurs s'interrogent : serait-ce le traitement préventif miracle que les cancérologues recherchent activement partout dans le monde ? Pour savoir si le polyéthylène glycol permettra d'éviter les 100 nouveaux cas de cancers colorectaux détectés chaque jour en France, il faudra d'abord confirmer son effet chez l'homme dans les conditions rigoureuses d'un essai clinique en double aveugle.

Denis CORPET et Géraldine PARNAUD
ENVY et INRA, Toulouse

Glaciers tropicaux

La fonte des glaciers tropicaux dépend plus de l'humidité que de la température.

Cela pourrait être une devinette : quelle est la différence entre un glacier tropical et un glacier des régions tempérées, par exemple un glacier alpin ? Face aux variations saisonnières, leur comportement est exactement inverse : alors que le glacier alpin fond pendant l'été, les glaciers tropicaux fondent pendant la saison humide (de novembre à mars) en même temps qu'ils accumulent de la neige.

Bien que les glaciers tropicaux représentent moins de cinq pour cent des glaciers de montagne du Globe, leur influence socio-économique est importante : les eaux de la fonte de ces glaciers alimentent en eau potable plusieurs grandes villes telles, en Amérique du Sud, La Paz, Lima ou Quito ; elles actionnent également des usines hydroélectriques. Les autorités boliviennes inquiètes du recul de ces glaciers observé depuis plusieurs années, et dans un souci de gestion des ressources, ont demandé à l'Institut de recherche pour le développement, l'IRD, d'étudier ce phénomène. Après avoir observé un glacier bolivien pendant plusieurs années, l'équipe de Pierre Ribstein a montré que c'est l'humidité, et non la température, qui commande la fonte de ces glaciers.

Sur un glacier – tropical ou non –, la glace se dépose en amont dans une zone d'accumulation, puis elle descend lentement et rejoint une zone d'ablation où elle fond en un torrent. Les deux zones sont séparées par une ligne d'équilibre où l'apport de glace est égal à la perte. Depuis 1980, le recul de cette ligne, située de plus en plus haut, traduit un réchauffement global du climat.

Sous les tropiques, la température varie peu d'une saison à l'autre, même si, au cours d'une journée, l'amplitude des températures peut atteindre 20 degrés. En revanche, les variations de précipitations sont importantes : environ 83 pour cent des précipitations tombent pendant la saison humide.

Pour comprendre le comportement inverse des glaciers tropicaux, les glaciologues ont installé deux stations météorologiques automatiques sur les pentes du glacier bolivien du Zongo, qui s'étend de 4 900 à plus de 6 000 mètres d'altitude, au Nord de La Paz. Ils ont mesuré les précipitations, la température, la vitesse et la direction du vent, ainsi que la quantité d'énergie absorbée par le glacier. Ils ont également mesuré le débit du torrent issu du glacier : il est trois fois plus grand pendant la saison humide que pendant la saison sèche. Or, la fonte des glaciers des autres régions du Globe suit un rythme inverse : les glaciers alpins fondent en été lorsque l'ensoleillement est maximal.

Les données recueillies montrent que, pendant la saison sèche, l'énergie solaire absorbée par le glacier sert surtout à la sublimation de la glace, qui passe directement de l'état solide à l'état vapeur. Ce changement d'état, qui requiert huit fois plus d'énergie que la fusion, restreint la quantité d'énergie disponible pour la fonte et l'alimentation du torrent. En revanche, pendant la saison humide, l'atmosphère est saturée en eau : la sublimation est freinée et l'énergie solaire est utilisée pour la fusion.

En marge du comportement saisonnier normal d'un glacier tropical, les oscillations australes du phénomène El Niño expliquent aussi partiellement le recul des glaciers. En Amérique du Sud, ces oscillations provoquent souvent une baisse des précipitations (d'environ 25 pour cent) et par une faible hausse des températures. Selon les glaciologues, ces fluctuations climatiques provoquent la disparition rapide

du manteau neigeux à la surface du glacier. La quantité de rayonnement réfléchi, représenté par l'albédo, diminue, de sorte que l'énergie absorbée augmente : la fusion est alors favorisée.

Les climatologues s'intéressent aux glaciers tropicaux, parce qu'ils espèrent, grâce à des carottages, comparer la mémoire des glaces tropicales à celle des glaces prélevées au Groenland qui ont déjà fourni des informations sur l'histoire du climat de la Terre.



En Bolivie, le glacier du Zongo (cercle de rouge) s'étend de 4 900 à 6 000 mètres d'altitude entre des moraines (zones dégagées). Les glaciologues ont installé deux stations météorologiques automatiques sur le versant du glacier (rectangles verts) et mesuré le débit du torrent (carré rouge) issu des eaux de la fonte du glacier. La ligne violette sépare la zone d'accumulation où la glace s'amasse de la zone d'ablation où elle fond.