

Un problème de géomorphologie appliquée : le choix des sites d'habitat dans une région sismique (Andes centrale, Pérou)

In: Annales de Géographie. 1973, t. 82, n°449. pp. 8-27.

Citer ce document / Cite this document :

Tricart Jean. Un problème de géomorphologie appliquée : le choix des sites d'habitat dans une région sismique (Andes centrale, Pérou). In: Annales de Géographie. 1973, t. 82, n°449. pp. 8-27.

doi : 10.3406/geo.1973.18880

http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geo_0003-4010_1973_num_82_449_18880

Abstract

A problem of applied geomorphology : the choice of building areas in a seismic region (Central Andes, Peru).

The seism of May 31, 1970 essentially shook the joints between the tectonic compartments. Among them there is the Santa valley, at the foot of the White Cordillera. Many casualties were caused by the collapse of a huge mass of ice from the unstable Huascarán (a retreating glacier lying on steep and hilly rocks). This collapse became downstream a torrent-like lava which destroyed Yungay and blocked up the Santa. The break-up of the obstacle devastated the lower valley and the glen downstream.

The behaviour of the buildings during the seism largely depends on geomorphological features which, in some cases, amplify the waves. The loose formations containing water layers get compacter and eject some water, hence causing some subsidences and sometimes the formation of marshes or pools. The seism caused some collapses and quickened some chronic landslides (Recuay). It made a fault work again (2-3 meters) on the side of the White Cordillera.

The Centre de Géographie appliquée team, sent as a part of the French assistance, surveyed the effects of the seism and drew some maps showing the fitness of the grounds to reconstruction.

Résumé

Le séisme du 31 mai 1970 a affecté surtout les géosutures délimitant des compartiments tectoniques. L'une d'elles est la vallée du Santa, au pied de la Cordillère Blanche. Un très grand nombre de victimes a été causé par l'éboulement d'une masse de glace du Huascarán, en équilibre instable (glacier en cours de recul, sur des roches moutonnées en forte pente). Cet éboulement s'est transformé vers l'aval en une lave torrentielle qui a détruit Yungay et barré le Santa. La débâcle due à la, rupture de l'obstacle a ravagé la vallée et la gorge à l'aval.

Le comportement des constructions lors du séisme est fortement influencé par des caractéristiques géomorphologiques qui, dans certains cas, provoquent une amplification des ondes. Les formations meubles contenant des aquifères se compactent et expulsent une partie de leur eau, ce qui engendre des affaissements et peut provoquer la formation de marais ou d'étangs. Le séisme a provoqué un certain nombre d'éboulements et activé des glissements de terrain chroniques (Recuay). Il a fait rejouer de 2-3 m une faille sur le flanc de la Cordillère Blanche.

L'équipe du Centre de Géographie appliquée, envoyée au titre de l'aide française, a étudié les effets du séisme et dressé des cartes appréciant la plus ou moins grande aptitude des terrains à la reconstruction des agglomérations.

Un problème de géomorphologie appliquée : le choix des sites d'habitat dans une région sismique (Andes centrales, Pérou)¹

par **Jean Tricart**

Professeur à l'Université Louis-Pasteur de Strasbourg

Planches I-II

Le séisme du 31 mai 1970 s'est produit à 15 h 23 (heure locale). Il a ravagé deux régions du Centre-Nord du Pérou : d'une part les localités côtières au S de l'embouchure du Santa (Chimbote, Casma), de l'autre la haute vallée du Santa en aval de Huaraz, qui forme le *Callejón de Huaylas*. Son intensité a été très grande (7 ou 8 Mercalli). Il semble que ce séisme soit une manifestation de la tectonique par laquelle les Andes tendent à chevaucher la zone littorale. Il est remarquable que les deux régions qui ont subi le plus de dégâts s'alignent parallèlement l'une à l'autre, le long de la côte et le long du vieil accident où s'est installée la haute vallée du Santa, au pied de la Cordillère Blanche. Dans le massif montagneux intermédiaire, bien qu'importants, les dégâts sont moindres. A Yautan, par exemple, des maisons construites de la même manière qu'à Huaraz ont résisté pour la plupart. Il semble donc que le séisme ait été particulièrement destructeur le long de géosutures délimitant

1. Le présent travail a été effectué à la demande du Gouvernement péruvien, au titre de l'aide accordée par la France à la suite du séisme du 31 mai 1970, par le Centre de Géographie appliquée (université Louis-Pasteur, Strasbourg), dans le cadre des activités de la coopération technique bilatérale. La mission de terrain a été effectuée, en juillet 1970, par J. Tricart, P. Usselman et A. Gobert, en compagnie d'O. Dollfus (Institut français d'Études andines) et de divers confrères péruviens, dont le géographe C. Peñaherrera. A Strasbourg, J. Trautmann, D. Rozan et R. Ramalho ont participé à la photo-interprétation. La cartographie a été effectuée par M^{lles} J. Just et J. Lorentz sous la direction de M^{lle} C. Demenu. Nous tenons à remercier le Général Freire, commandant des opérations pendant la période d'urgence, pour son accueil cordial et pour les facilités qu'il nous a données pour accomplir notre mission, ainsi que la Corporación del Santa, qui a tout fait pour nous aider. Nous adressons une pensée émue aux nombreuses victimes d'un pays ami et nous espérons que notre travail contribuera à rendre moins meurtriers les séismes qui se produiront inévitablement dans l'avenir.

des lanières parallèles au littoral et fonctionnant depuis des millions d'années, car elles séparent des unités morphostructurales et orographiques bien définies.

Nous examinerons, dans une première partie, les effets du séisme, puis, dans une seconde, nous exposerons les mesures que nous avons conseillées pour la reconstruction des agglomérations détruites.

I. LES EFFETS DU SÉISME

Le séisme a causé des dizaines de milliers de victimes. Aucun nombre précis ne peut être avancé dans un pays où les registres d'état civil n'existent encore que dans certaines villes. Lors de notre mission, les responsables parlaient d'environ 50 000 morts. C'est un ordre de grandeur vraisemblable si l'on songe que pratiquement tous les habitants de petites villes comme Yungay ont été tués et qu'une forte proportion de la population du centre de Huaraz, capitale de département, a péri sous les constructions qui se sont écroulées. Le séisme a, d'autre part, provoqué une lave torrentielle géante dans la vallée du Santa (« aluvión » au Pérou).

Victimes et dégâts résultent pour une part seulement des effets directs des secousses (ébranlement des constructions). Dans l'ensemble, les effets indirects ont été plus destructeurs (éboulement de glace du Huascarán, lave du Santa). Les conditions géomorphologiques régionales ont joué un rôle important en la matière.

A. Rappel des conditions géomorphologiques régionales

La région est formée d'unités longitudinales, parallèles au littoral.

Une chaîne littorale d'altitude assez forte (3 000 à 4 000 m) forme un bloc dissymétrique, constitué principalement de granite. Il est basculé vers le Pacifique et tombe par un escarpement rigide sur la haute vallée du Santa. Il descend aussi vers le NW et s'abaisse considérablement aux environs de Chimbote. Le long de la côte, ce bloc est échanuré d'une série de petites plaines, au débouché de courtes vallées qui, en amont, l'incisent vigoureusement. On y trouve des cônes de déjections, en grande partie quaternaires, des plages anciennes, des recouvrements éoliens. Le climat est aride, du type désert brumeux. Toutes les cultures sont irriguées. Vers l'intérieur, on passe à un désert ensoleillé, avec des rubans de cultures irriguées le long des vallées. Il faut arriver vers 2 500 m d'altitude pour entrer dans l'étage semi-aride. Lors du séisme, ce compartiment a joué d'une manière relativement rigide.

Le Santa entaille une gorge vigoureuse dans l'extrémité NW de ce bloc. Elle est orientée NE-SW, perpendiculairement à son axe. Une ligne de chemin de fer y avait été construite, mais aucune route. A son débouché, le Santa a édifié, au Quaternaire, une série de cônes de déjections qui plongent sous le Pacifique et les dépôts littoraux récents. L'alluvionnement a obturé successivement une série de cours installés dans des ensellements topogra-

phiques entre les collines. Des canaux d'irrigation profitent de ces passages et apportent une partie des eaux du fleuve jusqu'à Chimbote. La gorge du Santa s'est peut-être installée sur un accident tectonique transversal : en effet, l'importance des dégâts diminue fortement au NW de Chimbote.

La haute vallée du Santa, orientée SE-NW, est installée sur une limite entre deux blocs. Elle est dominée, rive gauche, par le massif littoral, rive droite, par la Cordillère Blanche. Rectiligne, elle semble occuper un étroit fossé d'effondrement. Le granite y laisse la place, sur quelques kilomètres de largeur, à des formations paléozoïques métamorphisées et à des dépôts sédimentaires mésozoïques (marnes, argiles, grès), restés tabulaires. D'importantes accumulations de piémont se sont mises en place pendant les périodes glaciaires. Au pied de la Cordillère Blanche, se rencontrent des systèmes de moraines qui s'avancent jusque tout près de la ville de Huaraz. Ils dessinent des lobes individualisés, séparés les uns des autres. Des obturations semblent s'être produites à plusieurs reprises au cours du Quaternaire. Elles ont permis le dépôt de formations lacustres argilo-limoneuses, dans lesquelles s'interstratifient des épandages deltaïques sablo-caillouteux. Leur épaisseur dépasse, en certains points, la centaine de mètres, par exemple, en face de Recuay. Leur succession et les modalités de leur mise en place n'ont guère été étudiées et nous n'avons pu nous en charger. Cependant, l'importance de ces accumulations est capitale du point de vue pratique : elles sont le siège de mouvements de masse qui menacent des agglomérations (Recuay) et ont été suractivés par le séisme. En dehors de cela, on rencontre aussi, dans la haute vallée du Santa, des cônes de déjections grossiers et des terrasses caillouteuses fortement incisées, aux rebords souvent escarpés. La tendance du Santa est à l'entaille, malgré le freinage qu'impose la gorge de l'aval à l'enfoncement du talweg. Une importante partie de ces cônes a été mise en place par des laves torrentielles ou des débâcles dues à des éboulements de glace. Ce fut le cas en 1941 à Huaraz, où une partie de la ville fut détruite et, encore, à Yungay en 1962. Dans la Cordillère Blanche, des lacs sont barrés par des langues de glace et se vident brutalement, de temps à autre, ce qui provoque des débâcles. Un système de surveillance permanent avait été mis en place au cours des dernières années. La haute vallée du Santa bénéficie d'un climat frais, du fait de son altitude : le fond de la vallée est vers 3 000 m à Huaraz, vers 2 500 m à l'entrée des gorges. La pluviométrie, malgré la position abritée, est voisine de 500-600 mm. Des cultures sèches sont pratiquées et des pâturages occupent les croupes, mais on irrigue aussi, pour accroître les rendements et diminuer l'irrégularité des récoltes. Toute la haute vallée est très peuplée, avec une série de bourgades et de petites villes, en dehors de Huaraz qui approchait les 30 000 habitants avant la catastrophe. C'est dans cette région que le séisme a causé la plupart de ses victimes.

Le flanc droit de la haute vallée du Santa est dominé par un très haut massif cristallin, la Cordillera Blanca (Cordillère Blanche). Les sommets dépassent 6 000 m. Le Huascarán culmine à 6 654 m. Ce bloc soulevé a été fortement modelé par les glaciers quaternaires. Il est coupé de toute une

série d'auges impressionnantes, perchées au-dessus du fossé du Santa. Des glaciers importants y persistent, mais ils sont en période de recul. Certaines langues barrent encore des auges et retiennent des lacs d'obturation, aux vidanges catastrophiques. D'autres nappes d'eau sont barrées par des moraines et moins dangereuses. Le recul actuel des glaciers se fait souvent sur des pentes très raides, en dessous de restes de topographies moins accidentées dominées par les pyramides des hauts sommets. L'allure générale rappelle les épaulements des auges alpines, en beaucoup plus grand. Les roches sont habituellement massives en dehors des auges, qui correspondent souvent à des lignes de broyage. Elles ont été polies par la glace et moutonnées. Sur des pentes variant de 15 à 40°, elles sont particulièrement glissantes. De temps à autre, un cisaillement se produit dans les glaciers et des masses de glace s'éboulent, descendant d'un coup, en quelques secondes, jusque dans la vallée voisine. C'est ce qui s'est produit en janvier 1962 dans la vallée de Yungay et a occasionné la première destruction de Ranrahirca¹. L'ébranlement du séisme du 31 mai 1970 a provoqué un phénomène semblable, mais plus important encore. Le déséquilibre climatique actuel des glaciers constitue un grave danger potentiel. Il favorise les débâcles glaciolacustres, les langues fondant plus facilement. Il diminue, par l'intermédiaire des eaux de fonte, le coefficient de friction des masses de glace sur la roche, il abaisse la résistance au cisaillement de la glace. C'est dans cette conjoncture générale défavorable que le séisme du 31 mai 1970 a provoqué un éboulement glaciaire d'une exceptionnelle ampleur.

B. Les effets directs du séisme (ébranlements)

Le séisme s'est traduit par une secousse brutale suivie de plusieurs autres, d'intensité décroissante, pendant environ 45 secondes. Il en est résulté des ébranlements qui ont affecté aussi bien les versants que les constructions.

Sur les versants, les manifestations sont nettes, bien que beaucoup d'observateurs ne les aient pas vues. Il est vrai que nous sommes les seuls géomorphologues à avoir étudié le séisme. Cependant, la nature des roches, cohérentes, a réduit les effets de l'ébranlement. Dans toute la région aride, le système morphogénétique a joué dans le même sens. Les altérations sont faibles et, surtout, peu profondes. Elles n'élargissent guère les diaclases que superficiellement et n'isolent pas de quartiers de roches susceptibles de s'ébouler. Cependant, dans les granites de la Cordillère Noire, entre la côte et le fossé du Santa, nous avons pu en observer des traces. Sur des versants

1. DOLLFUS (O.), PEÑAHERRERA (C.), « La lave torrentielle du 1^{er} janvier 1962 dans la Cordillère Blanche (Pérou) », *Rev. Géomorphol. dyn.*, XIII, 1962, p. 10-17.

WELSCH (W.), KINZL (H.), « Der Gletschersturz vom Huascaran (Peru) am 31 mai 1970, die grösste Gletscherkatastrophe der Geschichte », *Z. für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, VI, 1970, p. 181-192.

HOEMPLER (A.), « La catástrofe sísmica del 31 de mayo de 1970 », *Bol. Soc. Geogr. Lima*, LXXXIX, 1969-1970, p. 3-32.

raides, de 35° environ, apparaissaient, peu après le séisme, des plages plus claires, où la roche fraîche avait été mise à nu par le départ de blocs et de pierraille. Des traînées, également plus claires, les prolongeaient vers le bas et, à leur pied, des quartiers de roche étaient venus écraser des plantes cultivées sur les périmètres irrigués. Des phénomènes de même nature s'observaient aussi dans certains talwegs en pente très forte, sans trace d'éboulement, sortes de couloirs d'éboulis sans corniche sommitale. Un peu en amont de Yautan, trois traînées de ces deux types ont affecté un pan de versant de ce genre d'une centaine de mètres de long. Au total, une quarantaine de blocs de 1 m³ chacun en moyenne ont déboulé sur les cultures irriguées situées à son pied. Ils se sont avancés à des distances atteignant 10 à 15 m sur les champs, dont la pente est de moins de 5°. Une partie des blocs et toute la pierraille n'ont pas dépassé le pied du versant. Au total, c'est environ une centaine de mètres cubes de débris qui ont été déplacés. L'évolution géomorphologique de cette variété de milieux lithologiques et climatiques étant lente, ce n'est pas négligeable. Dans ce secteur, d'ailleurs, les terroirs cultivés montrent souvent, au pied des versants, des formations de même type, antérieures au séisme. La fréquence des tremblements de terre donne au phénomène un caractère chronique. Son efficacité n'est cependant pas uniquement fonction de la fréquence des séismes. Pour que ceux-ci soient efficaces, il faut que du matériel soit prêt à partir. Comme pour les autres processus de transport, le facteur limitant est la *préparation*, l'ouverture ou l'élargissement de fissures détachant des fragments mobilisables.

Des éboulements de cailloux et de blocs se sont également produits sur les rebords de terrasses, abrupts, dans le fossé du Santa. Sur le flanc oriental de la Cordillère Noire, dominant le haut Santa, les choses se sont passées un peu différemment dans les schistes métamorphiques. Sur des pentes rectilignes de 40° environ, cultivées, les ébranlements ont mis en marche des nappes de pierrailles, issues de plages caillouteuses rebelles à la charrue ou de petites têtes de rochers arasées. Elles ont progressé de quelques mètres, une dizaine ou même une vingtaine parfois, mais sont restées en panne sur la pente. Seules quelques pierres ont roulé un peu plus loin. On a ainsi une petite langue d'éboulis, sans corniche dominante, sans zone de départ bien visible, qui n'atteint pas le pied du versant bien qu'il n'y ait aucun changement de valeur de la pente. Il s'agit d'une forme originale, d'un type d'éboulis spécifiquement sismique. Il a fonctionné sous l'effet de table à secousse du tremblement de terre et uniquement pendant celui-ci. Le matériel ne se serait pas mis en marche dans ces conditions s'il n'y avait pas eu le séisme. Le modelé du site de l'éboulis diffère de celui des éboulis de gravité banaux.

Des phénomènes parents se sont produits, dans la même région. Ils affectent des ravinements vifs. Sur des pentes de 40-50°, des blocs à demi-déchaussés par le ruissellement ont été ébranlés et ont déboulé jusqu'au talweg voisin où ils ont continué de rouler plus ou moins loin, parfois jusqu'en aval de la zone ravinée en forte pente. Le séisme s'étant produit en saison sèche, ils ont imprimé dans les marnes ou les schistes pourris des traces qui

ressemblent à celles d'une petite avalanche de fond : un sillon avec deux ébauches de bourrelets latéraux.

Enfin, dans le même matériel et dans certaines formations lacustres d'obturation, toujours dans le fossé du haut Santa, l'ébranlement sismique a déclenché des foirages. Ils se sont produits là où des sourcins humectaient suffisamment les argiles. Certains d'entre eux ont donné de petites laves torrentielles sous l'effet d'averses, avec édification de petits cônes de déjections au débouché du bassin. En face de Yungay, sur un versant en pente moyenne forte (15-20°), l'un d'eux a même légèrement obturé le Santa et provoqué l'accumulation de bancs alluviaux par le fleuve.

Les ébranlements subis par les versants n'ont guère causé de dégâts. Les éboulements n'ont pas détruit de maisons ni occasionné de victimes. Il semble que les paysans évitent de construire dans les sites menacés. Cependant, il faut insister sur un fait essentiel : le séisme a eu lieu en saison sèche. C'est ce qui a restreint l'importance des foirages et des laves torrentielles qui en sont issus. S'il s'était produit en saison des pluies, il en eût été autrement : les mouvements de masse auraient été beaucoup plus nombreux et plus volumineux, des barrages se seraient formés puis auraient cédé brusquement sur les torrents en crue. Des effets de débâcle plus ou moins graves se seraient produits.

Les ébranlements ont causé des victimes et des dégâts d'une autre manière. Ils ont violemment secoué les constructions et provoqué l'effondrement de beaucoup d'entre elles. C'est, par exemple, ce qui s'est passé à Huaraz, où il y eut des milliers et des milliers de morts. Toute la partie ancienne de la ville a été détruite. Elle avait été reconstruite, après un autre sinistre au XVIII^e siècle, selon un plan en damier, avec des rues étroites. Dans toute la région, le bois est rare et les constructions sont en briques crues. Les murs sont généralement épais. Le séisme a provoqué l'écroulement des maisons. Ceux qui avaient pu sortir ont été ensevelis dans les rues. Il y a une leçon à tirer de cela : il faut modifier le type de construction, utiliser des charpentes constituant un cadre déformable et remplir avec des matériaux légers, bref, recourir à une sorte de colombage. L'introduction de l'eucalyptus, qui pousse bien dans la haute vallée du Santa, peut fournir les matériaux nécessaires. Les observations faites en 1971 au Chili, lors du séisme de Valparaiso, par J. Tricart le confirment. Il faut aussi renoncer aux villes tassées, avec des rues étroites. Les espaces vides entre les constructions constituent des zones de refuge.

L'importance des ébranlements subis par les constructions est fonction de facteurs géo-techniques. Trois sont primordiaux :

a) La tectonique. Nous avons déjà signalé la localisation des principaux dégâts le long d'alignements correspondant à des limites de blocs : littoral, fossé du haut Santa. Au pied de la Cordillère Blanche, nous avons pu observer d'hélicoptère un abrupt de faille haut parfois de 3 m environ, suivant le bord de la chaîne. Tout frais, il coupe indifféremment le cristallin, y compris des

granites massifs et des moraines récentes. Aucune forme de végétation ne l'avait colonisé lors de notre visite même sur les formations morainiques meubles. Nous avons tout lieu de penser qu'il est apparu au cours même du séisme.

Divers indices géomorphologiques permettent de repérer les linéaments tectoniques. L'allure du réseau hydrographique, la disposition des terrasses sont des critères de choix. Malheureusement, ils s'étayaient mutuellement pour indiquer que la ville de Huaraz est construite à la rencontre d'un accident longitudinal, suivant le Santa, et d'un ou deux accidents transversaux obliques l'un par rapport à l'autre. Cela expliquerait qu'elle ait été déjà détruite deux fois depuis la colonisation espagnole par des séismes (XVIII^e siècle et 1970). Il est impossible de se prémunir contre un tel danger, même en adoptant un type de constructions antisismique quel que soit son coût. La seule solution est dans un transfert de la ville. Il se heurte à de fortes oppositions psychologiques et à certaines manœuvres démagogiques.

b) La nature des formations superficielles. Suivant leur élasticité, elles transmettent plus ou moins bien les secousses. Elles peuvent même les amplifier. Les séismes provoquent aussi, dans certains matériaux, des effets de compaction qui s'accompagnent de tassements inégaux. Tout cela peut faire s'écrouler les constructions. Quelques exemples, confirmés par les études faites dans d'autres pays, par exemple en Alaska à la suite du séisme de 1964 :

— Les sables transmettent peu les secousses et tendent à les amortir. A Chimbote, les maisons construites sur les nappes éoliennes au sud de la ville, même les plus pauvres, ont peu souffert. Il en est de même des cailloutis alluviaux, du socle cristallin. Ces matériaux, peu élastiques et non compressibles, n'amplifient pas les mouvements d'origine profonde.

— Les matériaux fins, limoneux et argileux, au contraire, sont élastiques et amplifient les secousses. De plus, ils se compactent, surtout quand ils contiennent de l'eau, point qui sera examiné au prochain paragraphe. Les alternances en lentilles de matériaux fins, compressibles, et de matériaux plus grossiers, qui ne le sont pas, provoquent des mouvements différentiels extrêmement dangereux, surtout quand elles sont noyées dans une nappe phréatique. C'est ce qui s'est produit à Chimbote, dans tout le centre de la ville. Celui-ci occupe, en effet, un cordon littoral sableux dunkerquien en arrière duquel une ancienne lagune colmatée reçoit l'excédent des eaux d'irrigation d'un périmètre installé sur un cône abandonné du Santa. Les sondages indiquent des interstratifications de matériaux fins et de sables noyées dans une nappe phréatique. La compaction différentielle et les amplifications des ondes par élasticité ont causé d'importants dégâts. Certains murs se sont écroulés tout d'un pan, pivotant sur leur base. Sur les pentes, des effets de thixotropie peuvent se produire et contribuer à la formation de foirages et de coulées boueuses. Il en existe des exemples aux environs de Huaraz.

Il est donc nécessaire d'établir des cartes des formations superficielles pour identifier les aires sur lesquelles les effets des séismes sont particulièrement nocifs.

c) Les conditions hydriques. L'eau interstitielle dans les sédiments meubles est relativement mobile et se déplace sous l'effet des secousses. Au Chili, en 1962, ont été observées de petites pustules de boue, cratériformes, dans des secteurs gorgés d'eau. L'eau avait été éjectée à la surface par le séisme. A Chimbote, dans l'ancienne lagune imprudemment colonisée par des habitations misérables, les secousses ont provoqué une compaction qui abaisse la surface du sol de quelques décimètres et exprime l'eau contenue dans les sédiments fins. Celle-ci s'est accumulée en surface, formant un étang profond de 0,2 à 0,4 m. Il s'est graduellement asséché par évaporation. Il faut modifier le périmètre d'irrigation qui fournit l'eau : maintenant, les matériaux étant compactés, le drainage naturel est devenu moindre. De tels phénomènes provoquent des affaissements qui ont parfois été pris pour des jeux de blocs tectoniques. Ils ont joué immédiatement au nord de Concepción lors du séisme de 1962, pour des vasières littorales. Schorres avant le tremblement de terre, elles sont devenues slikkes après lui.

C. Un effet indirect immédiat : l'éboulement de glace du Huascarán

Déjà, en janvier 1962, un éboulement de glace s'était produit sur ce pic. Après le séisme, le bord du glacier formait une muraille verticale, cicatrice du cisaillement, sur une pente de granite poli en roche moutonnée d'une valeur moyenne de 20°. Les ébranlements du séisme ont provoqué une rupture et environ 2 km³ de glace se sont éboulés, coulant à grande vitesse sur la roche moutonnée, rendue glissante par les eaux de fonte (on était l'après-midi). L'éboulement de 1962 s'est produit sans intervention sismique, mais au cœur de la saison chaude, à une époque où la fusion était particulièrement intense. L'un et l'autre sont des manifestations particulières du déséquilibre actuel des glaciers, qui sont en récession.

Dans les deux cas, la masse de glace est arrivée très vite dans la vallée qui passe au pied de la paroi où se trouve le glacier perché de Huascarán-Nord. Elle s'est déplacée à la manière de ce que les Américains appellent « avalanche de débris », rebondissant contre le versant opposé et, même, le franchissant en 1970. C'est ce qui fait que Yungay a été détruite alors qu'en 1962 le matériel, canalisé par la vallée, n'avait détruit que Ranrahirca.

Ces éboulements de glace sont passés, en 1962 comme en 1970, vers l'aval, à des laves torrentielles. La glace s'est fragmentée contre les obstacles en cours de route. On a évalué sa vitesse à 80 km/h et même à plus de 300... Peu importent les divergences, l'ordre de grandeur compte seul. Elle a libéré simultanément un peu d'eau de fusion. Il s'est formé ainsi une sorte de sorbet qui s'est incorporé graduellement une quantité croissante de matériaux en parcourant vers l'aval des pentes qui diminuent. Les matériaux meubles ont été ramonés : moraines, formations de pente, cône de déjections fort

grossier. On est passé ainsi progressivement de l'éboulement de glace à la lave torrentielle. Cette transition s'est produite d'une part dans l'espace, de l'autre dans le temps. Dans l'espace, elle est moins accusée : en effet, les circonstances de la catastrophe montrent que l'arrivée du matériel a été extrêmement rapide. Cependant, en juillet, nous avons pu voir, sur la place de Yungay, la tête des palmiers émerger de l'accumulation qui avait enseveli la bourgade. Ils n'étaient pas tués. Le mouvement s'était donc fortement ralenti vers l'aval et le transport avait revêtu ici l'allure d'une lave torrentielle, non d'un éboulement. Il est vrai qu'une crête avait été franchie par les matériaux et avait certainement freiné leur progression. Nous avons observé, sur son sommet, des blocs granitiques atteignant 4-5 m de long dans une matrice argilo-sableuse. Dans le temps, même transformation. Lors de notre mission, nous avons pu observer, sur le cône principal, ayant détruit en partie Ranrahirca, un matériel fin en surface, recouvrant une formation riche en blocs et en pierres. Son modelé était bosselé, avec d'énormes blocs en saillie. On y voyait des fentes de dessiccation. Ce matériel avait été repris en fin de catastrophe et avait alimenté un petit cône emboîté dans le grand. A Yungay, la partie aval du bourg n'a pas été recouverte. On voit l'extrémité d'une langue boueuse, figée, ayant bousculé quelques constructions, se terminer en talus de 1 à 2 m de haut, à la manière du front d'un glacier rocheux. La viscosité était élevée, plus proche de celle d'une coulée boueuse que de celle d'une lave torrentielle. Un épisode du type coulée boueuse semble donc avoir succédé à l'épisode lave torrentielle engendré lui-même par l'éboulement de glace. Enfin, sur le cône de Ranrahirca, une entaille torrentielle a succédé aux manifestations précédentes. Elle a vite été bloquée par la formation d'un pavage dans le matériel de la lave et, en juillet, au pont provisoire de la route, ne dépassait pas 2-3 m.

Les éboulements de glace, dans cette région, ne sont malheureusement pas spécifiques des séismes. Ils résultent d'un déséquilibre du glacier et du modelé. Mais les ébranlements sismiques favorisent leur déclenchement. Celui du 31 mai 1970 est une séquelle immédiate du tremblement de terre.

Les conséquences en sont graves. Il a exterminé presque toute la population de Yungay. Il a aussi modifié profondément la dynamique du Santa. Le cône énorme mis en place sous l'effet de la lave a barré le fleuve. A l'aval, dans la région de Chimbote, des témoins nous ont affirmé que le Santa avait fortement décru, presque cessé de couler, puis que l'« alluvion » était venue : un gonflement subit des eaux charriant des débris de toutes sortes et chargées de boue. Les eaux du haut Santa se sont mises en charge derrière le cône de la lave puis ont forcé leur passage. Une débâcle s'est produite, très violente. Elle a emporté une quantité de boue et de sable considérable. La densité élevée du liquide fort visqueux a facilité la prise en charge de galets, de blocs, de débris de toutes sortes. Les orangers et les autres cultures du fond de vallée ont été inondées. Des limons, des sables les ont recouvertes, mais généralement laissent transparaître le dessin du parcellaire, sauf dans l'axe de la vallée. A Caraz, à l'amont de la ville, une vaste nappe de sable a tout

Illustration non autorisée à la diffusion

Illustration non autorisée à la diffusion

B. Partie aval du cône de Yungai vue de l'amont. Une nappe de boue liquide à gros blocs est étalée à la suite de lave provoquée par l'éboulement glaciaire dû à la secousse sismique. Elle a débordé jusque sur la place centrale de Ranrahirca et barré le Santa. Le Santa, barré, a accumulé du matériel sur son fond de vallée en amont de ce barrage. On peut observer des chenaux de décrue sur le cône de la lave.

Illustration non autorisée à la diffusion

Illustration non autorisée à la diffusion

D. Cône de lave dû à l'éboulement glaciaire du 31 mai 1970 à Ranrahirca. Il s'agit de la surface du cône visible sur la photographie précédente. De gros blocs anguleux percent hors d'une matrice argilo-limoneuse très abondante, mise en place par la lave qui a suivi l'éboulement. Il faut noter la pente forte de l'accumulation qui a recouvert le bas du cône au pied de la Cordillère Noire... On peut observer les fentes de dessiccation.

(Clichés J. Tricart.)

Illustration non autorisée à la diffusion

Pl. II. A. Le Santa, vu du pont de la panaméricaine vers l'aval. On peut noter l'abaissement du matériel. Les matériaux apportés par la lave consécutive au séisme s'étalent dans le lit majeur. Ils recouvrent les cailloutis mis en place par le régime fluvial. On peut observer une série de gradins dus à l'entaille de décrue et d'autre part les fentes de dessiccation, d'autre part les eaux encore boueuses.

B. Le Santa, juste en aval du cône de Yungai. La terrasse würmienne a été entièrement recouverte par l'onde de crue boueuse provoquée par la rupture de barrage dû au cône de Yungai. Les abrupts ont été recouverts et blanchis par le matériel, mais celui-ci a été trop liquide pour les fossiliser. On peut noter la forte pente vers l'aval du sommet de la nappe d'inondation visible sur le pied de la Cordillera Negra.

Illustration non autorisée à la diffusion

Illustration non autorisée à la diffusion

C. Le Santa, vers l'amont, à environ 6 km en aval de Caraz. C'est la sortie d'une petite gorge. On peut noter le recouvrement de la nappe würmienne par la lave. Il y a sapement de la nappe convexe à cause de la rapidité du flot. L'entaille du lit fait apparaître la terrasse würmienne empâtée par les dépôts de la lave.

D. Le lit du Santa en aval de Caraz à l'entrée de la gorge, vue vers l'amont. On peut observer, à gauche, le pied de la Cordillera Blanca, avec les hautes terrasses d'apport proglaciaire et les cônes würmiens venant se fondre dans la basse terrasse, ennoyée sous le matériel de la lave ; cette terrasse correspond aux plantations d'orangers partiellement recouvertes. Il faut noter l'énormité de la nappe de remblaiement de la lave qui a débordé sur la terrasse würmienne. On peut observer les chenaux de décrue sur le matériel, en taille postérieure. Les abrupts ont été recouverts par la boue liquide mais non fossilisés.

Illustration non autorisée à la diffusion

recouvert, le cône de Caraz ayant fait obstacle. En aval, dans la gorge, la centrale électrique de Huallanca a été détruite et ses ruines noyées dans un béton de blocs, de pierres, de terre fine. Des accumulations importantes ont eu lieu, accompagnées de débordements, sur le cône de déjections littoral. Des diffluences se sont produites, endommageant les cultures, certaines habitations, détruisant la voie ferrée. Quelques sapements de versants ont eu lieu. L'aspect général du fond de vallée ressemble à celui du Queyras après la crue de juin 1957, mais avec une tout autre dimension. A l'entrée amont de la gorge, des terrasses de crue se sont formées lors de la catastrophe. Leur altitude relative atteint 15-20 m. Elles sont formées par la terrasse würmienne, recouverte de boue et empâtée tant par les apports du Santa que par des éboulements de pied de versant et de petits cônes latéraux. Les apports de la crue ont été ensuite réincisés et la terrasse würmienne a été grossièrement exhumée. Nous retrouvons là, comme dans le Queyras, la succession d'une phase d'accumulation, sous l'effet de chasse d'eau de la rupture d'un barrage (ici, le cône de Ranrahirca), et d'une phase d'incision immédiatement postérieure, de type torrentiel.

Le régime géomorphologique du Santa a été profondément modifié par cette crue catastrophique. Auparavant, ce fleuve montagnard charriait des quantités de débris relativement modestes. Il édifiait par endroits des bancs axiaux mais son lit n'était pas du type à chenaux anastomosés. Il coule maintenant au milieu d'une nappe de matériel non fixé, que la végétation recolonisera lentement. Les débris mobilisables sont surabondants. Les bancs de galets se multiplient, occasionnant de petites diffluences qui engendrent, dans les secteurs peu encaissés, des chenaux anastomosés. Tel est le cas entre Yungay et Caraz. La torrentialité du cours d'eau et ses transports solides tendront à s'accroître durablement. Nous avons recommandé de tenir compte de ces modifications pour la reconstruction ou le remplacement de la centrale de Huallanca et des prises d'eau d'irrigation de la basse vallée.

Les grandes nappes de sable ayant recouvert les orangeraias de Caraz sont remaniées par le vent. Nous avons observé le même phénomène près de Mont-Dauphin, sur la Durance, après la crue de juin 1957.

D. Des effets indirects plus tardifs : les mouvements de masse

Les secousses et les modifications hydriques qu'elles ont produites dans les formations sablo-argileuses influent aussi sur les mouvements de masse. Nous avons déjà signalé quelques foirages superficiels ayant fonctionné lors même du séisme. Ce n'est pas tout. Des changements plus importants ont eu lieu. Les environs immédiats de Recuay en offrent un exemple.

La petite ville de Recuay est en amont de Huaraz, au bord du Santa. En face d'elle, le versant, d'une centaine de mètres de haut, est formé par des matériaux lacustres limono-argileux avec quelques lentilles de cailloux dues à des épandages. Elles facilitent l'alimentation en eau. Ce versant limite une lanière de plateau recouverte de galets. Le modelé et les dépôts indiquent

des mouvements de masse chroniques, par paquets, du type rotatif. Ils ont engendré quelques gradins dans le versant et des étangs, occupant des dépressions fermées, sur la lanière de plateau.

Quelques jours après le séisme, sans que le Santa soit en crue, l'eau s'est mise à monter au droit de la ville. Elle a inondé des pâturages, des champs, des jardins, des chemins. Vers la mi-juillet, elle arrivait tout près des maisons les plus basses, à une cote à peine inférieure à la leur. Simultanément, le cours du Santa s'était légèrement modifié. Il avait abandonné son lit antérieur au séisme, placé juste au pied du versant droit et débordait sur des prés qui étaient en partie recouverts d'alluvions (sables et graviers, quelques petits galets). Le nouveau passage de l'eau était sensiblement plus bas que le lit antérieur abandonné. La dénivellation pouvait être estimée à 1,5 m, voire 2 m. En aval, le Santa faisait des rapides, nouveaux également. En amont, il s'étalait largement, en une petite expansion lacustre, au courant plus lent, dans laquelle les eaux édifiaient un épandage alluvial.

Ces modifications dans le profil longitudinal du fleuve sont une conséquence indirecte du séisme. Elles résultent du déclenchement d'un glissement par rotation, affectant la rive droite, où de semblables phénomènes sont chroniques. Il est probable que les secousses telluriques ont favorisé la formation de fissures béantes parallèles au versant droit, en forte pente initiale. Les eaux des étangs et marais situés sur le plateau ont pénétré dedans. Il se peut aussi que ces fissures aient drainé des écoulements souterrains profitant de lentilles caillouteuses. De toutes manières, elles se sont transformées en plans de glissements courbes, le long desquels s'est amorcé un mouvement par rotation. Par rétroaction positive, le mouvement s'est accéléré ensuite de lui-même, les fissures, en s'accroissant, devenant plus drainantes et concentrant davantage d'eau. Notre visite s'est placée au moment où cette accélération était bien amorcée.

Le bas de la masse glissée se trouve dans le fond de vallée, au pied du versant droit. Le mouvement de rotation la soulève, ce qui explique l'abandon du lit initial du Santa. Nous avons pu observer des alluvions toutes fraîches déformées en bourrelets anticlinaux, fissurées, voire légèrement chevauchantes les unes sur les autres. Cette pseudo-tectonique était du type compressif, ce qui correspond bien au bas d'un glissement par rotation. Certains bourrelets atteignaient déjà 0,5-0,6 m de haut. Sur la rive gauche de l'ancien lit du Santa, ces phénomènes n'intervenaient pas et l'ampleur du soulèvement diminuait. Nous avons pu reconnaître, dans l'axe de la vallée, une faille affectant le substratum. C'est elle qui a servi de butoir au glissement par rotation. Le déversement du Santa après le séisme s'effectuait à ses abords, pour profiter du compartiment W de la faille, en rive gauche, non soulevé par le glissement. C'est ce même soulèvement qui explique d'une part l'effet de barrage du Santa, avec l'expansion lacustre, et, de l'autre, les rapides à la sortie du secteur de fond de vallée affecté.

Sur le versant droit, nous avons pu observer, dans les friches, des fissures béantes de 10 cm de large en surface, profondes de plusieurs mètres. Certains

sourcins issus de lentilles caillouteuses s'y perdaient. Entre ces fissures, on pouvait voir des parois tranchées par cisaillement, d'une pente de 60-70°, parfois lissées et polies, avec des traces de frottement. Elles étaient formées par les gradins entre des paquets inégalement affaissés. Ceux-ci étaient allongés, avec une largeur de 10-20 m et une longueur de 100 à 200. Leur dessin était généralement arqué, avec un grand rayon de courbure, esquissant une niche de près d'un kilomètre de diamètre. La hauteur des parois entre les lanières était de quelques mètres.

Ce glissement aurait pu provoquer une catastrophe si le séisme s'était produit en période pluvieuse. En effet, le matériel étant plus humide, le mouvement aurait été plus rapide. Des quantités d'eau importantes se seraient engouffrées dans les fissures béantes. L'effet de barrage sur le Santa aurait été plus fort. Le fleuve en crue aurait inondé une partie de Recuay, puis le barrage se serait rompu, probablement de manière brutale. Aussi avons-nous conseillé d'installer à Recuay un petit groupe d'intervention urgente, avec des soldats du génie et des engins pour ouvrir en cas de besoin, rapidement, une brèche dans la masse soulevée du pied du glissement et empêcher que de tels phénomènes se produisent.

Le nombre relativement faible des mouvements de masse provoqués par le séisme s'explique par la saison à laquelle il s'est produit. La fréquence des remblaiements lacustres dans le fossé du Santa est, au contraire, favorable à ce type de phénomènes.

Le tremblement de terre du 31 mai 1970 est donc à l'origine d'importantes manifestations morphodynamiques. Il est étrange que peu d'observateurs les aient notées, en dehors de l'éboulement de glace du Huascarán, particulièrement spectaculaire. A vrai dire, seule la France a envoyé, pour aider le Pérou, une mission de géomorphologues¹. Notre discipline avait un rôle à jouer en l'occurrence pour détecter des séquelles périlleuses et se protéger contre elles (glissement de Recuay) et pour apprécier la qualité des sites susceptibles de servir à réinstaller la population. Comme nous l'avons montré, une grande partie des dégâts et des victimes s'explique par le comportement des formations superficielles sous l'effet des secousses sismiques et non par la géologie profonde.

II. LES ÉTUDES DE SITES POUR LA RECONSTRUCTION

Notre mission de terrain a eu pour objet de répondre à la demande du Gouvernement péruvien : où réinstaller les agglomérations détruites ? Elle a été complétée par un important travail de photo-interprétation, pour lequel nous avons disposé d'excellents clichés du Servicio Aerofotográfico Nacional du Pérou, formant deux couvertures. L'une, régulière, antérieure

1. LLIBOUTRY (L.), MENCL (V.), SCHNEIDER (B.), VALLON (M.), *Evaluación de los riesgos telúricos en el Callejón de Huaylas, con vista a la reubicación de poblaciones y obras públicas*, Paris, U.N.E.S.C.O., 1970, BMS-RD/SCE, 111 p., 10 fig., 1 pochette de 5 cartes.

au séisme ; l'autre prise peu de temps après lui. La N.A.S.A. a organisé une mission aéroportée d'enregistrements de télédétection. Le Gouvernement péruvien nous a donné toutes les autorisations nécessaires pour que nous puissions en obtenir les résultats. Malheureusement, le prix qui nous a été demandé dépassait de beaucoup les moyens dont dispose le Centre de Géographie appliquée. Nous avons donc dû renoncer à utiliser ces enregistrements, malgré l'intérêt qu'ils présentaient, pour remplir la mission qui nous avait été confiée. Par contre, nous avons pu bénéficier des cartes au 1/25 000 dressées pour tout le Callejón de Huaylas par la Corporación Peruana del Santa. Elles ont servi de fond pour l'établissement de nos propres documents.

En combinant les observations de terrain et l'étude systématique des photographies aériennes, nous avons examiné le degré de sécurité offert par le terrain aux environs des diverses agglomérations sinistrées. La nature des risques et leur intensité ont été appréciées. En effet, il n'est pas question d'agir sur les séismes eux-mêmes. L'attitude de l'homme ne peut être qu'une adaptation passive, défensive : chercher les sites où les conséquences des séismes seront les moins dommageables pour lui, compte tenu du type de constructions qu'il peut édifier étant donné son niveau de vie. L'objet de nos recherches était de permettre au Gouvernement péruvien d'établir un programme de reconstruction aussi satisfaisant que possible du point de vue de la sécurité. L'urgence a été un élément contraignant. Il fallait réduire autant que possible la période des installations d'urgence provisoires et permettre au Gouvernement d'utiliser les crédits mis à sa disposition par les organismes internationaux, qui ont fait un gros effort en faveur du Pérou, et par quelques pays amis. Nous avons donc dû, avec des moyens fort limités, travailler très rapidement. Cela explique que nous n'ayions pas pu exploiter autant que nous l'aurions voulu les aspects purement scientifiques de notre travail. Mais il était impératif d'établir aussi exactement que possible le degré de sécurité des divers sites.

Les facteurs suivants ont été pris en considération, à la suite des observations, effectuées au cours de notre mission, que nous venons d'exposer :

a) La nature des formations superficielles. La granulométrie est déterminante en l'occurrence. Elle commande, en effet, l'élasticité des matériaux et les risques d'amplification des secousses, le danger de compaction et les conditions hydriques. Nous avons indiqué l'origine des formations pour répondre à des préoccupations scientifiques. Cependant, celle-ci a joué un rôle primordial dans la photo-interprétation. C'est, en effet, à partir des unités géomorphologiques, apparaissant par leur modelé, que nous avons souvent délimité l'extension des divers types de matériaux. Les plus favorables sont les nappes de sable et les cailloutis purs, sans éléments fins. A Chimbote, par exemple, la crête du cordon littoral peut être utilisée pour des constructions, des rues, des tuyauteries (adduction d'eau, égouts), mais non son flanc intérieur, au contact de l'ancienne lagune, où le sable s'interstratifie avec des dépôts fins compactables. Le meilleur site se trouve au sud de la ville

actuelle : il est formé par des remontées de sables éoliens reposant directement sur d'anciens cordons de galets marins et sur le socle cristallin. Dans le Callejón de Huaylas, les terrasses et les cônes de déjections bien lavés, uniquement caillouteux, sont des formations stables, où les secousses ne sont pas amplifiées. Encore ne faut-il pas qu'ils soient soumis à d'autres menaces.

b) Les conditions hydriques sont importantes, comme nous l'avons vu. Les sites humides, mal drainés, sont dangereux. Les secousses y provoquent une expulsion de l'eau qui est suivie d'affaissements dus à la compaction. Ces phénomènes se produisent dans les matériaux fins : limons et argiles. Dans certains sables (sables fins surtout), des effets de thixotropie peuvent apparaître lorsque le matériau est gorgé d'eau. Cependant, nous n'en avons pas observé d'exemple dans le Centre-Nord du Pérou. Les suintements peuvent aussi alimenter les matériaux fins en eau et leur faire franchir les limites de liquidité ou de plasticité. La fissuration du sol par les secousses ou par les tassements qu'elles occasionnent sont souvent le point de départ de mouvements de masse qui peuvent fort bien se manifester insidieusement au début et se produire avec un certain retard par rapport au séisme qui les a provoqués. Ils n'en sont que plus dangereux, comme le montre l'exemple de Recuay. C'est pourquoi nous avons aussi levé soigneusement les secteurs mal drainés, les suintements, les étangs, les aires marécageuses et les traces d'anciens mouvements de masse (loupes de solifluxion, niches de foirages, coulées boueuses...). Leur réactivation, comme séquelle d'un tremblement de terre, est toujours à craindre.

c) Les processus morphogénétiques sont un troisième facteur dont il faut tenir compte. Nous ne nous sommes pas limités, bien sûr, à ceux d'entre eux qui sont la conséquence immédiate des séismes. Nous avons pris en considération tous ceux qui peuvent constituer une gêne pour l'habitat. Tel est le cas, par exemple, des ravinements, du ruissellement diffus. Une attention particulière a été accordée aux aires susceptibles d'être affectées par des mouvements de masse, les séismes favorisant le déclenchement de ce phénomène. Il en est de même des éboulis. Les nappes alluviales mises en place par des débâcles glaciaires ont été repérées avec un soin tout particulier. Ces manifestations sont particulièrement destructrices : elles ont détruit une partie de Huaraz en 1941. Comme nous l'avons vu, elles peuvent se produire sans séismes, mais ceux-ci les déclenchent souvent. Il existe bien un service de surveillance des hautes vallées, mais la catastrophe l'a complètement désorganisé. Elle a aussi modifié le comportement des glaciers, rendu certaines hautes vallées inaccessibles.

d) La topographie, enfin, joue doublement. D'abord par l'obstacle qu'elle oppose à la construction et à la circulation, ensuite par l'influence qu'elle a sur les processus. Nous nous sommes contentés de reporter les courbes de niveau sur nos cartes. Établir des cartes de pentes eût inutilement retardé le travail.

Nous avons reporté ces diverses données sur des cartes au 1/25 000 de tous les secteurs fixés par les autorités péruviennes, auxquels nous avons ajouté ceux qui nous semblaient susceptibles d'aider à mieux comprendre les phénomènes ou offrir des sites possibles de réinstallation des habitants. En fait, cela a abouti à cartographier, sur une largeur de plusieurs kilomètres, tout le fond du fossé du Santa depuis un peu en aval de Huaylas jusqu'en amont de Recuay, sur près de 140 km de long.

Les cartes que nous avons remises au Gouvernement péruvien ont été établies en deux couleurs afin de pouvoir être reproduites par des procédés peu coûteux, à la mesure de nos moyens.

— Toutes les données permettant de décrire le milieu physique de la manière que nous avons exposée plus haut ont été figurées en noir. Il s'agit des courbes de niveau, de la nature des matériaux, de la dynamique. Nous présentons ainsi une *information*.

— En surcharge rouge, nous avons porté nos appréciations relatives au degré de sécurité offert par le milieu. Nous avons distingué quatre classes : déséquilibre latent et grave, déséquilibre permanent, déséquilibre possible, risques limités. Les surcharges rouges sont de moins en moins intenses au fur et à mesure que le danger diminue. Nous avons laissé en blanc les aires stables.

Ce système a pour objet de bien distinguer ce qui est information (en noir) de ce qui est appréciation (en rouge). Certaines de nos appréciations peuvent être mises en doute par d'autres chercheurs. Certaines techniques, plus ou moins coûteuses, peuvent aussi permettre de contrôler les dangers que nous avons identifiés. S'il est décidé de les mettre en œuvre, la valeur des appréciations peut s'en trouver modifiée. Les étendues qui ne sont pas surchargées en rouge ne sont pas nécessairement propres à la construction. Elles n'offrent pas de dangers reconnus. Mais, quoique sûres, elles peuvent comporter certains inconvénients plus ou moins contraignants, comme, par exemple, des pentes trop fortes, un mauvais drainage... C'est le cas, par exemple, au nord de Huaraz. Cependant, le système de cartographie adopté permet de faire nettement la différence entre ce qui est un vrai danger et ce qui n'est qu'un inconvénient. C'est ce qui nous semble être l'essentiel.

Les cartes sont accompagnées chacune d'un texte concis qui définit les types et les degrés de dangers que nous avons identifiés. Nous y justifions nos appréciations et nous les définissons de manière plus précise. Nous avons reproduit ci-dessous quelques-unes de ces cartes, malheureusement en noir et blanc, et les textes qui les accompagnent, à titre d'exemple.

SECTEURS DE HUARAZ, RECUAY ET TINCO (PEROU)

Etude géomorphologique des limitations physiques à l'aménagement

GÉOMORPHOLOGIE

Formes fluviales

-  lit incisé
-  sapement vif, rebord de terrasse actuel
-  autre talus, rebord de terrasse ancien
-  cône de déjection
-  terrasse
-  cône - terrasse

Formes glaciaires

-  moraine avec arc morainique
-  accumulation proglaciaire
-  cuvette d'affaissement noyée, marécageuse

Actions hydriques

-  décapage par ruissellement diffus
-  ravinement
-  bad-lands
-  ravin important

Mouvements de masse

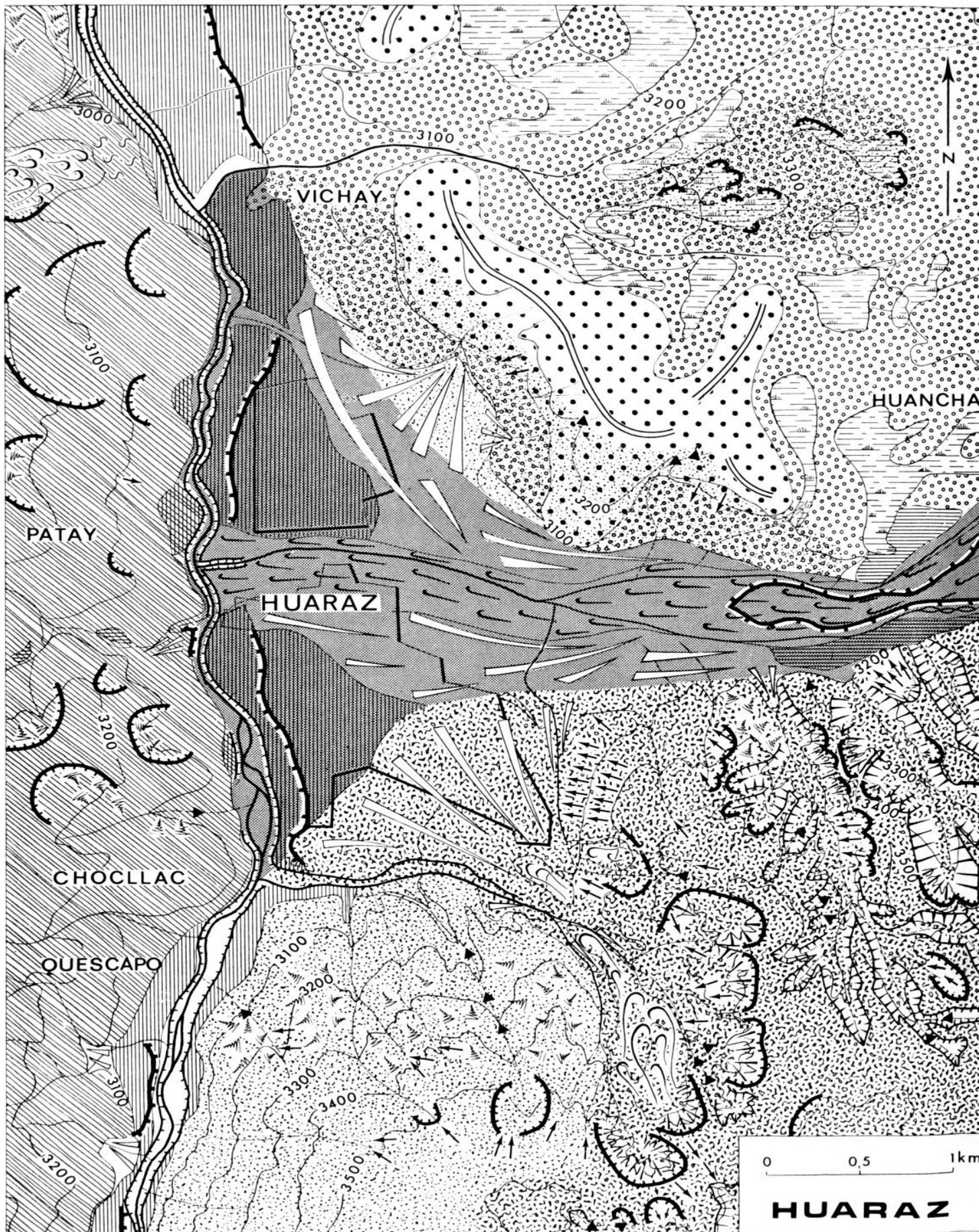
-  solifluxion
-  loupe de glissement
-  lave torrentielle
-  coulée boueuse
-  niche
-  paquet affaissé, glissement par rotation

Autres formes

-  éboulis et avalanches de débris
-  épandages

- LIMITATIONS PHYSIQUES A L'AMENAGEMENT

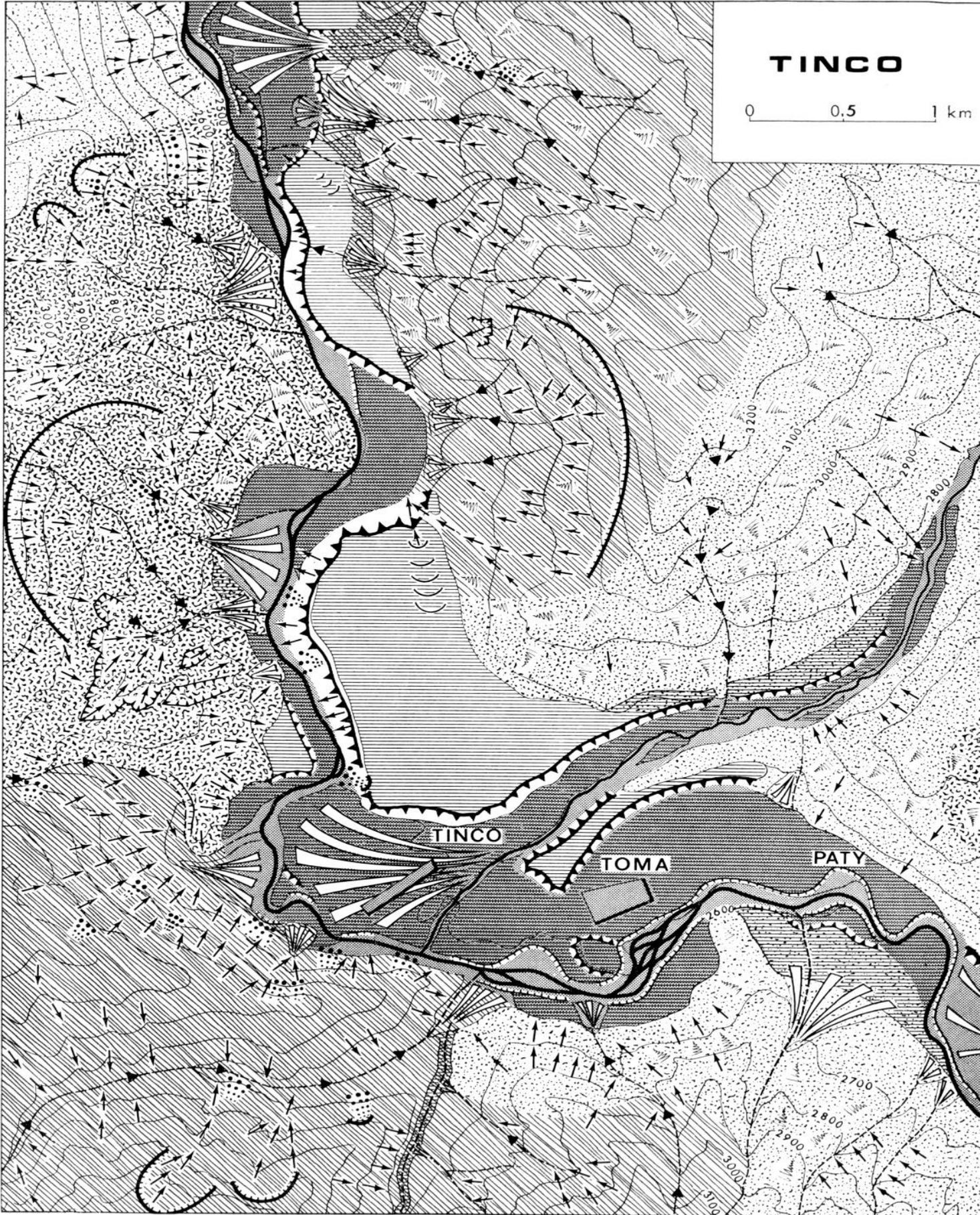
-  zone de déséquilibre latent et grave: risque de renouvellement de la lave torrentielle
-  zone de déséquilibre permanent niches et coulées boueuses bad-lands, ravinement intense
-  zone de déséquilibre possible niches de coulées boueuses récentes prêtes à refonctionner
-  zone à risques limités ravins, décapage par ruissellement diffus, petits arrachements
-  zone stable risque de crues catastrophiques, drainage insuffisant





TINCO

0 0,5 1 km



UN PROBLÈME DE GÉOMORPHOLOGIE APPLIQUÉE : LE CHOIX DES SITES D'HABITAT DANS UNE RÉGION SISMIQUE (ANDES CENTRALES, PÉROU). — Résumé. — Le séisme du 31 mai 1970 a affecté surtout les géosutures délimitant des compartiments tectoniques. L'une d'elles est la vallée du Santa, au pied de la Cordillère Blanche. Un très grand nombre de victimes a été causé par l'éboulement d'une masse de glace du Huascarán, en équilibre instable (glacier en cours de recul, sur des roches moutonnées en forte pente). Cet éboulement s'est transformé vers l'aval en une lave torrentielle qui a détruit Yungay et barré le Santa. La débâcle due à la rupture de l'obstacle a ravagé la vallée et la gorge à l'aval.

Le comportement des constructions lors du séisme est fortement influencé par des caractéristiques géomorphologiques qui, dans certains cas, provoquent une amplification des ondes. Les formations meubles contenant des aquifères se compactent et expulsent une partie de leur eau, ce qui engendre des affaissements et peut provoquer la formation de marais ou d'étangs. Le séisme a provoqué un certain nombre d'éboulements et activé des glissements de terrain chroniques (Recuay). Il a fait rejouer de 2-3 m une faille sur le flanc de la Cordillère Blanche.

L'équipe du Centre de Géographie appliquée, envoyée au titre de l'aide française, a étudié les effets du séisme et dressé des cartes appréciant la plus ou moins grande aptitude des terrains à la reconstruction des agglomérations.

A PROBLEM OF APPLIED GEOMORPHOLOGY : THE CHOICE OF BUILDING AREAS IN A SEISMIC REGION (CENTRAL ANDES, PERU).

Abstract. — The seism of May 31, 1970 essentially shook the joints between the tectonic compartments. Among them there is the Santa valley, at the foot of the White Cordillera. Many casualties were caused by the collapse of a huge mass of ice from the unstable Huascarán (a retreating glacier lying on steep and hilly rocks). This collapse became downstream a torrent-like lava which destroyed Yungay and blocked up the Santa. The break-up of the obstacle devastated the lower valley and the glen downstream.

The behaviour of the buildings during the seism largely depends on geomorphological features which, in some cases, amplify the waves. The loose formations containing water layers get compacter and eject some water, hence causing some subsidences and sometimes the formation of marshes or pools. The seism caused some collapses and quickened some chronic landslides (Recuay). It made a fault work again (2-3 meters) on the side of the White Cordillera.

The Centre de Géographie appliquée team, sent as a part of the French assistance, surveyed the effects of the seism and drew some maps showing the fitness of the grounds to reconstruction.