

La catastrophe de Yungay (Pérou)

Louis A. Lliboutry

Résumé. Le séisme du Pérou du 31 mai 1970 a provoqué des éboulements gigantesques au seul Huascarán. Des pans de muraille et tours rocheuses s'écroulèrent, entraînant des fragments du glacier sommital. Les débris rabotèrent les névés des glaciers inférieurs, traversèrent leur langue sans en détacher de fragment, érodèrent intensément les pentes inférieures. Un cône d'avalanche de 5 hm³ vint ainsi barrer la vallée de Llanganuco, à 3850 m. Une autre avalanche de 40 hm³ environ, analogue à celle de Ranrahirca de 1962 mais trois fois plus grosse et quatre ou cinq fois plus rapide, dévala sur le cône de Ranrahirca et recouvrit Yungay. Bien que l'aspect final, au repos, fut celui d'une lave de boue (glace et névé ayant été fondus par la terre chaude), le phénomène est à classer parmi les avalanches et éboulements exceptionnels, à frottement interne anormalement faible.

Abstract. The earthquake in Peru on 31 May 1970, caused gigantic landslides in Huascarán only. Rock walls and towers fell, carrying away parts of the summit glacier. The debris ploughed over the firm of lower glaciers, traversed their tongues without detaching a fragment, and intensely eroded the lower slopes. An avalanche cone of 5 hm³ formed a blockage in the Llanganuco valley at 3850 m. Another avalanche of about 40 hm³, similar to that of Ranrahirca in 1962 but 3 times as large and 4 or 5 times more rapid, went over the Ranrahirca cone and covered the town of Yungay. Although the final aspect, at rest, was that of a lava of mud (ice and firn having been melted by the warm earth) the phenomenon is to be classed among the exceptional avalanches and landslides with an abnormally low angle of internal friction.

INTRODUCTION

L'auteur de cet article avait déjà visité auparavant, à trois reprises, la zone sinistrée lors du séisme du 31 mai 1970. Ce fut à la demande de la Corporación Peruana del Santa, qui exploite les eaux de la Cordillera Blanca dans sa centrale hydroélectrique du Cañon del Pato, et en compagnie d'ingénieurs-conseils de Coyne et Bellier. Il s'agissait d'étudier les mesures à prendre pour éviter la destruction brutale de lacs apparus à l'extrémité de glaciers, derrière un vallum morainique. Cette catastrophe, appelée *aluvión* ou *huayco*, a été la cause de la destruction d'un tiers de Huaraz, le 13 décembre 1941 (7000 morts), de Chavín de Huantar le 17 janvier 1945, etc. . .

En février 1967, on visita le bassin de la Laguna Parón pour projeter une vidange partielle de ce lac dangereux, moyennant une galerie creusée dans le rocher. En amont de ce lac l'on étudia la destruction récente des vallums morainiques retenant de petits lacs (Artesoncocha en particulier).

En juin 1967 fut visité le très dangereux lac de Safuna Alta, au Nord-Est de la Cordillera Blanca. 4,7 millions de m³ d'eau étaient retenus à 4300 m d'altitude par une moraine jeune, l'exutoire étant assuré par des infiltrations. On recommanda de creuser à travers la moraine, 0,80 m au-dessus du plan d'eau, un tunnel au sol cimenté pour empêcher une éventuelle montée des eaux. Simple mesure provisoire en attendant la mise en place de moyens de pompage permettant de vider momentanément le lac, pour pouvoir détruire son barrage naturel. Mais, à la suite du séisme de 1970, Safuna Alta s'est vidé sans donner lieu à un huayco. Cette histoire sera rapportée dans le *Journal of Glaciology*.

En mai 1969 furent visités Pucacocha et des lacs autour du Nevado Santa Cruz, en disposant cette fois d'un hélicoptère Alouette III. Toutes ces visites furent organisées par le glaciologue péruvien Benjamin Morales, ingénieur à la Corporación du Santa.

Aussitôt après le séisme je revins sur les lieux, envoyé par l'UNESCO à la demande du gouvernement péruvien. En compagnie de B. Morales nous pûmes survoler la région autour du Huascarán et les lacs dangereux plus au sud en Alouette III, les 9 et 10 juin 1970. Un autre séjour à Lima, du 20 au 29 août, pour mettre en place une mission du PNUD chargée d'étudier les emplacements des villes du Callejón de Huaylas au point de vue sécurité, permit également d'obtenir les documents nécessaires pour faire le rapport demandé par l'UNESCO, qui sert de base à cette communication. Entre temps, un levé de l'avalanche depuis le sommet du Huascarán jusqu'au Rio Santa par photogrammétrie terrestre a été fait par l'Institut de Photogrammétrie de Munich, sous la direction de l'ingénieur Welsch. La nouvelle carte au 1/10.000^e, comparée à celle analogue établie en 1962 sous la direction de Kinzl, permettra de préciser les volumes de matériaux arrachés et déposés, assez grossièrement estimés dans le présent article.

EFFETS GENERAUX DU SEISME DU 31 MAI 1970

Le séisme de magnitude 7 $\frac{3}{4}$ survenu un dimanche, à 15 h 23 (heure locale), eut son foyer sous le Pacifique, face à Chimbote, à 70 km de la côte et à 20 ou 30 km de profondeur (détermination de l'Institut Sismologique du Pérou). L'intensité fut néanmoins aussi forte dans le Callejón de Huaylas (graben entre la Cordillera Blanca au N-E et la Cordillera Negra au S-O, où coule le Rio Santa), que sur la côte: 7+ dans le Callejón, 8 à Chimbote, 7 à Casma (échelle Mercalli modifiée). La plupart des maisons d'adobe du Callejón s'écroulèrent en partie, par suite de leur mauvaise conception (qui s'était éloignée de la conception traditionnelle, pour imiter les maisons en béton), si bien que le nombre de victimes fut le plus élevé que l'Amérique ait jamais connu.

Dans les montagnes des roches s'écroulèrent, et d'autres restèrent en équilibre instable, en particulier dans le Cañon del Pato (à la sortie du Callejón), où plusieurs tunnels de la route furent obturés. (De larges portions de cette route menacent toujours de s'écrouler, et on ne peut pas la réouvrir à la circulation.) La poussière des éboulements recouvrit toute la vallée: le lundi elle s'élevait jusqu'à 5500 m d'altitude et empêchait toute reconnaissance aérienne.

Dans les terrains meubles apparurent des crevasses (au-dessus d'Huaraz, à Nicrupampa, p. ex.), et des glissements de terrain. En particulier devant Recuay, en amont de Huaraz, un très grand et ancien glissement de terrain s'est réactivé, barrant le cours du Rio Santa.

Dans les zones marécageuses, le tassement du terrain fit surgir les eaux. Ainsi se forma à Isquesquipampa, au-dessus de Caraz, une lave torrentielle qui descendit le rio Llullán en emportant deux maisons et un pont dans cette ville. L'eau issue des tourbières de la Quebrada Honda rendit noires les eaux du Rio Marcará.

Les eaux thermales de Monterey, dès l'instant même du séisme, perdirent leur couleur ferrugineuse et jaillirent plus chaudes. Ce phénomène dura plusieurs semaines, puis elles redevinrent comme avant.

Heureusement, et contrairement à ce qui a été écrit dans les journaux, aucun lac dangereux de la Cordillère n'a été détruit par le séisme, hormis un petit lac du versant oriental, Yanacocha, que nous n'avons pas pu visiter. Il n'y a eu que des dégâts dans les ouvrages de consolidation des exutoires pour cinq lacs. Dans la Laguna Parón des éboulements de rochers ont provoqué des vagues qui n'ont pas débordé par dessus le barrage naturel, et les infiltrations qui tiennent lieu d'exutoire n'ont pas varié. L'on a dit ce qui était advenu à Safuna Alta.

Ce n'est qu'au Huascarán qu'il y a eu d'énormes éboulements de rochers et de glace: l'un, du Pic Sud, a balayé sa face est; un autre, du Pic Nord, son glacier nord; ces deux avalanches sont restées sur les glaciers. Un deuxième et énorme éboulement, parti du Pic Nord, a balayé le Glacier Leprince-Ringuet (face nord-ouest) et s'est étalé dans la Vallée de Llanganuco, entre les deux lacs du même nom. Elle y a surpris 15 alpinistes

tchèques, auxquels venait de se joindre un alpiniste chilien, qui se proposaient de gravir le Huascarán. Un troisième éboulement, de dimensions comparables, est parti du Pic Nord vers le sud-ouest et a balayé le glacier '511' au pied de la muraille. C'est ce dernier éboulement qui, se transformant en une lave torrentielle en cours de route, a recouvert comme en 1962 le cône alluvial de Ranrahirca, mais aussi cette fois la ville de Yungay, détruite quelques minutes auparavant par le séisme. La province de Yungay comptait 40.000 habitants lors du recensement de 1961. En 1962, il y eut 4000 morts. Cette fois l'on estime que la moitié des habitants de la province ont disparu, dont 15.000 à Yungay même.

LES EBOULEMENTS DU HUASCARAN NORD

Généralités

Le sommet nord du Huascarán (6655 m) est un plateau rectangulaire de granodiorite allongé du sud-est au nord-ouest, parallèlement à la Vallée du Santa, et large de 450 m environ (cf. photo fig. 1 et carte fig. 2). Sauf du côté sud-est où il descend en pente douce vers la Selle qui le sépare du Pic Sud (6768 m, 3e sommet d'Amérique par l'altitude) il est limité par des falaises d'environ 700 m de haut. Un glacier le recouvre entièrement. A sa périphérie, d'où tombent de temps à autre des séracs, la falaise de glace a 50 à 60 m de hauteur. Autour du plateau sommital, dans des cirques peu prononcés, sont situés les glaciers inférieurs, qui descendent jusque vers 4750 m au nord-ouest et 4300 m au sud-ouest. La ligne d'équilibre se situe vers 5000 m, et la partie basse des glaciers est tempérée. A cause de leur forte pente, et bien que ces glaciers inférieurs aient beaucoup reculé comme les autres de la Cordillera Blanca depuis 40 ans, il n'y a pas ni semble jamais y avoir eu de lacs à leur extrémité.

Les couvertures aérophotogrammétriques du Huascarán ont été faites à une altitude de vol de 9000 m environ, avec des objectifs 'grand angulaire' ($F = 6''$). L'écart entre photos est trop grand pour que le sommet du Huascarán (ainsi que d'autres sommets) puisse être fusionné en vision stéréoscopique, si bien qu'on n'a ni on ne peut faire de carte précise du sommet. Nous donnons ci-dessous les références des clichés base de cette étude.

(1) Mission 2524 du 30/8/48. N° 827 à 829, 1230 à 1232, 1577-1578.

(2) Mission AF-60-17 du 17/12/62 (après la catastrophe de Ranrahirca). Cette couverture a été utilisée pour une restitution au 1/25.000 (projet AST 9 de l'Institut Géographique Militaire du Pérou). Couple 37127-37128.

(3) Mission 147-66-A du 25/8/68 – Couple 5425-5426.

(4) Mission de la NASA du 13 au 18/7/70. Photos en couleur (seul un film positif se trouve au Pérou).

Avalanches dans la vallée Llanganuco

Sur la face nord-ouest la muraille, qui présentait des aiguilles et des vires recouvertes de petits névés, apparaît aujourd'hui parfaitement lisse et non englacée. Le glacier supérieur se termine toujours au bord de la falaise, sauf à l'extrémité ouest. Cette face est concave et forme un entonnoir qui concentre tous les éboulements à l'extrémité supérieure du Glacier Leprince-Ringuet. Ce glacier inférieur est aujourd'hui recouvert de blocs de rochers de toute taille sur toute sa longueur (1800 m). La largeur de l'éboulement y est de 600 m dans la partie haute, 1000 m dans la partie basse, l'aire recouverte de 145 ha en projection horizontale, 160 ha selon la pente (28° environ). Il y a là 1 à 2 hm^3 (millions de mètres cubes) de rocher.

L'éboulement, canalisé par les moraines latérales, s'est répandu sur le cône d'éboulis qui sépare les deux lacs de Llanganuco (3850 m d'altitude) jusqu'à buter contre la paroi sud du Huandoy en face. L'aire couverte est 60 ha, le volume 5 hm^3 environ. Ce barrage a fait grossir le lac supérieur de 0,25 hm^3 /jour.

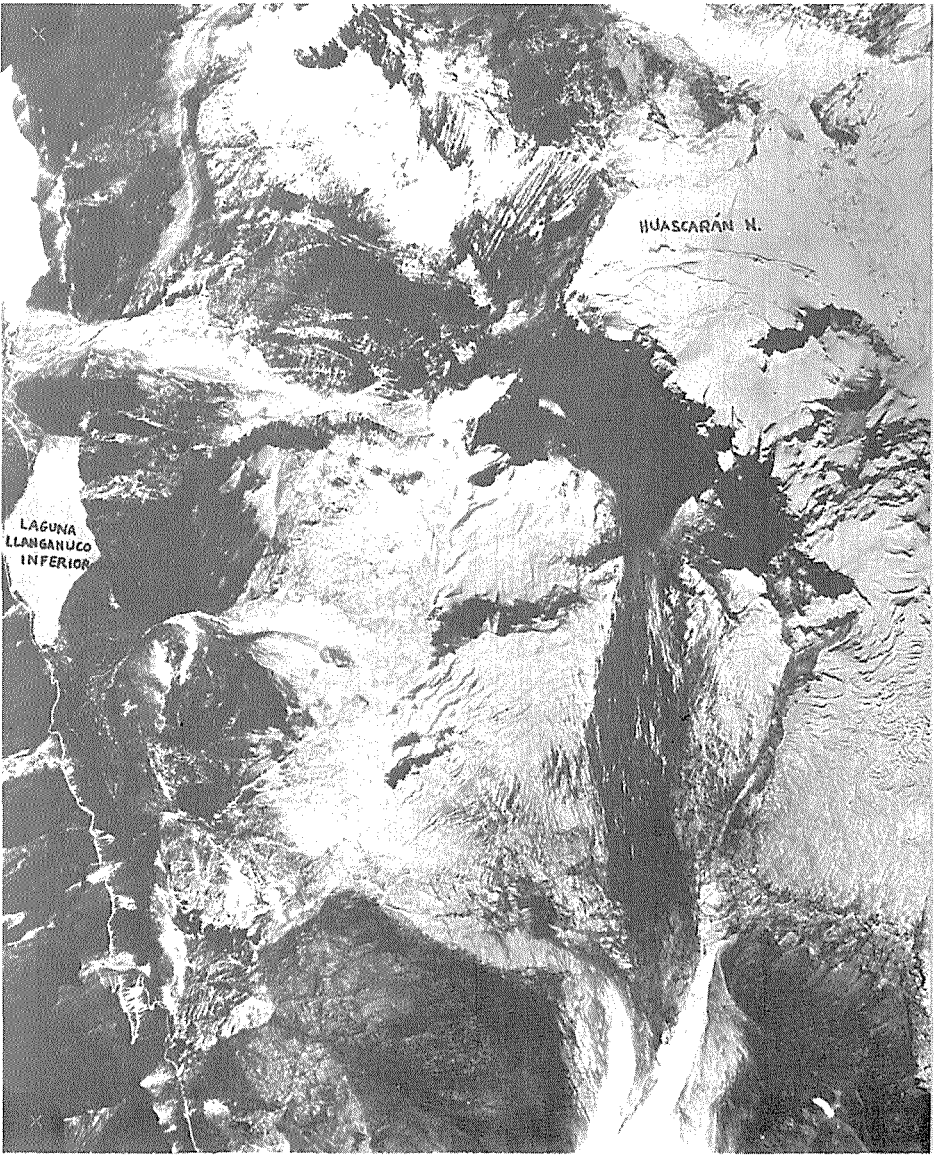


FIGURE 1. Photographie aérienne du Huascarán Nord en juillet 1970. Des éboulements de rochers recouvrent les glaciers inférieurs, du côté des lacs de Llanganuco (visibles sur la photo) et du côté du Rio Santa. Leur chute a entraîné celle de portions du glacier supérieur.

La croissance de ce lac constituant un nouveau danger pour les populations en aval, 60 ouvriers furent envoyés pour creuser un fossé dans le cône d'avalanche. Faute d'engins mécaniques (la route d'accès ayant été détruite par des éboulements), c'est à la pioche et à la pelle qu'ils creusèrent, du 10 juin au 4 juillet, un canal de 200 m de long et 5 m de profondeur. Ce travail montra qu'il y avait 60% de glace dans les couches supérieures du cône d'avalanche, 40% dans les couches inférieures.

Ce sont donc $2,5 \text{ hm}^3$ de glace qui sont tombés, et cela ne peut provenir ni des névés existant dans la face ($0,1 \text{ hm}^3$), ni du sommet même (il faudrait qu'une tranche de 80 m se soit détachée de tout le glacier supérieur, ce qui serait visible sur les photos

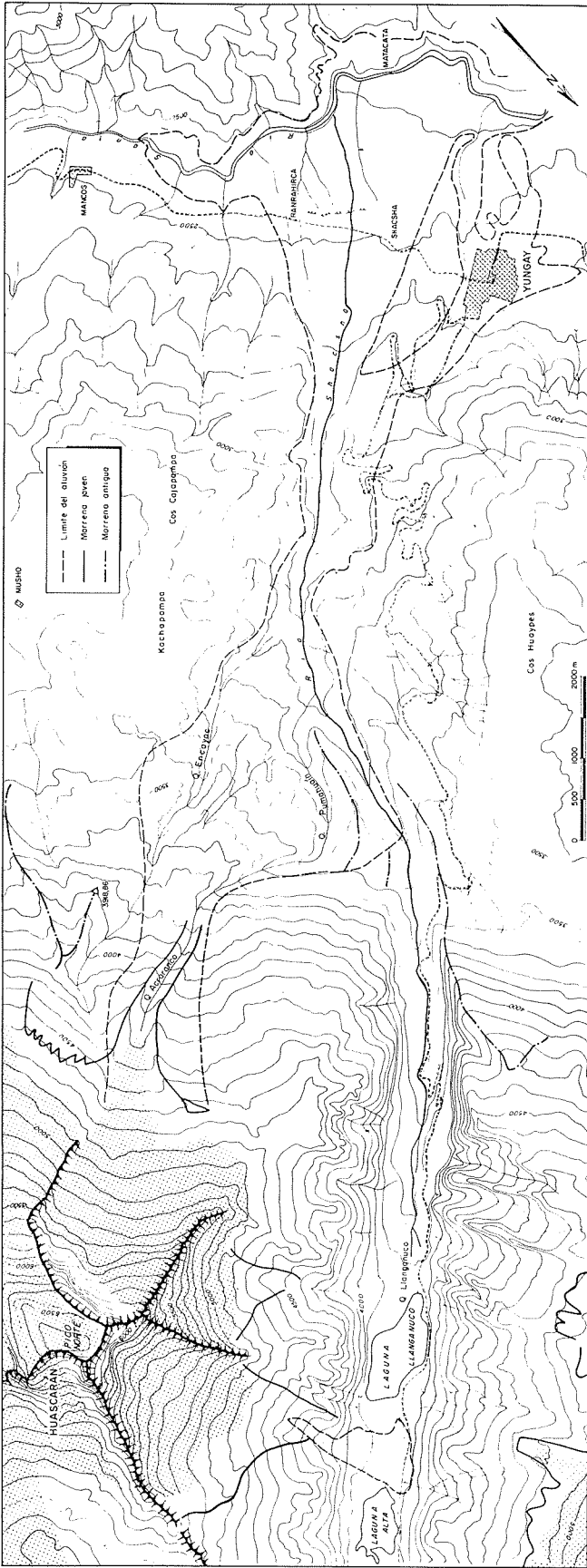


FIGURE 2. Carte de la zone Huascarán-Yungay. Tirets: limite de l'avalanche. Trait épais continu: moraine jeune. Trait mixte: moraine ancienne.

aériennes). Aucun morceau de la langue du Glacier Leprince-Ringuet ne s'est détaché. Il s'agit donc de névé raboté de ce glacier par l'éboulement de rochers, au passage, sur une épaisseur de 2 à 3 mètres.

Avalanches vers la vallée du Santa

Les éboulements de rochers ont été facilités sur la face sud-ouest par l'existence de deux réseaux de diaclases parallèles à la vallée. L'un, ancien, avec un fort pendage vers le Santa, forme des surfaces structurales limitant la plupart des grands sommets de la Cordillera Blanca. L'autre, jeune et toujours actif, vertical, est lié à la surrection de la Cordillera Blanca qui s'est poursuivie à un rythme rapide pendant tout le Pliocène et le Quaternaire (une faille jeune affecte les moraines de la dernière glaciation à leur débouché dans le Callejón de Huaylas). Ces dernières diaclases doivent s'ouvrir spontanément par suite de la décompression de la roche.

On a noté la disparition entière d'une tour de 500 m de haut, 150 m de large (parallèlement à la face) et près de 100 m d'épaisseur qui était collée contre la face. La trace d'autres éboulements (roche plus claire, non altérée) est visible un peu partout. De plus, deux gros fragments du glacier supérieur se sont détachés: l'un au coin ouest (60 x 130 m), l'autre au milieu de la face (60 x 170 m) (cf. photo fig. 1). C'est parce que le rocher qui les supportait est parti, bien plus qu'à cause des accélérations horizontales dues au séisme que ces fragments de glacier se sont détachés. L'accélération horizontale n'a pas dû dépasser 0,25 g (Lomnitz, 1970), et ce n'est que si des crevasses coupaient déjà presque entièrement le glacier qu'elle aurait pu avoir un effet.

On peut estimer l'éboulement initial du côté sud-ouest à 7 ou 8 hm³ de rochers, 1 hm³ de glace. De ces rochers il en est resté sur le glacier '511', au pied de la face, environ 2 hm³. L'éboulement a eu un volume sensiblement double de celui tombé vers Llanganuco. Là aussi un énorme volume de névé a été érodé (4 à 5 hm³?) mais aucun fragment de langue glaciaire n'a été emporté.

A sa sortie du glacier '511', à des altitudes variant entre 4300 et 4800 m, l'avalanche cubait donc environ 10 hm³, et était constituée par moitié de rochers plus ou moins fragmentés, par moitié de blocs de glace plus ou moins pulvérisés et de névé. Mais ce n'était là qu'un début.

LA LAVE DE RANRAHIRCA-YUNGAY

Volumes transportés

Lors de la précédente catastrophe de Ranrahirca, le 10 janvier 1962, à 18 h, il y eut à l'origine un vèlage exceptionnel de 2,5 à 3 hm³ de glace du glacier supérieur, auquel s'ajoutèrent 0,2 à 0,3 hm³ de glace d'un glacier suspendu voisin et des rochers de la face (Morales, 1966). Du glacier '511' sortirent 4 à 5 hm³ de glace, névé et rochers. En 1970 le volume étant au moins le double, l'avalanche ne resta pas canalisée dans le ravin sinueux Acraranco-Pumahuaín, profond d'environ 150 m. Elle s'étala sur toute la zone peu inclinée adjacente (Armapampa), sa largeur totale atteignant 3 km vers 3300 m pour être ensuite canalisée dans la vallée du Rio Shacsha, qui descend des lacs de Llanganuco. Vers 2900 m sa largeur n'était plus que 500 m. Toute cette zone entre 4500 et 2900 m, d'aire 10 km² environ, fut érodée.

Ensuite l'avalanche déboucha sur le grand cône de pente faible (8%) de Ranrahirca, jusqu'à atteindre le Rio Santa vers 2400 m d'altitude, ayant parcouru au total environ 17 km. Sa très grande vitesse fit que sur la rive droite une partie de l'avalanche put, en remontant 90 m (de 2780 m à 2870 m) franchir la crête qui avait protégé Yungay en 1962 et se déverser sur cette ville (altitude 2550 m). Seul un îlot entre les deux, et le cimetière de Yungay situé sur une colline entre le Santa et la ville furent épargnés. (Sur

cette colline se dresse toujours le Christ monumental érigé après la catastrophe de 1962 par les habitants alors épargnés . . .)

La zone de déposition de l'alluvium est de 12 km² (au total 47 ha de zone urbaine et 1745 ha de zone de cultures ont disparu). A son front cette alluvion a environ 3 m d'épaisseur. Sur l'ancienne Place d'Armes, les palmiers de 12 à 13 m de haut émergent encore de 8 à 10 m de la lave de boue (c'est tout ce qui surnage de Yungay, entièrement construit en adobe). On peut donc estimer le volume de l'alluvion à 30 hm³ au minimum, non compris 5 hm³ emportés par le Rio Santa (cette dernière estimation est tirée du rapport de l'ingénieur Jaime Fernandez Concha, le premier à survoler les lieux, et n'a pu être confirmée).

La plus grande partie de ce volume est constituée de limons et de terre végétale. Peu de gros blocs ont pu dépasser la crête et se déverser du côté de Yungay. Des blocs de glace étaient visibles çà et là en surface. La boue sur Yungay était si fluide et visqueuse qu'il fut impossible à un survivant, m'a-t-il dit, d'en extraire une victime à moitié enfouie à quelques mètres à peine du bord. Dix jours après elle s'était desséchée en surface, mais le sol restait mou et élastique comme un matelas.

Vitesses

L'auteur a recueilli séparément les témoignages de trois survivants de Yungay: le sous-directeur de l'Institut de Géophysique du Pérou, Mateo Casaverde, un jeune géologue français, Padzelt et son épouse. Ils se trouvaient en voiture, arrêtés, à Yungay (où ils venaient de bavarder avec le glaciologue B. Morales qui traversait la ville dans sa voiture) lorsque survint le séisme. Ils sortirent alors de leur voiture. Sitôt entendu le bruit de l'avalanche du Huascarán, se souvenant de Ranrahirca, ils se mirent à courir vers le cimetière surelevé. Le temps de parcourir 150 m, de monter 10 m et la lave de boue venait mourir à leurs pieds. Il fallut pour cela une minute à une minute et demie. Le son mit 45 secondes pour parvenir du Huascarán. Les 13.800 m furent donc parcourus par l'avalanche à la vitesse moyenne stupéfiante de 100 à 130 m/s (360 à 470 km/h). Partant du repos pour retourner au repos, la vitesse maximale a dû être au minimum de 150 m/s, la moitié de celle du son!

On conçoit qu'une telle vitesse ait provoqué un vent très violent qui brisa des eucalyptus, souleva des tourbillons de poussière de terre et glace pulvérisée. Les effets de ce vent étaient visibles dans les champs de part et d'autre de la zone balayée par l'avalanche.

L'avalanche de 1962 au même endroit (qui cubait 13 hm³, soit environ trois fois moins) eut une vitesse moyenne de 25 m/s et atteignit le Santa avec une vitesse de 8 m/s (Morales, 1966). Au deuxième coude de la Quebrada Acraranco, vers 3250 m, elle atteignit 50 à 60 m au-dessus du fond du ravin du côté convexe et 130 à 140 m au-dessus du fond du ravin du côté concave, selon les photos aériennes de 1962. La différence $h = 80$ m donne la vitesse en cet endroit: $v = (2gh)^{\frac{1}{2}} = 40$ m/s. Cette avalanche de 1962 a donc eu une vitesse qui est allée grosso modo en diminuant tout au long de son parcours. Par contre l'avalanche de 1970 a eu une vitesse qui a dû aller s'accroissant dans toute la zone d'érosion.

Eau libérée

L'aluvión de 1970 provoqua une retenue momentanée du Rio Santa, de 1 à 2 hm³, qui céda rapidement. Une bonne partie de l'eau de fusion des 5 hm³ de glace et névé dut aussi être expulsée aussitôt que l'avalanche s'immobilisa.

Cela provoqua une crue du Rio Santa, qui passa vers 17 h 30 à la station La Limeña, en aval du Cañon del Pato, vers 18 h à la station Mirador et vers 19 h à la station Tablonas (vitesse moyenne de la crue 36 km/h). Selon le témoignage de la Générale des Chanoinesse de la Croix, qui ne dut qu'à sa présence d'esprit de se sauver (l'autorail où elle voyageait étant bloqué par le séisme à la station La Limeña, elle fit grimper

tons les voyageurs sur les hauteurs), les eaux montèrent de 50 m et restèrent hautes jusqu'à 2 h du matin. C'est dire que l'eau mit 8 à 9 heures pour être expulsée. (En 1962 une masse d'eau sortit de l'alluvion 8 à 9 heures après sa déposition.)

L'énergie cinétique de 35 hm^3 , pesant environ 45 mégatonnes et se déplaçant à 150 m/s, en se transformant en chaleur par frottement interne, dégage de quoi fondre $1,7 \text{ hm}^3$ de glace.

A la fin de la zone d'érosion et d'accélération, vers 2900 m d'altitude, la chaleur dégagée par le frottement interne était encore négligeable. En effet, l'énergie des blocs de glace et de rochers tombés du Huascarán a dû servir en partie à comprimer le névé, briser les blocs, puis à éroder le sol entre 4500 et 3000 m. La plus grande partie de l'avalanche n'est partie que d'une altitude moyenne de 3700 m. Or, il faut 1150 m de chute libre pour qu'une vitesse de 150 m/s soit atteinte.

Il faut toutefois tenir compte de l'importante quantité de chaleur emmagasinée dans la terre chaude. Le séisme survint au moment le plus chaud d'une journée ensoleillée. Ce jour-là, la température maximale de l'air fut, d'après les observations météorologiques de la Corporación Peruana del Santa:

A Safuna (4775 m): $8,6^\circ$

A Lampas alto (4030 m): $13,0^\circ$

A Querococha (3955 m): $14,9^\circ$

La température superficielle du sol devait donc être d'environ 14° à 4000 m, 18° à 3450 m. Les calories emmagasinées dans la terre de l'avalanche permirent la fusion du 1/10 de son poids de glace: soit d'environ 4 hm^3 . Le névé et la poussière de glace intimement mélangés à la terre durent fondre très rapidement.

On voit donc que, sans faire appel à des quantités anormales d'eau liquide présente dans le névé, on peut expliquer que 1 ou 2 hm^3 de névé et poussière de glace aient fondu avant 2900 m d'altitude, plus de 2 hm^3 pendant la déposition sur le cône alluvial, et tout le reste, sauf les plus gros blocs de glace, dans les 8 ou 9 heures qui suivirent.

COMPARAISON AVEC D'AUTRES EBOULEMENTS ET LAVES DE BOUE

Des centaines d'éboulements gigantesques survenus dans des régions montagneuses ont été rapportés (Zaruba et Mencl, 1969). Ainsi dans les Alpes plus de 50 hm^3 de calcaire se sont éboulés des Diablerets en deux fois (1714 et 1749), 22 hm^3 au Col du Dérochoir (Savoie) en 1751 et 15 hm^3 au Righi en 1806 (Moret, 1945). Plus analogue au cas présent est l'avalanche de Rossboden (en amount du village du Simplon) survenue en 1901 (Schardt, 1902): $0,3 \text{ hm}^3$ de rochers et les $0,5 \text{ hm}^3$ de glacier qu'ils supportaient s'éboulerent du Fletschhorn, à la cote 3700 m, et érodèrent les pentes pour former un cône d'avalanche de 5 hm^3 dans la vallée, à 1513 m. C'est le dénivelé et la taille de l'avalanche de Llanganuco.

Le tremblement de terre de magnitude $8\frac{1}{2}$ survenu dans les Chugach Mountains (Alaska) le 27 mars 1964 a provoqué de gigantesques éboulements, en particulier sur le Glacier Sherman. Post (1966) dans un rapport préliminaire donne une longueur de 13 km et une surface couverte de 18 km^2 , Field (1968) une longueur de 7,7 km et une surface couverte de 13 km^2 . Il serait selon ce dernier tombé 10 hm^3 de rochers qui ont entraîné 30 hm^3 de neige. Le dénivelé total du parcours n'était que 1000 m (1200 m à 180 m).

Le phénomène de départ au Huascarán, bien qu'exceptionnel, est donc loin d'être unique. Ce qui est unique au monde par contre c'est la transformation de l'avalanche, après 1000 m de dénivelé supplémentaire, en une boue très fluide.

En réalité la teneur en eau n'était dans la boue (rochers exclus) que de l'ordre de 5% à l'entrée dans le cône alluvial, et n'a jamais dû dépasser 13%. La limite de liquidité

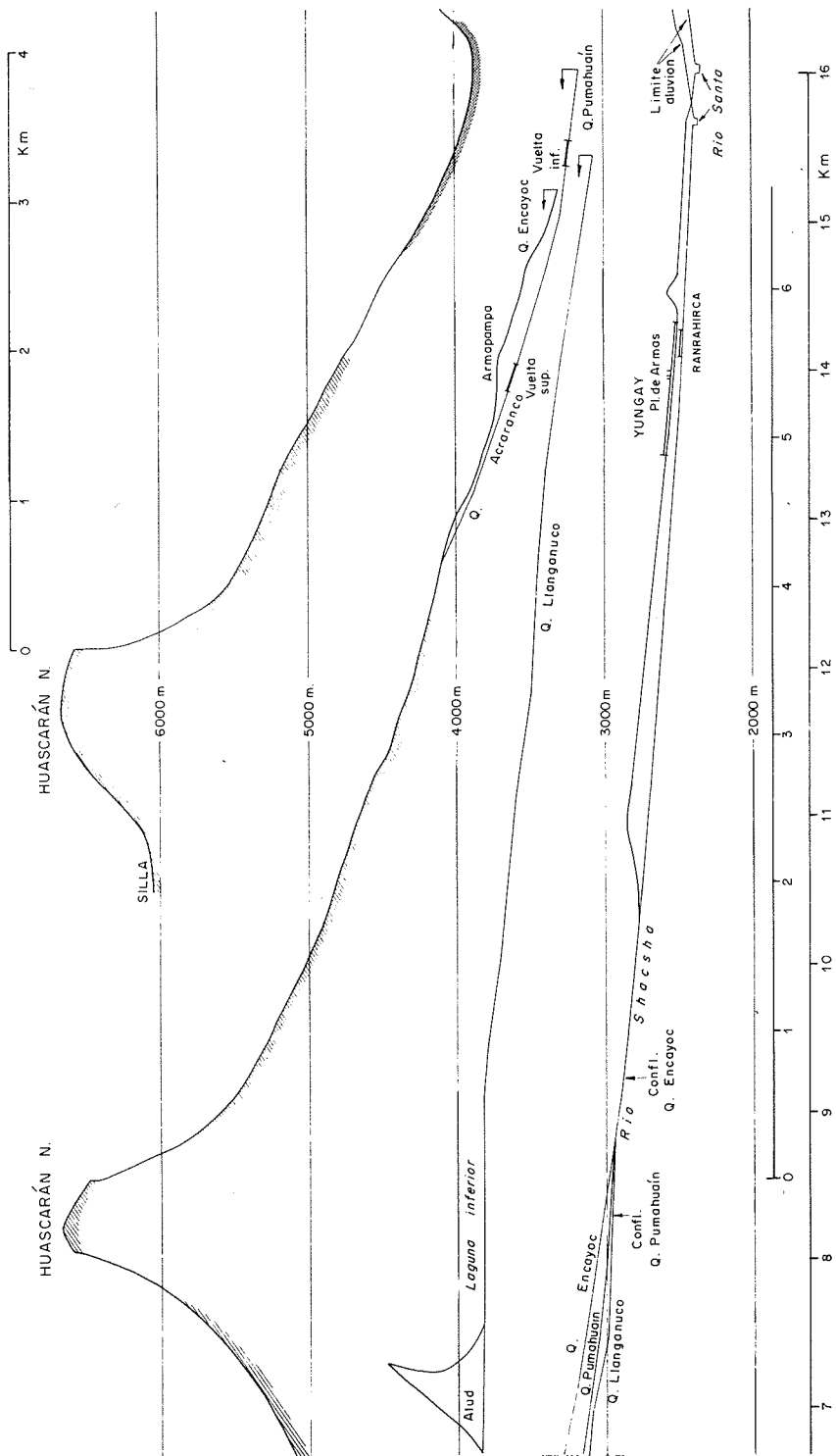


FIGURE 3. Profil longitudinal du parcours de l'avalanche. Les hauteurs ne sont pas exagérées.

d'Attenberg n'a jamais due être atteinte. Ce qui a rendu l'ensemble aussi fluide, les frottements internes aussi faibles, c'est l'exceptionnelle vitesse. Aussi faut-il appeler le phénomène une avalanche, et non pas une lave de boue (mudflow), même si l'aspect final est celui d'une lave de boue.

On comparera cette teneur en eau modeste avec celle des laves torrentielles provenant de la rupture d'une poche d'eau intraglacière (catastrophe de Saint-Gervais, Alpes françaises, par exemple) ou d'une rupture d'un lac de barrage morainique (Aluvi6n de Los Cedros, Cordillera Blanca, par exemple).

Au-dessus de Saint-Gervais, une poche d'eau située dans le petit Glacier de Tête-Rousse creva le 12 juillet 1892. 200.000 m³ d'eau charrièrent 90.000 m³ de glace et 500.000 m³ de sédiments à une vitesse moyenne de l'ordre de 10 m/s (Vallot *et al.*, 1892). La teneur en eau de la boue était donc (en volume) de près de 30%.

À la naissance de la Quebrada Los Cedros, la Laguna Jancarurish, à l'extrémité du Glacier Kogan (versant ouest de l'Alpamayo) creva en 1950. 2 hm³ d'eau entraînent 3 hm³ de sédiments (teneur en eau: 40%) à une vitesse moyenne de 9 m/s (Coyne et Bellier, 1967).

L'avalanche de Ranrahirca de 1962 semble avoir été, par sa composition et sa vitesse, d'une nature intermédiaire.

En 1962 comme en 1970 l'écoulement de l'avalanche a été turbulent ($Re = \nu D/\nu = 10^7$ à 10^9) et torrentiel ($Fr = \nu/\sqrt{gD} > 1$). On peut donc appliquer la formule de Chézy:

$$\nu = C(R \sin \alpha)^{\frac{1}{2}}$$

ou celle de Manning:

$$\nu = C' R^{\frac{2}{3}} \sin^{\frac{1}{2}} \alpha$$

formules où R est le rayon hydraulique, pratiquement égal à l'épaisseur moyenne de l'avalanche, et $\tan \alpha$ la pente. L'avalanche de 1970 a donc été beaucoup plus épaisse que celle de 1962: 16 à 25 fois selon Chézy, 8 à 11 fois selon Manning. Certes le coefficient C (ou C') a dû diminuer à la suite de la première avalanche, qui a nettoyé le ravin Acraranco des blocs qui l'obstruaient, mais la deuxième avalanche est passée dans le ravin et hors du ravin. Il faut donc admettre qu'en 1970 l'avalanche en mouvement a été beaucoup plus courte et épaisse qu'en 1962. C'est une sorte d'énorme vague qui a déferlé sur la vallée, et non une coulée longue.

Si l'on admet 50 m pour l'épaisseur moyenne de cette vague sa largeur moyenne étant 2000 m (cela suppose une longueur moyenne de 400 m), on trouve un coefficient de Chézy de l'ordre de $40 \text{ m}^{\frac{1}{2}} \text{ s}^{-1}$. (Comme on raisonne sur une vitesse moyenne, et que le temps de parcours varie comme $\sin^{-\frac{1}{2}} \alpha$, nous avons calculé la valeur moyenne de $\sin^{-\frac{1}{2}} \alpha$ le long du parcours, qui est $(0,151)^{-\frac{1}{2}}$). C'est là une valeur encore supérieure à celle que l'on trouve pour les avalanches de neige poudreuse. Il faut admettre que les frottements internes dans cette masse étaient extrêmement réduits. On a déjà signalé ce fait pour des éboulements de taille exceptionnelle (Kent, 1966).

Remerciements. Cette étude n'aurait pu être faite sans l'intérêt qu'y prirent les Généraux Augusto Freire, commandant militaire de la zone sinistrée et Carlos Villa Pazos, chef de la Commission pour la Reconstruction et Rénovation de la zone sinistrée (CRYRZA) ainsi que leurs collaborateurs. Je remercie également les Commandants du Service Aérophotographique National et de l'Institut Géographique Militaire pour l'accès à tous les documents photographiques; la Corporación Peruana del Santa pour les facilités logistiques et d'hébergement; mes collègues Benjamin Morales, Vojtech Mencl, Bernard Schneider et Michel Vallon pour les renseignements fournis; enfin l'UNESCO pour l'aide apportée par ses délégués à Paris et à Lima, et pour l'autorisation donnée à la publication de cet article.

REFERENCES

- Coyne et Bellier-Géoconseil (1967) *Estudio de las cuencas de Parón y Safuna en la Cordillera Blanca. Misión de Febrero 1967 por cuenta de ASMIC.* (Corporación Peruana del Santa, Lima). (Rapport interne).
- Field, W. O. (1966) Avalanches caused by the Alaska earthquake of March 1964. Dans Symposium international sur les aspects scientifiques des avalanches de neige, 5-10 avril 1965, Davos, Suisse. *Public. n° 69 de l'Assoc. Int. d'Hydrol. Sci.*, 326-31.
- Kent, P. E. (1966) The transport mechanism in catastrophic rock falls. *J. Geology*, 74, 79-83.
- Lomnitz, C. (1970) Sismología. Dans Informe de la misión de reconocimiento sismológico. Terremoto del Perú del 31 de Mayo de 1970. (UNESCO et CERESIS éditeurs). *Public. du Centro Regional de Sismología para América del Sur.* Lima.
- Morales, B. (1966) The Huascarán avalanche in the Santa Valley, Peru. Dans Symposium international sur les aspects scientifiques des avalanches de neige, 5-10 avril 1965, Davos, Suisse. *Public. n° 69 de l'Assoc. Int. d'Hydrol. Sci.*, 304-15.
- Moret, L. (1945) *Les éboulements de terrains en montagnes.* Editions de la Revue Les Alpes, Grenoble. 50 pp.
- Post, A. S. (1965) Alaskan glaciers: recent observations in respect to the earthquake-advance theory. *Science*, 148, No. 3668, 366-68.
- Schardt, H. (1902) (?) Avalanche du glacier du Rossboden (Simplon). *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 7, No. 4, 347-50.
- Vallot, J., Delebecque, A. et Duparc, J.-L. (1892) Sur la catastrophe de Saint-Gervais. *Archives Sci. Phys. et Nat.*, 28, 1-25.
- Zaruba, Q. et Mencl, V. (1969) *Landslides and their control.* Elsevier-Academia. 202 pp.
- Note de l'auteur*
 Depuis la rédaction de cet article est paru un numéro spécial de la *Revista Peruana de Andinismo y Glaciología* (Año XIX, No. 9, 1969-70, éditeur: Cesar Morales), dont la majeure partie (p. 1-177) est consacrée à la catastrophe du 31 mai 1970.