

Interprétation des glissements de terrain accompagnant le grand séisme du Chili,

par H. TAZIEFF.

Depuis 1904, année à partir de laquelle existent des séismogrammes permettant le calcul des magnitudes, seules 6 secousses de magnitude égale ou supérieure à 8,4 se sont produites dans le monde (31.X.1906, Colombie-Équateur, $M = 8,6$; 17.VIII.1906, Valparaiso, Chili, $M = 8,4$; 3.I.1911, Tien-Shan, Chine, $M = 8,4$; 16.XII.1920, Kansu, Chine, $M = 8,5$; 2.III.1933, Sanriku, Japon, $M = 8,5$; 15.VIII.1950, Nord Assam, Inde, $M = 8,5$).

La principale des graves secousses qui ont ravagé le Chili (22.V.1960, 19 h 11 min) et dont la magnitude calculée à Strasbourg (comm. pers. Prof^r J. ROTHÉ) est comprise entre 8,5 et 8,6, fait donc partie des chocs les plus violents connus. Les magnitudes calculées à d'autres grands observatoires sont les suivantes : Pasadena (U.S.A.), 8,3; Berkeley (U.S.A.), 8,5; Collenberg (Allemagne), 8,7; Kew (Grande-Bretagne), 8,9; U.R.S.S., 8,4; Matsushiro (Japon), 8,75. Ce paroxysme avait été précédé de 5 secousses de $M = 6,5$ à 7 durant les 33 heures qui avaient précédé. Des répliques nombreuses et violentes ont suivi : 25 d'entre elles furent ressenties à Strasbourg, dont 13 avaient une magnitude comprise entre 6 et 7,5 (comm. pers. Prof^r J. ROTHÉ).

Il ne faut pas confondre magnitude et intensité : certains séismes, dont l'intensité a atteint le degré XI et que leurs ravages ont rendus célèbres, étaient de magnitude inférieure, tels celui de San Francisco en 1906, où $M = 8,25$, celui du Kwanto (Tokyo) de 1923, où $M = 8,2$, ou même les « petits » séismes meurtriers d'Agadir et de Lar (1960), où $M = 5,7$ à 5,8; dans ces deux derniers exemples l'énergie libérée était 20.000 fois

inférieure à celle de la secousse majeure de la série chilienne ⁽¹⁾ [6]. (Voir fig. II.)

Une superficie de 160.000 km², comprise entre les parallèles 36° et 43° S, d'une part, la Cordillère des Andes et la côte du Pacifique (voir fig. I), d'autre part, a été ébranlée avec une violence qui permet l'attribution du degré VII de l'échelle internationale (accélération comprise entre 100 et 200 mm/sec²) (épouvante générale, écroulement de cheminées en mauvais état et de clochers d'églises mal construits, etc.). Le degré VIII correspondant à une accélération comprise entre 250 et 500 mm/sec², a été atteint dans la plupart des localités que nous avons visi-

⁽¹⁾ L'intensité d'une secousse s'évalue d'après les effets de celle-ci, effets affectant les sens, les constructions humaines ou la surface terrestre. Ces effets sont classés en ordre croissant et l'échelle désormais la plus utilisée est celle de Mercalli-Forel modifiée, dans laquelle sont définis et décrits 12 degrés d'intensité allant du séisme à peine perceptible jusqu'à la catastrophe totale.

L'intensité varie avec la distance de l'épicentre et avec la profondeur du foyer. Ainsi que le remarque G. A. EIBY [4], un choc peut avoir autant d'intensités qu'il y a d'observateurs, mais ne possède qu'une magnitude.

La magnitude est un chiffre directement lié à l'énergie totale de la secousse considérée. Elle a été définie par C. F. RICHTER [1] comme étant le logarithme de l'amplitude maximale mesurée en microns sur l'enregistrement d'un séismographe à torsion Wood-Anderson standard (T = 0,8 sec, amortissement = 0,8, grandissement = 2.800 fois), placé à 100 km de l'épicentre. Cette définition de la magnitude avait été élaborée pour l'investigation des séismes de Californie. Étendue au reste du monde, elle a forcément dû subir des modifications, puisque les distances épacentrales peuvent atteindre 20.000 km, que les séismographes sont de types divers et que l'on peut baser les calculs de magnitude sur l'amplitude des ondes profondes ou sur celle des ondes superficielles.

L'échelle logarithmique des magnitudes va de 0 (correspondant à l'énergie minimale nécessaire pour faire jouer ou rejouer une faille) à une valeur proche de 9. Tout séisme de $M \geq 8$ est catastrophique.

Les magnitudes calculées à Strasbourg (Prof^{rs} J. ROTHÉ et E. PETERSCHMITT) sont basées sur l'amplitude des ondes de surface. Celles que l'on calcule d'après l'amplitude des ondes profondes sont quelque peu différentes. GUTENBERG et RICHTER [2] [3] proposent les rapports ci-après, où M_L est la magnitude selon la définition initiale de RICHTER, M_S , la magnitude basée sur l'amplitude calculée au sol pour les ondes superficielles de période = 20 sec environ des séismes superficiels et M_B , la magnitude basée sur le rapport amplitude/période des séismes superficiels aussi bien que profonds. L'énergie est calculée à partir de la formule empirique :

$$\log E = 9,4 + 2,14 M_L - 0,054 M_L^2.$$

M_L	3,0	5,0	7,0	9,0
M_B	4,0	5,5	6,8	8,1
M_S	2,4	4,7	6,9	±8,7
Log E	15,4	18,9	22,1	25,2

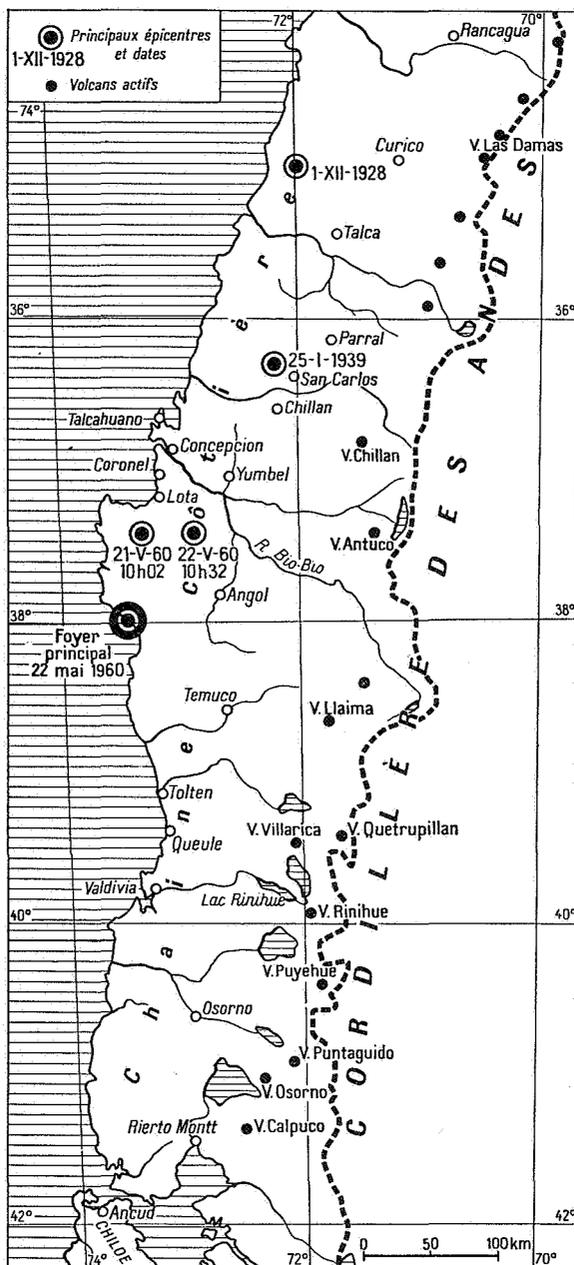


FIG. I. — Carte schématique du Chili central.

Épicentres et volcans actifs.

(D'après J. P. ROTHÉ.)

ERRATUM. — Du S. vers le N., il y a lieu de modifier les noms propres suivants : Rierto Montt en Puerto-Montt, V. Calpuco en V. Calbuco, V. Puntaguido en V. Puntiaquido, V. Las Damas en V. Tinguiririca.

tées dans cette région. Des intensités de IX (γ entre 500 et 1.000 mm/sec², grand nombre de maisons sérieusement endommagées, certaines écroulées) et X (γ entre 1.000 et 2.000 mm/sec², la plupart des bâtiments détruits avec leurs fondations, rails de chemin de fer tordus, dommages aux ponts, fentes dans les rues, éboulements, etc.) ont été atteintes et même dépassées, notamment à Valdivia, Puerto Montt et dans la région de Rinihue-Panguipulli.

La superficie délimitée par chaque isoséiste peut être multipliée par un facteur 2, l'épicentre calculé à Strasbourg, aussi bien que celui que nous avons pu déduire de nos investigations macroséismiques, se situant au large de la côte, sous le niveau de la mer, ce qui porte à 320 ou 350.000 km² la surface secouée au degré VII.

La secousse maximale du 22 mai fut suivie par un tsunami qui ravagea les côtes chiliennes entre les 38^e et 43^e parallèles avant d'aller dévaster celles de Hawaii et de Hokkaido. Il est permis de supposer que ce tsunami a été provoqué par un changement brutal du fond marin (faille, graben, horst, glissement de terrain,...).

Les effets majeurs du séisme peuvent être répartis en quatre catégories différentes :

1. *Destructions (partielles ou totales) des édifices, routes, voies de chemin de fer, installations portuaires, dues au choc séismique proprement dit.* Il est à noter que la nature du sol a comme toujours joué un grand rôle dans l'importance des destructions (les remblais, par exemple, en accentuant fortement l'ampleur par effet de résonnance).

2. *Destructions (généralement totales) dues au tsunami.*

3. *Affaissement d'une bande côtière de plusieurs centaines de kilomètres de long et vraisemblablement de plusieurs dizaines de kilomètres de large.* Nous avons pu mesurer à Castro (île de Chiloé), une différence de 1,30 m entre le niveau actuel et celui d'avant le séisme; à Ancud, Maullin, Mehuin, Queule, Toltèn, Valdivia, nous avons fait des observations similaires sans toutefois pouvoir mesurer les dénivellations; à Puerto-Quellon, sur le 43^e parallèle, la subsidence serait de 1,80 m; par contre, d'après une communication personnelle du Docteur LOMNITZ, Directeur du Service Séismologique du Chili, le sol se serait soulevé, de 1 m environ, sur le 38^e parallèle. D'après P. St-

AMAND [5], un soulèvement de 1,50 m a été constaté à Lebu. On estime à 60.000 ha la superficie perdue par inondation définitive sous les eaux marines, due à cet affaissement.

La zone affaissée doit vraisemblablement se raccorder au continent (supposé fixe) par une flexure. Il est permis de croire que celle-ci aura provoqué la formation de fissures en surface. Nous n'avons pu au cours de cette première reconnaissance en découvrir qu'une seule, longue d'une centaine de mètres et large d'un pied environ, située dans la Cordillère côtière au Nord de Valdivia, et susceptible d'être attribuée à la flexure en question. Une série de fissures semblables a été observée par le Docteur LOMNITZ au Nord de Maullin (41°30' S et 74° W environ).

4. *Arrachements et glissements de terrains.* Nous avons pu en observer de très nombreux répartis, d'une part, dans la région des lacs Llanquihue, Rupanco et Puyehue, ainsi que dans les montagnes situées à l'Est de ces lacs, et, d'autre part, dans la région des lacs Rinihue, Panguipulli, Calafquén et Neltume. Ces régions forment les contreforts de la Cordillère des Andes entre les parallèles 39°30' et 41°30' approximativement.

Le volume des masses mises en mouvement est important et se chiffre par centaines de millions de mètres cubes. La plupart de ces accidents ont affecté des couches de tufs inclinées, plus ou moins cohérents, d'âge vraisemblablement pliocène à pléistocène. Cependant l'un des arrachements principaux a mobilisé des sédiments fluvio-lacustres horizontaux. Ces derniers ont été décollés sur une longueur totale de plusieurs kilomètres et plus de 100 m d'épaisseur parfois, par cisaillement à pendage, semblait-il, décroissant avec la profondeur. Ils ont formé trois barrages naturels, obstruant totalement la vallée (en canyon) du Rio San Pedro, exutoire du lac Rinihue.

Dans le cas de plusieurs de ces glissements on peut observer un fait géologiquement significatif, à savoir l'importance de la translation horizontale des terrains arrachés. Dans le cas des sédiments du Rinihue, l'arrachement a affecté une masse estimée par les services compétents et officiels du Chili à 5 millions de mètres cubes. Ces couches ont reçu une impulsion suffisante pour leur faire traverser (en se fragmentant en microcuestas échelonnées) la largeur entière du *flat* du rio San Pedro, soit plus de 1.000 m. *Cette distance représente 8 à 10 fois la hauteur d'avalanche.*

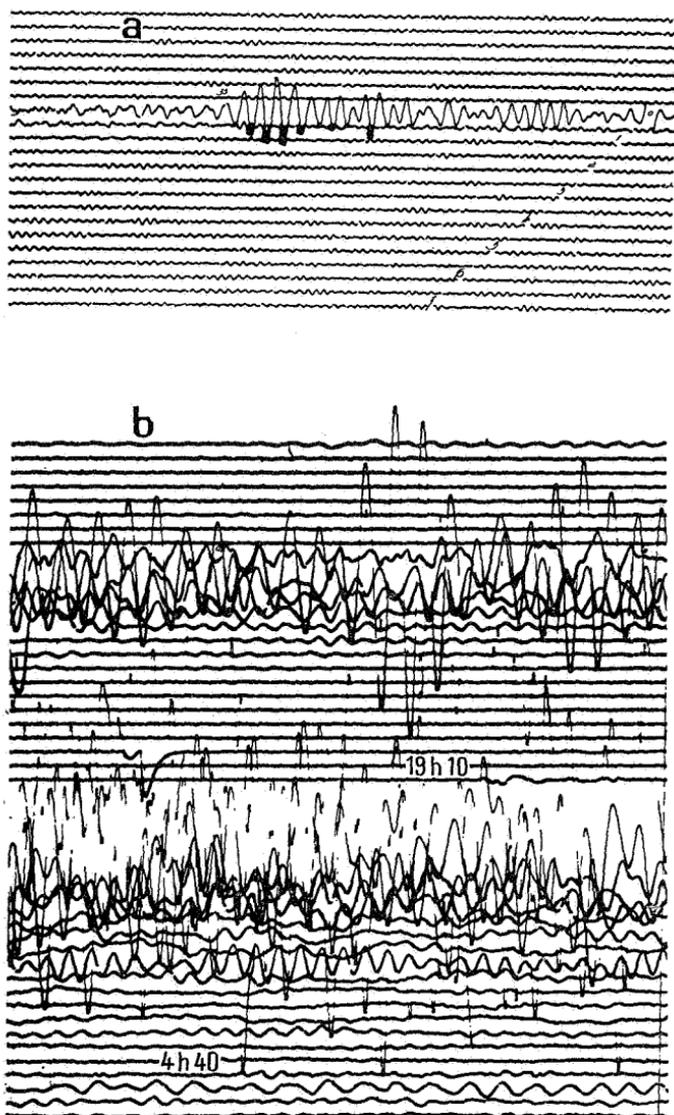


FIG. II. — Fragments d'inscription à Strasbourg :

- a) du séisme d'Agadir (distance 2.500 km);
b) de deux des séismes du Chili (22 mai 1960) (distance 12.400 km).
(D'après J. P. ROTHÉ.)

Dans la région du lac Neltume, un deuxième exemple pris montrait un arrachement de tufs volcaniques d'une épaisseur de 4 à 5 m dans une pente dont l'inclinaison était de 40° environ; le bord supérieur de l'arrachement se trouvait à une trentaine de mètres au-dessus des prairies horizontales formant le fond de la vallée. Au contraire de ce qui se produit dans le cas d'éboulements ordinaires (cf. Alpes, volcan Nyiragongo, falaises de craie, etc.), les matériaux ne se sont pas accumulés au pied de la pente en formant un cône d'éboulis, mais ont flué non avec la lenteur relative des glissements de terres forgées d'eau, fréquents dans les Alpes par exemple, mais avec impétuosité (comme l'attestent divers indices) sur le « flat » horizontal; elles ont traversé ce dernier sur toute sa largeur (85 m) et, parvenues au pied du versant opposé, possédaient encore une énergie cinétique suffisante pour en amorcer la remontée. *La distance horizontale parcourue représente ici trois fois environ la hauteur d'avalanche.*

Un troisième cas, observé à Neltume également, montrait un arrachement de 8 à 9 m d'épaisseur, tranché à une cinquantaine de mètres au-dessus du « flat », pente de 35° environ; la « coulée sèche » a parcouru environ 250 m à l'horizontale, *soit 5 fois la hauteur d'avalanche.*

Quatrième exemple (région de Neltume) : arrachement de talus à une vingtaine de mètres au-dessus du « flat », talus incliné à 20° sur l'horizontale. Volume arraché : environ 16.000 m². Distance parcourue à l'horizontale : supérieure à 120 m, *soit 6 fois la hauteur d'avalanche*, avec étalement de la masse arrachée en un éventail de plus de 300 m de large au front (angle de 110°).

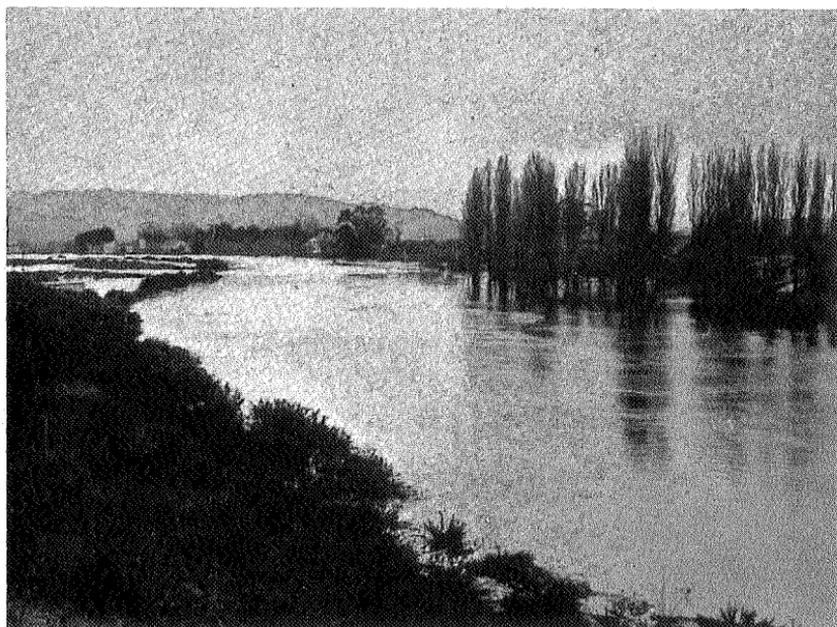
Les terrains affectés par ces glissements étaient secs, le séisme s'étant produit durant une période de beau temps prolongé.

Ces quatre exemples nous montrent qu'à une distance de 200 km environ de l'épicentre, dans une région où l'intensité du séisme atteignait le degré IX (accélération de 1.000 mm/sec²) ou X (accélération comprise entre 1.000 et 2.500 mm/sec²), le choc était encore suffisant pour provoquer une translation de couches sédimentaires correspondant respectivement à trois, à cinq, à six et à dix fois la hauteur d'avalanche.

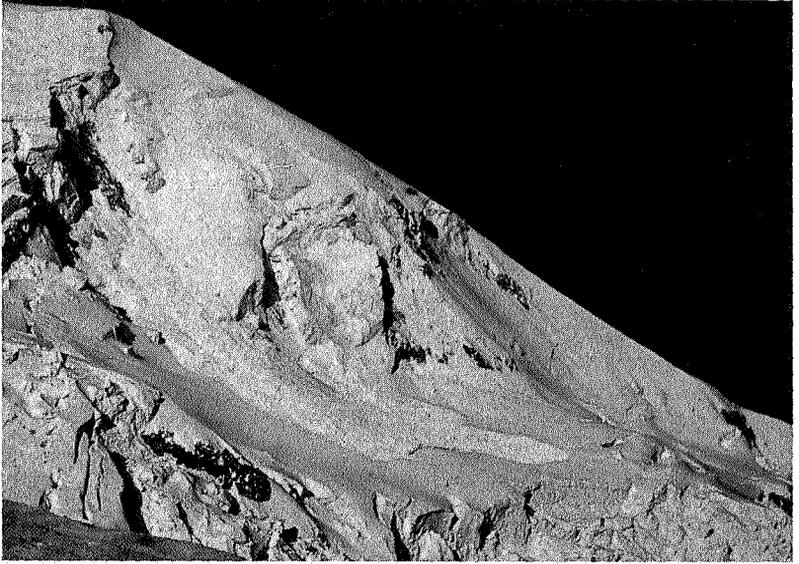
Il faut insister sur la différence fondamentale qui existe entre le cas de ces translations horizontales et ceux de toutes les avalanches (terres, boues, rocs, glace ou neige) où joue la seule gravité.



Fleuve Cau-Cau (af. rio Valdivia).
Rive cité universitaire. Avant 22 mai 1960.

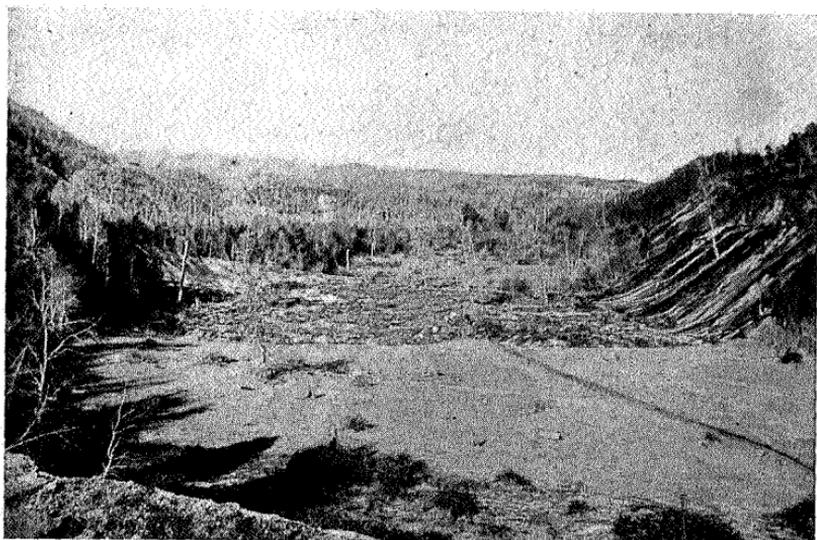


Fleuve Cau-Cau (af. rio Valdivia).
Rive cité universitaire. Après 22 mai 1960.
(État actuel après Riñihue, 22 septembre 1960.)



**Grande avalanche de séracs sous le Dôme du Goûter (mont Blanc),
11 septembre 1960.**

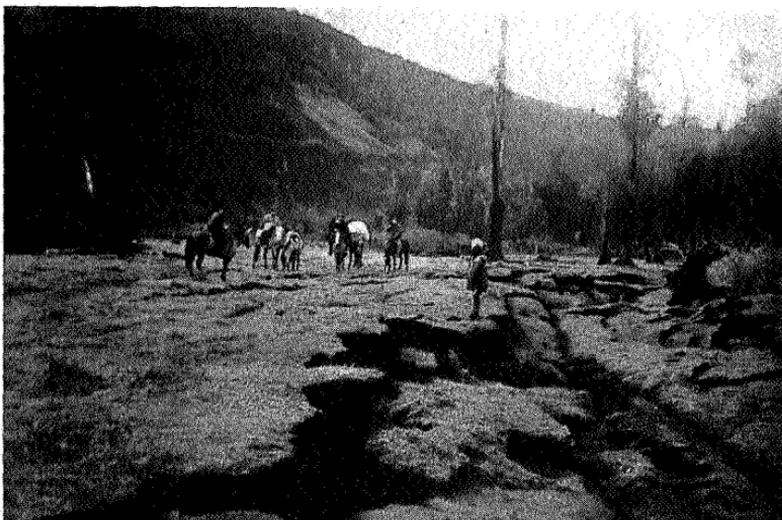
Malgré la pente et la nature particulièrement glissante tant de l'avalanche (glace) que du substratum sur lequel elle s'est propagée (glacier recouvert de neige), la distance parcourue ne représente qu'une fois et demie environ la hauteur de chute totale. La piste tracée par les alpinistes, que l'on voit de part et d'autre de l'éventail d'avalanche, donne une idée de l'échelle.



Éboulement-glisement horizontal près de Neltume.



Vue d'avion de la vallée du rio San Pedro, exutoire du lac Riñihue, barré par un glissement de terrain sur 1 km de largeur.



Crevasses et affaissements au rio Golgol.
(Région de Pujehue.)

La coordonnée horizontale du parcours d'une avalanche est fonction :

- 1° de l'énergie cinétique qu'elle a acquise dans sa chute,
- 2° de l'angle du terrain de réception,
- 3° de la nature plus ou moins fluide de la masse en mouvement.

Un effondrement de roches ou de terres (falaises, puits volcaniques, etc.), où les éboulis tombent sur une surface horizontale, donne simplement un talus dont le rapport hauteur/longueur se situe entre 1/1,3 et 1/1,9.

Une avalanche de boue (lahar), glace ou neige est susceptible de franchir une distance horizontale considérable, mais celle-ci est strictement proportionnelle à la vitesse acquise durant la chute préalable.

J'ai eu l'occasion d'observer, en contraste flagrant avec les glissements chiliens, le comportement d'une avalanche de glace qui, s'étant abattue d'une hauteur de 80 m environ sur la surface du glacier des Bossons inclinée à 16° sur l'horizontale, n'a pu, malgré la nature essentiellement glissante et du matériau de l'avalanche et de la surface de réception, parcourir plus de 125 m avant de s'arrêter (voir photo).

Des masses de terres rendues plastiques par mélange d'eau peuvent, d'autre part, s'avancer relativement loin sur une surface horizontale, mais à la condition qu'une poussée continue à s'exercer à l'arrière, poussée provoquée par la pesanteur agissant sur le prolongement amont de la masse en translation horizontale; ces mouvements sont toujours d'une relative lenteur.

Au contraire, ici :

1. La distance horizontale parcourue est plusieurs fois plus grande que le parcours vertical (5 à 10 fois).
2. La vitesse acquise par accélération de l'avalanche dans la section subverticale de son parcours est relativement faible (hauteur de l'ordre de 20 à 50 m seulement).
3. La translation horizontale, au contraire des glissements de terres mouillées, a été très rapide : assez pour surprendre et ensevelir plusieurs centaines de personnes.

Il s'agit donc ici d'un phénomène fondamentalement différent, dans lequel une force horizontale importante est intervenue. Quelle est la nature de cette force ? Nous pouvons considérer, d'une part, la composante horizontale du choc séismique et, d'autre part, un effet de vibration prolongé susceptible d'entretenir le mouvement amorcé par le choc.

Si les ondes de compression (P) ont pu n'avoir qu'une faible composante horizontale, les ondes de cisaillement (S), ainsi que cela a été vérifié souvent, ont vraisemblablement provoqué une oscillation tangentielle de violence extrême, oscillation tangentielle entretenue alors par l'arrivée des ondes superficielles (L).

Il sera intéressant, une fois que nous serons en possession des données relatives aux périodes des ondes L et S, de calculer les efforts développés par la secousse. On se souvient que ces derniers sont inversement proportionnels au carré de la période : plus celle-ci est courte, plus — pour une même amplitude — est élevée la force développée. Les ondes de surface ont une période plus longue que les ondes de cisaillement, mais ceci est compensé par leur amplitude plus élevée et leur durée.

Si la composante horizontale des ondes de la famille des S et de la famille des L a constitué, comme c'est probable, l'essentiel de l'énergie libérée en surface par le séisme, et si l'on s'en tient aux accélérations liées aux intensités de l'échelle Mercalli-Forel, on peut affirmer que celles-ci ont atteint ici des valeurs situées entre 2 et 3.000 mm/sec².

Une accélération de cet ordre est suffisante pour provoquer des arrachements de terrain. Mais, eût-elle été dix fois supérieure, il est évident que les sédiments arrachés n'auraient pu être propulsés à plusieurs centaines de mètres de distance, par cette seule impulsion initiale, comme l'aurait été un projectile.

Ici intervient, croyons-nous, un deuxième facteur essentiel, celui de la *durée* de la secousse. Or, celle-ci, dans la région qui nous occupe, s'est prolongée de façon violente pendant 200 à 210 secondes. L'arrivée successive et ininterrompue de trains d'ondes de forte amplitude et de courte période (ondes directes, réfractées et réfléchies) pendant plus de 3 minutes, aura provoqué un effet de « table vibrante » à grande échelle, et ceci explique fort bien le mécanisme et l'importance des translations horizontales constatées.

Pour résumer, nous pouvons admettre que durant le bref laps de temps d'un grand séisme, des terrains secs peuvent être décollés le long d'une fracture et déplacés à vitesse relativement élevée sur des distances horizontales considérables. Des cisaillements ont fracturé des strates en blocs de plusieurs milliers de mètres cubes; d'autre part, des couches ont été réduites en fragments qui ont été transportés de façon désordonnée.

Dès le mois de juillet, la partie orientale de l'importante masse charriée de Rinihue, recouverte par la montée (21 m) des eaux du lac, subissait l'amorce d'une sédimentation argileuse nouvelle susceptible de la recouvrir dans des délais suffisamment brefs pour limiter au minimum les effets de l'érosion et « fossiliser » ces structures cassantes.

Il en sera sans doute de même pour une partie des glissements de la région de Neltume, ce qui conduira à la consolidation ultérieure et à la préservation sous des masses plus jeunes, de la brèche séismique formée le 22 mai 1960.

**

Il est permis, devant l'ampleur des transferts horizontaux décrits ci-dessus, de faire une extrapolation dans des limites raisonnables.

Les conditions qui régnaient dans cette région de piedmont de la Cordillère n'étaient certainement pas des plus favorables à de grands déplacements de terrains : la distance de l'épicentre était de plus de 200 km, les roches étaient sèches, la surface de réception des avalanches était horizontale. Malgré cela, des masses importantes ont pu se retrouver jusqu'à près d'un kilomètre de leurs « racines ».

A combien de kilomètres alors peuvent être charriées, et sur quelle épaisseur, des strates de sédiments néritiques ou bathyaux (gorgés d'eau, donc lubrifiés, beaucoup plus aptes à glisser), dans ou près de la zone épiscopentrale (où l'accélération horizontale peut aisément dépasser g dans le cas d'un séisme de cette ampleur) et sur la surface inclinée d'une flexure continentale, d'un canyon ou d'une fosse sous-marine ?

Sans encourir le reproche d'exagération, il est permis d'admettre que, dans de telles conditions, des distances de plusieurs kilomètres pourraient parfois être parcourues en quelques minutes par des masses de dizaines de millions de tonnes.

L'importance de ce mécanisme dans la genèse de certains charriages ne devrait pas être sous-estimée, et il serait intéressant d'examiner à la lumière de cette « tectonique séismique » certains aspects mal élucidés des chaînes plissées, tels que les « charriages sans racines ».

CENTRE NATIONAL DE VOLCANOLOGIE.

BIBLIOGRAPHIE.

1. RICHTER, C. F., 1935, An instrumental earthquake magnitude scale. (*Bull. Seism. Soc. Am.*, 25, pp. 1-32.)
 2. GUTENBERG, B. and RICHTER, C. F., 1955, Magnitude and energy of earthquakes. (*Nature*, 176, p. 795.)
 3. — 1956, Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration. (Second paper.) (*Bull. Seism. Soc. Am.*, 46, pp. 105-145.)
 4. EIBY, G. A., 1957, Earthquakes. Fr. Muller Ltd., London.
 5. ST-AMAND, P., South Chile Earthquake Swarm of 1960. (*Geol. Soc. Am.*, 1960, Annual Meetings.)
 6. ROTHÉ, J. P., Le tragique bilan des séismes de 1960. (*La Nature*, 3305, septembre 1960, pp. 378-387.)
 7. TAZIEFF, H., A propos de la signification tectonique des importants glissements de terrains provoqués par le grand séisme du Chili en 1960. (*C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 251, n° 20, pp. 2204-2206.)
-