

QUITO FACE A UN RISQUE D'ORIGINE NATURELLE

LA LAVE TORRENTIELLE DU 31 MARS 1997 DANS LE QUARTIER DE LA COMUNA



MAY 07 1998

ORSTOM
Centre Documentation
Quito

Jean-Louis PERRIN (coordinateur), Alexis SIERRA, Benoît FOURCADE
Jérôme POULENARD, Vincent RISSER, Jean-Louis JANEAU
Philippe GUEGUEN, Hubert SEMIOND

Mission ORSTOM en Equateur

Programme SISHILAD EMAAP-Q INAMHI ORSTOM

Octobre 1997

ORSTOM Documentation



DU 1200 PER
Fonds Documentaire ORSTOM
Cote: A 214 172 Ex:

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
1. PRESENTATION GENERALE DU BASSIN VERSANT	2
1.1 Géologie du secteur	2
1.2 Régime pluviométrique	2
1.3 Fonctionnement hydrologique lié aux types et utilisations des sols	3
1.3.1 La zone haute du páramo (3700-3873 m)	3
1.3.2 La zone de matorral d'altitude (3350-3700 m)	3
1.3.3 La zone de prairie et de bois d'eucalyptus (3150-3350 m)	4
1.3.4 La partie basse - le secteur urbain de la Comuna (2950-3150 m)	4
2. DESCRIPTION DE L'EVENEMENT HYDRO-MORPHO-CLIMATIQUE DU 31 MARS 1997	4
2.1 Les précipitations	4
2.1.1 Les données enregistrées le 31 mars 1997	4
2.1.2 Les informations obtenues par enquêtes auprès de la population	6
2.1.3 Les précipitations antécédentes	6
2.2 Les débits	7
2.2.1 Les données enregistrées le 31 mars 1997	7
2.2.2 Les informations obtenues par enquêtes auprès de la population	7
2.3 Les coulées boueuses	7
2.4 Conclusions	8
3. DESCRIPTION DU PHENOMENE - CAUSES ET CONSEQUENCES	8
3.1 Secteur 1 : Mirador Loma et la partie haute du bassin	8
3.2 Secteur 2 : Zone de concentration des eaux et de mise en place du réseau d'écoulement	10
3.3 Secteur 3 : Déclenchement de la lave torrentielle et mise en vitesse du flux	11
3.4 Secteur 4 : Zone des glissements coulées et d'augmentation du volume de la lave torrentielle	13
3.5 Secteur 5 : Zone de diminution des vitesses d'écoulement - Dernière protection des zones habitées	16
3.6 Secteur 6 : Passage de la lave torrentielle dans le quartier de la Comuna	17

4. L'ÉVÉNEMENT DE LA COMUNA DANS LE CONTEXTE HISTORIQUE DES LAVES TORRENTIELLES ET COULEES BOUEUSES OBSERVEES DEPUIS 1960 A QUITO	20
4.1 Considérations générales	20
4.2 Événements similaires : La Raya et La Gasca ?	21
4.3 Importance du profil en long des quebradas	22
5. LES FACTEURS DE VULNERABILITE EXPLIQUANT L'ACCIDENT DU 31 MARS 1997	24
5.1 L'occupation des versants du Pichincha : première cause de vulnérabilité	24
5.2 Les facteurs institutionnels de vulnérabilité : un point clef	25
5.3 Les facteurs physiques et techniques de vulnérabilité liés à l'urbanisation	25
5.3.1 Le remblayage des quebradas : un facteur de vulnérabilité généralisé à l'échelle de la ville	27
5.3.2 Le déboisement et les canaux d'irrigation : des facteurs aggravants surestimés	28
5.3.3 L'évacuation des eaux : un facteur technique de vulnérabilité	29
5.3.4 La qualité du bâti : un leurre ?	29
5.3.5 Les conditions d'accès : un facteur de vulnérabilité oublié	29
5.4 Les facteurs éducatifs de vulnérabilité	30
5.5 Une vulnérabilité maintenue : une situation de risque inchangée	30
CONCLUSION	31
BIBLIOGRAPHIE	33

INTRODUCTION

Le lundi 31 Mars 1997, en fin d'après-midi, un flux de boue chargé de blocs rocheux, de débris végétaux et de divers matériaux dévastait le quartier de la Comuna au pied de la *quebrada* (terme générique décrivant les formes allant de la ravine au canyon) de la Comunidad. Son passage dans ce quartier était à l'origine de très gros dégâts matériels et du décès de deux personnes.

Ces phénomènes ne sont pas rares à Quito, puisque Peltre (1989) a recensé dans la presse locale une quarantaine d'événements de ce type depuis 1900. Par contre, rares sont les événements bien étudiés et bien documentés. On peut toutefois citer les articles de Feininger (1976) sur l'événement de La Gasca et de De Noni et al. (1988) sur celui de La Raya.

Considérant que l'analyse d'un tel événement répond à ses objectifs, et en particulier à ceux concernant la compréhension des processus hydro-morpho-climatiques des versants du Pichincha, le projet SISHILAD a étudié en détail cet accident.

Sont présentées ici les conclusions d'une équipe pluridisciplinaire d'une dizaine de chercheurs de l'ORSTOM, en poste actuellement en Equateur, et rassemblant aussi bien des hydrologues que des pédologues, des géologues, des géotechniciens et des géographes. Il faut noter que la pluridisciplinarité n'a pas ici été conçue comme une juxtaposition d'éléments relevant des différentes spécialités, mais bien comme un effort d'interprétation commun.

Ce travail doit, avant tout, être considéré comme une étude de cas, sur un événement où les deux composantes du risque sur les versants du Pichincha sont particulièrement bien exprimées (à savoir, d'une part les aléas liés aux conditions hydro-climatiques et morpho-pédologiques et d'autre part la vulnérabilité des quartiers périphériques de la capitale équatorienne). Ce document est le résultat de plusieurs sorties de terrain, d'enquêtes réalisées auprès de la population du quartier et de diverses analyses de laboratoire, nous ayant permis d'appréhender le phénomène dans sa globalité.

Il convient avant tout de définir les termes utilisés pour désigner cet événement et les différents mouvements de matériel qui lui sont associés. En effet, la littérature sur les mouvements de terrain fait état de plusieurs systèmes d'appellation et les distinctions entre glissements boueux, glissements coulées, coulées boueuses, flux de boue et crues boueuses sont parfois difficiles à mettre en évidence. Le terme qui finalement nous a semblé le plus approprié est celui de **lave torrentielle**. Ce dernier désigne en effet une coulée possédant les spécificités suivantes (Flageollet, 1989 et Besson, 1996) :

- elles ont lieu en zone de montagne ou haute montagne ;
- elles possèdent de grandes vitesses d'écoulement (de plusieurs kilomètres par heure) ;
- elles sont toujours associées au torrent et sont donc chenalisées ;
- elles sont associées à des événements hydro-climatiques exceptionnels ;
- elles peuvent transporter des blocs rocheux de très grandes tailles.

Comme nous le verrons, l'ensemble de ces caractéristiques s'appliquent parfaitement à l'événement du 31 mars 1997 sur la *quebrada* la Comunidad.

Dans un premier temps nous décrirons de manière globale le bassin versant de la Comunidad. Puis nous présenterons les informations disponibles sur l'événement hydro-morpho-climatique du 31 mars 1997 à l'échelle des quelques bassins versants mis en cause. Dans une troisième partie, nous nous recentrerons sur le bassin versant de la Comunidad pour détailler le phénomène spécifique qui s'y est produit, en cherchant les causes premières et les facteurs aggravants. Nous replacerons ensuite cet événement dans le contexte historique des laves torrentielles et des coulées boueuses observées depuis 1960 sur la zone métropolitaine de Quito. Finalement, nous analyserons les différents facteurs de vulnérabilité pouvant expliquer la catastrophe du 31 mars 1997 dans le quartier de la Comuna.

1. PRESENTATION GENERALE DU BASSIN VERSANT

Situé sur le flanc oriental du volcan Pichincha, au nord-ouest du Centre Historique de Quito, cette petite *quebrada* couvre une surface d'environ 1 km². Comprise entre 3843 m d'altitude (Mirador Loma) et 2900 m environ (au niveau de l'Avenue Occidentale), elle se caractérise par des pentes importantes, tant au niveau des versants que de son cours.

1.1 Géologie du secteur

Trois grands types de formations affleurent au niveau de la *quebrada* de la Comunidad :

- Le complexe volcanique du Pichincha : Cette unité est formée de laves andésitiques indifférenciées. Elle apparaît en général dans le fond des *quebradas* où elle forme des parois verticales à sub-verticales.

- Les formations de cendres récentes et anciennes : Il s'agit de dépôts de matériel volcanique récent (quaternaire), plus ou moins grossier (des cendres aux pierres ponces) appartenant pour la plupart à la période d'activité postglaciaire (-10 000 ans) du volcan Pichincha. Ces cendres récentes recouvrent quasi uniformément les flancs de ce secteur du Pichincha. Pourtant, localement, on rencontre des dépôts de cendres appartenant à la période antérieure au dernier paroxysme glaciaire, pouvant avoir connu un processus d'endurcissement et qui reçoivent couramment le nom de *cangahua*.

- Les dépôts colluviaux : Il s'agit de matériaux divers (d'origine volcanique), transportés par les eaux d'écoulement ou les laves torrentielles et qui forment aujourd'hui les grands cônes de déjection visibles au pied des *quebradas*.

1.2 Régime pluviométrique

La région interandine, et en particulier la zone de Quito, est alternativement sous l'influence de masses d'air venant de l'Océan Pacifique ou de l'Amazonie. Le régime pluviométrique se caractérise par l'existence de deux saisons des pluies, (de février à mai et d'octobre à novembre) et de deux périodes sèches (l'une, bien marquée, de juin à septembre, l'autre, beaucoup plus courte, de décembre à janvier).

Les hauteurs de pluies varient non seulement en fonction de l'altitude, mais aussi en fonction de l'orientation générale des versants et des vallées. Sur le secteur d'étude, la distribution spatiale des précipitations est en relation directe avec la présence de la Cordillère Occidentale et plus précisément du volcan Pichincha, obstacles aux vents humides venant du sud-est. Ainsi peut-on mettre en évidence deux gradients pluviométriques :

- le premier, méridien, montre une nette diminution des précipitations annuelles du Sud (1400-1500 mm) vers le Nord (700-800 mm).

- le second, Est-Ouest, montre une augmentation des précipitations avec l'altitude le long des flancs du Pichincha, avec, au sommet des *quebradas*, une précipitation annuelle d'environ 1400-1500 mm par an.

La *quebrada* de la Comunidad doit recevoir, quant à elle, entre 1200 et 1400 mm de précipitation moyenne annuelle (Pourrut et Leiva, 1989).

En ce qui concerne les intensités, le phénomène marquant semble être leur diminution avec l'altitude (Ayabaca et Perrin, 1996). Les zones urbanisées sont donc, en général, sujettes aux pluies les plus violentes.

1.3 Fonctionnement hydrologique lié aux types et utilisations des sols

Le fonctionnement hydrologique du secteur d'étude varie en fonction du gradient altitudinal le long des flancs du Pichincha. Quatre grands types de fonctionnement peuvent ainsi être mis en évidence, en considérant les différents types sols et leur utilisation :

1.3.1 La zone haute du páramo (3700-3873 m)

Cette zone est caractérisée par une importante couverture herbacée protégeant efficacement les sols de l'érosion. Nous ne disposons pas, sur cette *quebrada*, d'une description précise des sols. Toutefois, de nombreux éléments nous conduisent à penser que nous sommes ici en présence du même type de couverture pédologique que celle observée sur les zones hautes de la *quebrada* Rumihurcu, située à quelques kilomètres de là. Il s'agirait donc d'andosols juvéniles très riches en matière organique dont la composition minéralogique reste dominée par des verres volcaniques (Poulenard, 1996).

L'écoulement de surface doit y être faible et l'infiltration dans les 50-70 premiers centimètres du sol importante. Les circulations latérales préférentielles au niveau d'une couche de pierres ponce située à cette profondeur génèrent un écoulement hypodermique ou de subsurface relativement important. Toutefois, une partie non négligeable de l'eau précipitée semble s'infiltrer à grande profondeur et alimenter les nappes de versant existantes à l'interface roche mère - formations superficielles (Risser, 1997). Les coefficients d'écoulement sont globalement faibles, de l'ordre de 10 à 15 % (Ayabaca et Perrin, 1996).

1.3.2 La zone de matorral d'altitude (3350-3700 m)

Cette zone située sur la partie haute des flancs des *quebradas* est caractérisée par une végétation native à dominante arbustive (*matorral*) souvent très dense, implantée sur des versants à forte pente.

On note sur cette zone une disparition progressive de l'horizon de pierre ponce, qui subsiste encore ça et là sous forme de loupe de quelques centimètres, au dessous du sol actuel toujours très noir et humifère. Au dessous, on rencontre la succession classique de dépôts de cendres résultant de différentes éruptions post glaciaires. Ainsi, sur environ 2 mètres d'épaisseur, on peut observer une succession de paléosols organiques et de cendres de texture variable. A 3 mètres de profondeur, on note l'existence de reliques d'un horizon de pierre ponce noyé dans des cendres jaunes, sur une quinzaine de centimètres d'épaisseur. Cette couche peut, sans nul doute, se transformer en un plan de glissement préférentiel. A la suite de ce niveau (et c'est là une originalité de cette *quebrada* par rapport à la Rumihurcu), on observe un dépôt d'un mètre de cendres anciennes. Ce niveau est encore difficile à dater. Il peut s'agir de dépôts anciens (8000 ans), post-glaciaires, aussi bien que de dépôts ante glaciaires appelés communément *cangahua*. En dessous de ce niveau, se rencontre enfin un horizon d'altération reposant sur une roche mère andésitique peu fracturée formant en général un plan structural fortement incliné dans le sens de la pente. A noter que de nombreuses racines reposent sur cette dalle andésitique et aurait donc pénétré les différents niveaux déstabilisant ça et là l'ensemble de cette formation de plus de 4 mètres d'épaisseur.

Le comportement hydrologique de ces sols complexes est très mal connu. Toutefois, il semblerait que la circulation de l'eau, très importante dans la partie supérieure du profil (ou la porosité est importante) soit en grande partie bloquée par la couche de cendres jaunes (constituées à plus de 80 % de limons et d'argiles). Il en résulterait des phénomènes de saturation pouvant diminuer fortement la cohésion du matériel.

1.3.3 La zone de prairie et de bois d'eucalyptus (3150-3350 m)

Cette zone est située sur la partie basse des flancs de la *quebrada*. Elle est caractérisée par une utilisation spécifique des sols avec des secteurs couverts de prairies de pâture et des secteurs reboisés d'eucalyptus il y a une trentaine d'années.

Les descriptions de la couverture pédologique de cette zone révèlent de très fortes hétérogénéité spatiales, notamment en ce qui concerne l'épaisseur relative des horizons caractéristiques. Néanmoins, globalement, à cette altitude la couverture pédologique semble caractérisée par la présence de profils composés sur au moins 2 mètres d'horizons organiques noirs et limoneux entrecoupés par des reliques de ponces et cendres altérées. Ces horizons organiques montrent en général une très forte porosité intra-agrégats et un très grand volume de vides lié à la présence de bonnes structures polyédriques. Cette succession d'horizons et de dépôts (beaucoup moins nette qu'au niveau de la partie supérieure du bassin) peut reposer soit sur un niveau d'altération de la roche en place (le plus souvent de l'andésite), soit sur des dépôts de cendres anciennes : *cangahua* (Poulénard, 1996).

1.3.4 La partie basse - le secteur urbain de la Comuna (2950-3150 m)

Il est bien difficile de caractériser les sols de la partie basse de la *quebrada*. Ceux-ci, souvent très fortement remaniés par l'urbanisation, reposent sur des dépôts colluviaux grossiers formant le cône de déjection de la *quebrada*.

Le fonctionnement hydrologique est ici de type pseudo-urbain à urbain, avec des coefficients d'écoulement compris entre 40% (pour les zones en voie d'urbanisation) et 60% (pour les zones d'habitat consolidé).

2. DESCRIPTION DE L'ÉVÉNEMENT HYDRO-MORPHO-CLIMATIQUE DU 31 MARS 1997

Le 31 mars 1997, un événement pluvieux exceptionnel touchait le versant Est du volcan Pichincha et en particulier la zone comprise entre les *quebradas* Miraflores et Rumipamba. La conjonction de fortes précipitations et de conditions géomorpho-pédologiques spécifiques allaient être à l'origine de la lave torrentielle qui allait ravager la *quebrada* La Comunidad et le quartier de La Comuna situé en dessous.

Nous analyserons ici, pour l'ensemble du secteur concerné, les trois composantes de l'événement que sont les précipitations, les crues et les coulées boueuses (et les accidents géomorphologiques qui leur sont associés). À l'analyse des données disponibles ont été associés les résultats d'enquêtes effectuées auprès de la population du quartier de la Comuna quelques jours après la catastrophe.

2.1 Les précipitations

Nous ne disposons d'aucune station de mesure sur le secteur même de l'étude. Par contre, des informations fondamentales ont pu être collectées au alentours, nous permettant d'avoir aujourd'hui une connaissance assez précise de l'événement pluvieux ayant eu lieu ce jour là.

2.1.1 Les données enregistrées le 31 mars 1997

Nous disposons, pour cet événement, de quatre grands points de mesure des précipitations :

- la station Rumipamba (gérée par le CNRH - Consejo Nacional de los Recursos Hídricos), est située à environ un kilomètre plus au Nord de la *quebrada* La Comunidad, à une altitude de 3160 m. Cette station est équipée d'un pluviographe de rotation hebdomadaire depuis 1977. Compte tenu de la précision de l'enregistrement, il est quasi impossible d'interpréter de façon fiable les variations d'intensité de l'averse. Les précipitations enregistrées ici ont été de 17,5 mm. Entre 8 heures ce jour et 8 heures le lendemain, il n'y a eu que deux événements pluvieux bien individualisés : le premier de 13h30 à 14h (3,5 mm), l'autre plus violent, de 15h15 à 17h05 (14 mm).

- la station la Chorrera (gérée par l'INAMHI - Instituto Nacional de Meteorología e hidrología), est située à environ deux kilomètres au Sud de la *quebrada* La Comunidad, à une altitude de 3165 m (altitude comparable à celle du quartier de la Comuna). Cette station ne dispose aujourd'hui que d'un pluviomètre ayant enregistré le 31 mars 1997 une précipitation totale de 58,8 mm. Toutefois, de 1978 à 1989, celle-ci était équipée d'un pluviographe à rotation journalière nous permettant de disposer d'une courbe Intensité-Durée-Fréquence de qualité (Ayabaca et al., 1996).

- la station Quito-INAMHI (station de référence gérée par l'INAMHI), est située à 2 kilomètres à l'Est de la *quebrada* la Comunidad, à une altitude de 2789 m, en plein secteur urbain. Cette station équipée d'un pluviographe à rotation journalière fonctionne depuis 1975. Les précipitations enregistrées à ce poste sont faibles, au total 5,2 mm réparties en deux averses : le premier épisode de 13h50 à 14h20 (1,9 mm), le second de 16h20 à 17h05 (3,3 mm).

- les stations de la partie haute du bassin versant expérimental de la Rumihurcu (gérées par le Programme SISHILAD -Système de Pronostic Hydrologique des Flancs du Pichincha et de la Zone Métropolitaine de Quito- EMAAP-Q / INAMHI / ORSTOM) sont situées à environ 6 kilomètres au Nord de la *quebrada* de La Comunidad, à une altitude comprise entre 4200 et 3750. Ces stations sont équipées de pluviographes à rotation journalière et fonctionnent depuis mars 1995. Les précipitations enregistrées ici sont modestes (comprises entre 13 mm à 4200 m et 9 mm à 3750 m). Au niveau des trois stations, la pluie a débuté à 14h10 / 14h15 pour s'achever entre 17h25 et 17h50. Compte tenu des faibles intensités en fin d'averse, il est difficile d'estimer précisément l'heure de fin de la pluie. Deux averses bien individualisées peuvent être mises en évidence sur deux des stations de mesures (RII - 4000 m et RIII - 3750 m) et une seule, avec des intensités très variables, au niveau de la station la plus haute (RI - 4200 m). A noter que les stations basses (entre 3500 m et 2900 m) implantées sur ce bassin n'ont pas reçu de précipitations significatives.

Stations	Première averse			Deuxième averse			P totale
	H début	H fin	P1	H début	H fin	P2	
Rumipamba	13h30	14h00	3.5	15h15	17h05	14.0	17.5
Inamhi	13h50	14h20	1.9	16h20	17h05	3.3	5.2
RI	14h10				18h15		13.0
RII	14h00	14h50	9.5	16h50	17h25	3.0	12.5
RIII	14h15	14h35	4.0	17h00	17h40	5.0	9.0

Tab. 1 : Les deux averses du 31 mars 1997 en cinq stations du bassin

Il est malheureusement impossible de reconstituer l'histoire de l'événement au niveau même du quartier de la Comuna. Par contre si l'on se base sur la valeur obtenue à la station la Chorrera (58,8 mm) et que l'on reprend le modèle de répartition temporelle des pluies de la Rumipamba, on peut, en première approximation, estimer à 12 mm la pluie de la première averse et à 47 mm celle de la seconde. Ce schéma peut avoir tendance à diminuer l'importance de la seconde averse (très violente) par rapport à la première (beaucoup plus classique). Avec une précipitation de 47 mm en 1 heures 50 minutes (soit 26 mm/h) à la Chorrera, nous obtenons une période de retour supérieure à 50 ans (l'intensité de période de retour 50 ans, pour une averse de deux heures étant de 24 mm/h).

2.1.2 Les informations obtenues par enquêtes auprès de la population

Ne disposant d'aucune donnée au niveau même de la zone sinistrée, nous avons, par le biais d'enquêtes, essayé de compléter nos informations sur les précipitations. Lors de l'enquête, nous ne disposions d'aucune donnée fiable, les questions étaient donc totalement ouvertes et non orientées.

Sur les 40 personnes interrogées, 17 parlent spontanément de deux pluies dans l'après-midi, séparées par un laps de temps d'une heure à une heure et demie. Compte tenu de cette ambiguïté (une pluie, deux pluies), il est difficile, en fonction des réponses obtenues, de connaître avec précision l'heure de début de l'averse. Toutefois, la majorité des témoins s'accorde sur une heure comprise entre 15h et 16h. Ces chiffres, tout à fait en accord avec nos données, montrent que les précipitations sur le secteur ont bien fait partie d'une dynamique plus générale. Par contre, aucune estimation de la lame d'eau précipitée sur le secteur n'a pu être obtenue. Seules des valeurs complètement irréalistes (comprises entre 300 et 1500 mm) ont été citées.

Plus intéressantes sont les réponses aux questions concernant le phénomène lui-même : 36 témoins sur 41 nous ont parlé des nombreux éclairs tombés sur la partie haute du quartier. L'un d'eux touche d'ailleurs probablement la ligne électrique entre 16h20 et 16h40, privant le quartier d'électricité. De même, il semblerait qu'il y ait eu de la grêle, en quantité importante, sur tout le bassin. Ceci nous a été confirmé par un gardien des antennes de Cruz Loma (situées au sommet de la *quebrada*).

Compte tenu de ces témoignages, il semblerait donc qu'une cellule convective extrêmement dynamique ce soit formée sur le secteur. Celle-ci serait ensuite restée bloquée au dessus de La Comuna, comme le montre la différence de début de la pluie entre la station Rumipamba (15h15) et la station Inamhi (16h20), pourtant relativement proches l'une de l'autre. La pluie se calme vers 16h45, pour cesser totalement vers 16h55-17h05 (conformément aux données enregistrées), au moment où le flux de boue traverse le quartier. Ceci nous a été confirmée par des témoins ayant déclaré être sortis pour voir ce qui se passait, après la fin de l'averse.

2.1.3 Les précipitations antécédentes

Nous ne disposons actuellement que de deux stations de référence (Chorrera et Quito-Inamhi) nous permettant de comparer les précipitations antécédentes du mois de mars 1997 avec celles des années précédentes.

Sans que l'on puisse le quantifier, il semble que les précipitations antécédentes aient pu jouer un rôle fondamental, lors de l'événement du 31 mars 1997. En effet, le tableau suivant (Tab. 2) montre qu'une quantité importante de précipitations était déjà tombée sur le secteur dans les trois jours précédant la catastrophe (60 mm à la Rumipamba, 31 mm à la Chorrera pour seulement 18 mm à l'Inamhi). De même, on peut noter que les précipitations sur ce secteur durant les 15 jours précédant l'événement atteignent à la Chorrera 148 mm soit à peu près la valeur de la précipitation moyenne mensuelle de la station pour la période 1978/1993 (150 mm) et surtout 176 mm à la Rumipamba. Dans le même temps, on mesurait à la station Inamhi une lame d'eau de 118 mm. Les précipitations du mois de mars 1997 ont été excédentaires. Cet excédent atteint 54 % à La Chorrera et seulement 24 % au niveau de la ville même.

Stations	P mars 97	-30 jours	-15 jours	-7 jours	-3 jours	P moyenne mensuelle
Chorrera	231.0	172.2	147.5	40.3	30.9	149.9 (1978/1993)
Rumipamba	223.5	206.0	176.0	81.7	60.4	non disponible
Inamhi	167.7	162.0	117.8	21.3	17.8	135.4 (1977/1993)

Tab. 2 : Précipitations antécédentes et moyennes mensuelles de trois stations du secteur

2.2 Les débits

Il est bien difficile d'estimer le débit liquide maximum généré par cette averse. Du fait de sa faible superficie, cette petite *quebrada* n'était pas équipée d'une station limnigraphique. Compte tenu de l'état du cours après le passage de la coulée boueuse, il nous a été impossible d'estimer, à partir des sections mouillées, le débit maximum de la crue hydrologique (débits liquides générés par les seuls phénomènes d'écoulement).

2.2.1 Les données enregistrées le 31 mars 1997

Par contre, nous disposons sur la *quebrada* Rumipamba (beaucoup plus grande et plus urbanisée) d'une station limnigraphique nous permettant d'estimer ici un débit de pointe de 4 m³/s. La comparaison débit de pointe - précipitation reste bien hypothétique. Nous ne disposons sur ce bassin que d'un seul pluviographe, à rotation hebdomadaire, dont nous ne connaissons pas la représentativité, a fortiori pour ce type d'événement extrêmement localisé. Toutefois, la crue du 31 mars 1997 est la plus importante enregistrée en deux ans de mesures.

2.2.2 Les informations obtenues par enquêtes auprès de la population

Les enquêtes ne nous apportent que très peu d'informations. Il semblerait qu'avant le passage de la lave torrentielle une quantité importante d'eau dévalait les rues du quartier. Certains témoins parlent d'une hauteur comprise entre 10 et 20 centimètres (hauteur du trottoir). Ce phénomène, observable dans la plupart des rues en pente situées au pied des *quebradas* ne semble pas avoir eu ici une ampleur particulièrement exceptionnelle. Il ne s'agit, en fait, que d'une réaction normale à ce type d'événement pluvieux.

2.3 Les coulées boueuses

La lave torrentielle ayant traversé le quartier de la Comuna est bien entendu le phénomène le plus marquant du secteur. Nous le décrivons et analyserons en détails ses causes dans le paragraphe suivant. Néanmoins, il ne s'agit pas ici d'un phénomène isolé.

En effet, plus d'une trentaine de mouvements de terrain, ayant par la suite évolué en coulées boueuses le long des versants du fait de la brutale liquéfaction du matériel mis en mouvement, ont été répertoriés sur un secteur compris entre les *quebradas* Miraflores et Rumipamba entre 3200 et 3600 m d'altitude.

Les volumes de matériel mis en mouvement sont très variables et compris entre quelques dizaines de m³ à un peu plus d'un millier. La grande majorité d'entre eux se caractérise par le glissement d'une ou deux couches superficielles mobilisant de 0,70 à 1,20 m de sol situées au-dessus d'une couche de cendre ancienne indurée ou directement sur la roche mère altérée. Ces couches, parallèles à la topographie du terrain, ont été mises en mouvement sur des versants dont les pentes avoisinaient les 30 degrés.

Fort heureusement, les coulées boueuses ayant eu lieu sur le secteur n'ont pas toutes provoqué de catastrophe de l'ampleur de celle observée dans le quartier de la Comuna. On peut citer le cas de la *quebrada* Vasconez, où un flux boueux s'est par chance immobilisé sur une large plate-forme, quelques centaines de mètres au dessus de l'avenue Occidentale. De même, et bien qu'ayant endommagé sérieusement plusieurs maisons, les différentes coulées boueuses observées en rive droite de la *quebrada* Rumipamba, n'ont pas traversé le quartier et ont pu facilement transiter dans le réseau hydrographique.

2.4 Conclusions

Il semble donc qu'une cellule convective très instable et se déplaçant du Sud vers le Nord se soit bloquée sur le pied des *quebradas*, générant de très fortes précipitations (de période de retour de l'ordre de 25 et 50 ans) entre 2900 et 3600 m sur le secteur de la *quebrada* La Comunidad.

D'un point de vue hydrologique sensu stricto (c'est-à-dire en laissant de côté le phénomène de la lave torrentielle, répondant à d'autres facteurs), cet événement pluvieux de fréquence rare n'a pas engendré de crue dévastatrice sur les *quebradas* voisines de celle de la Comunidad. Ces observations sont d'ailleurs conformes aux premiers résultats obtenus par le Programme SISHILAD sur la *quebrada* Rumihurcu (Ayabaca et Perrin, 1996). Les seuls problèmes hydrologiques sérieux mis en évidence, sont à relier à l'obstruction du système d'égouts, bien évidemment incapable d'absorber les détritiques et les gravats stockés depuis des années au fond des *quebradas* et mis en mouvement par les eaux de ruissellement lors de l'événement.

Par contre, les abondantes pluies enregistrées depuis le début de mois de mars et durant l'événement lui-même sont à l'origine des très nombreuses coulées boueuses observées sur tout le secteur et de la lave torrentielle, responsable de nombreux dégâts et de la mort de deux personnes dans le quartier de la Comuna.

3. DESCRIPTION DU PHENOMENE - CAUSES ET CONSEQUENCES

Ce paragraphe reprend les observations effectuées au cours des sorties de terrains et complétées pour la partie basse du bassin par les témoignages recueillis au cours des enquêtes. Six grands secteurs ont ainsi été individualisés :

3.1 Secteur 1 : Mirador Loma et la partie haute du bassin

La partie haute de la *quebrada* La Comuna est couverte par un *páramo* dense, non dégradé où aucune marque nette de ruissellement de surface (*stipa ichu* couché par un flux d'eau) n'a pu être observée. Toutefois, un ruissellement diffus entre les touffes aurait pu être généré lors de l'événement compte tenu des intensités des précipitations enregistrées lors de celui-ci. En effet, un léger déplacement de matériel peut être mis en évidence à l'aval de certaines touffes. Ainsi, on pourrait estimer à moins de 10 % le coefficient d'écoulement sur ces zones, conformément aux études réalisées sur un *páramo* du même type dans la *quebrada* Rumihurcu située plus au Nord (Janeau et al., 1997).

Quelques indices d'écoulement sont toutefois visibles au niveau des talwegs (Fig. 1, point 1). On peut estimer à quelques litres seconde le débit ayant transité au niveau des zones de convergence de flux. Par contre, si le *stipa ichu* a été couché dans ces zones, aucun arrachement des touffes, ni une quelconque érosion linéaire n'a pu être mis en évidence. Il est donc difficile au vu de nos observations sur ce secteur de qualifier d'exceptionnel les écoulements estimés : un mois après, les herbes couchées s'étaient relevées et aucune trace de l'événement ne restait visible sur le secteur concerné.

Ce secteur est limité vers le bas par un ancien sentier n'ayant pas joué, a priori, le rôle d'un drain compte tenu de sa végétalisation.

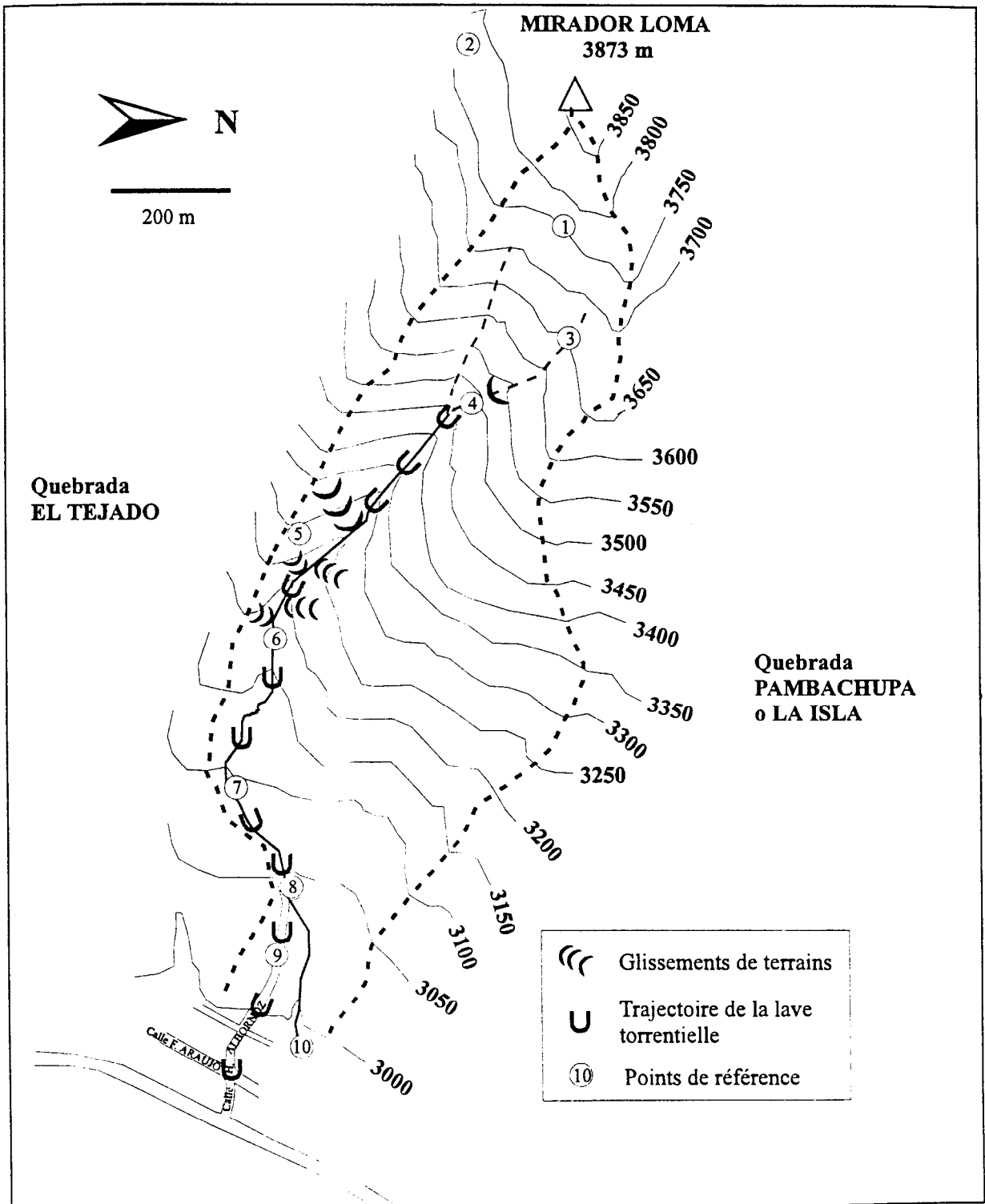


Fig. 1 : Bassin versant de La Comunidad - Localisation des différents mouvements de terrain

A noter que sur la partie haute de la *quebrada* La Gasca, voisine de celle de La Comuna les processus d'écoulement ont été significativement différents (Fig. 1, point 2). En effet, les versants, brûlés périodiquement sont marqués par un surpâturage net se traduisant par la mise en place de gradins perpendiculaires à la pente. Sur cette zone dénudée à 40 ou 50 %, on peut observer la présence de sables blanchis en surface (indice d'écoulement superficiel fort) reposant sur une croûte structurale ayant une porosité vésiculaire d'environ 5 %. Cette croûte, générée par le brûlis, peut parfois présenter de fortes tendances à l'hydrophobie. Ce secteur montre de nombreuses traces d'écoulement liées au ruissellement superficiel (ceci nous a été confirmé par le témoignage du gardien des antennes de Cruz Loma présent à proximité lors de l'événement du 31/03/97). Par contre, et comme pour la *quebrada* La Comuna, il semble qu'aucune érosion linéaire ne puisse être observée au niveau des talwegs (plus marqués ici). Comme pour la *quebrada* La Comuna, l'événement du 31/03/97, au moins à cette altitude n'a pas présenté un caractère exceptionnel, ce qui nous a été confirmé par le témoignage du gardien, la pluie du lendemain aurait été beaucoup plus intense sur les parties hautes des bassins.

3.2 Secteur 2 : Zone de concentration des eaux et de mise en place du réseau d'écoulement

Dans la partie haute de ce secteur, au pied de l'ancien sentier et sans que l'on puisse observer un quelconque changement de végétation on note :

- l'apparition de zones de drainage préférentiel sur les versants mêmes de la *quebrada* (Photo. 1),
- l'augmentation nette du débit au niveau des deux talwegs principaux de la *quebrada*, ceux-ci passant de quelques litres à une trentaine de litres par seconde.

Il ne semble pas, comme nous l'avons vu précédemment, que l'ancien sentier ait pu jouer ici un rôle pouvant expliquer le changement de comportement hydrologique du secteur. En conséquence, il est possible que ce sentier soit la limite fortuite marquant un changement structural du sol, ou plus simplement une limite altitudinale de forte précipitation.

En dessous, à partir de la côte 3660, le fond du talweg devient une *quebrada* à proprement parler (Fig. 1, point 3). Sans être caractérisé par un écoulement permanent, le fond du talweg présente localement les marques d'écoulements intermittents successifs et les premières traces d'encaissement. Dans le même temps et en relation directe avec ce qui précède, la pente du lit augmente de façon significative et la végétation se densifie (on passe d'une végétation herbacée type *stipa ichu*, à une végétation arbustive type matorral, typique de sols à faible épaisseur et à forte surcharge hydrique).

Peu à peu, du fait d'apports latéraux venant des versants, le débit augmente, passant de 30 l/s à 50-60 l/s puis à 100 l/s avant la zone de décrochement. Par contre, du fait de la végétation et de la complexité du chenal d'écoulement les vitesses restent modestes, de l'ordre du mètre par seconde environ. Au niveau même du lit, la végétation est de manière générale couchée voire parfois arrachée au pied des secteurs à forte pente. L'érosion linéaire est faible, l'érosion latérale inexistante et les eaux d'écoulement sont claires.

A l'altitude de 3600 m, quelques mètres au-dessus du décrochement principal, on peut observer un décrochement ancien, de quelques dizaines de mètres cubes, dans l'axe même de la *quebrada*, aujourd'hui en grande partie revégétalisée. Ce décrochement, du fait de la rupture de pente qu'il génère, permet au flux d'eau de prendre sur quelques mètres la vitesse nécessaire pour arracher de façon un peu plus nette la végétation du fond du lit.



Photo. 1 : Traces d'écoulement superficiel sur le páramo de la partie haute du bassin versant de La Comunidad

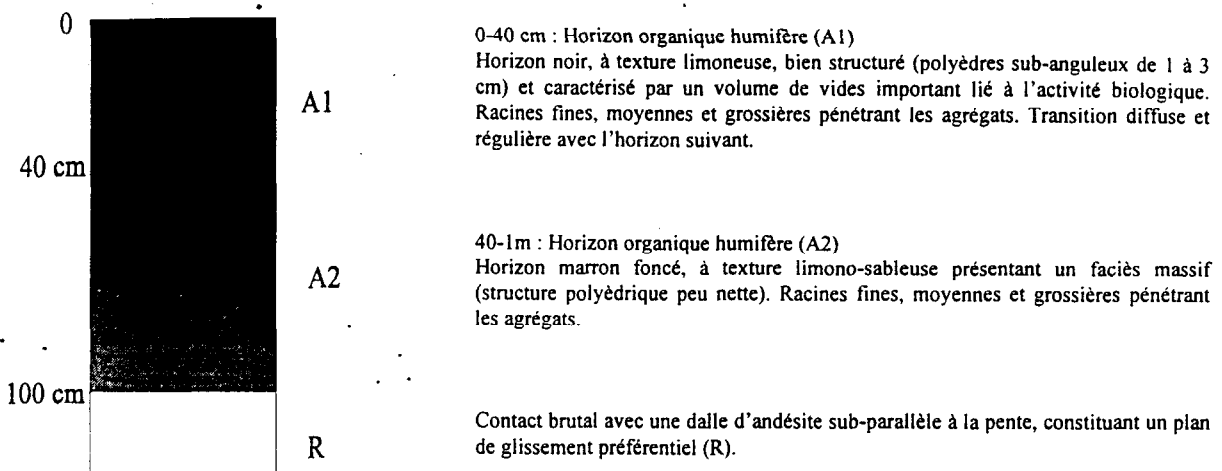
3.3 Secteur 3 : Déclenchement de la lave torrentielle et mise en vitesse du flux

A ce niveau, on observe un décrochement net dans le fond de la *quebrada* (Fig. 1, point 4 et Photo. 2). Une trentaine de mètres cubes de sol ont glissé (cette fois, le jour même de l'événement) le long d'un plan structural à fort pendage orienté dans le sens même de la pente.



Photo. 2 : Zone de départ de la lave torrentielle - Décrochement initial

Au niveau du décrochement on observe le profil suivant :



Les principales particularités de ce profil de fond de talweg sont d'une part sa faible épaisseur, et d'autre part son contact brutal avec une dalle d'andésite. Afin de compléter la connaissance de ce sol, nous avons procédé à quelques analyses d'échantillons prélevés dans le niveau A2, soit directement au dessus du plan de glissement supposé. Ce niveau est composé d'une proportion importante ($\geq 50\%$) d'éléments et sables grossiers (particules $> 0,2$ mm) enchâssés dans une matrice limoneuse (limon $\geq 35\%$). L'arrangement entre les particules permettrait de dégager une porosité importante de l'ordre de 60% du volume total (porosité basée sur le rapport entre la densité apparente du matériel non remanié et la densité réelle des composés). Cependant cette forte porosité (classique des "volcanic ash soils") ne se traduit pas en terme d'affinité pour l'eau. En effet, la capacité de rétention à saturation, mais également la capacité de rétention à pF 2.5 (capacité au champ), apparaissent particulièrement faibles (de 60% et 25% respectivement).

Cet horizon semble donc pouvoir se saturer très rapidement et posséder des propensions particulières à franchir les limites de plasticité voire de liquidité. Ce point semble confirmé par les mesures des limites d'Atterberg, -mesurés par la méthode classique de la boîte de Cassagrande-, à savoir : limite de liquidité = 44 %, limite de plasticité = 33 % et indice de plasticité = 11 %. Ces valeurs montrent que cet horizon est en mesure de passer à un comportement plastique et/ou liquide avec de relativement faibles quantités d'eau.

Les caractéristiques de ce profil permettent d'avancer l'hypothèse suivante quant à la genèse du décrochement : des circulations d'eau entre la roche mère imperméable et un sol peu épais fortement surchargé en eau (voire saturé) par les très fortes précipitations, ont favorisé le déplacement d'une quantité non négligeable de matériel liquéfié, entraînée ensuite dans la *quebrada*. A noter que le décrochement n'est pas dans l'axe du flux d'eau venant de la partie supérieure de la *quebrada*. Il semble donc que l'écoulement ne soit pas directement responsable de la genèse même du glissement mais qu'il a certainement joué le rôle de facteur aggravant.

Entre 2 à 5 m du point de décrochement, le flux de terre (probablement déjà peu visqueux) et le flux d'eau se mélangent de façon immédiate, avant de chuter presque à la verticale, une cinquantaine de mètres en dessous (Photo. 3). Si en amont du décrochement la *quebrada* avait gardé sa forme d'antan, il n'en va pas de même à l'aval où elle a été en grande partie dévastée. Au niveau de la cascade les racines enchâssées entre des blocs de roche mère totalement nettoyés témoignent de la violence du flux, qui sur 4 à 5 m de large a arraché arbres, arbustes et enlevé des pierres de grande taille. Certains blocs ont même dû être projetés dans la *quebrada*, en témoignent les branches cassées ou arrachées plusieurs mètres au dessus des traces laissées par la coulée boueuse elle-même.



Photo. 3 : Cascade située quelques mètres à l'aval du point initial de décrochement

A noter qu'au niveau de la cascade, l'apport d'un ruisseau drainant, en rive droite, le haut de la *quebrada* (entre 100 et 200 l/s) augmente encore la fluidité du matériel. De plus, une source apparaît dans le cours même de la *quebrada*, par exfiltration à travers la roche mère fracturée. C'est ici que paraît commencer la partie pérenne du ruisseau.

Quelques mètres en dessous de la cascade, et malgré des vitesses probablement supérieures à 10 m/s, le flux se stabilise dans le cours (ici moins pentu), pulvérisant dans chaque courbe ou à chaque ressaut de la boue à plusieurs mètres au dessus du cours actuel du ruisseau. Aucune abrasion (le fond du lit étant constitué de roche mère peu fracturée et peu altérée) ou érosion latérale importante n'a été observée sur cette partie du cours où le flux a seulement arraché la végétation des rives. Jusqu'au grand glissement observable en rive droite de la *quebrada*, la situation n'évolue que peu. La topographie du lit montre une succession de zones à très forte pente et de zones un peu moins raides, marquées par une très faible rugosité du fond formant de véritables toboggans et permettant globalement de conserver la vitesse initiale du flux.

3.4 Secteur 4 : Zone des glissements coulées et d'augmentation du volume de la lave torrentielle

Cette partie de la *quebrada* est marquée par l'apparition, le long du cours, d'un grand nombre de glissements de terrain latéraux plus ou moins importants, ayant apporté des quantités substantielles de matériel avant, pendant et après le passage de la coulée boueuse venant de la partie haute de la *quebrada*. Il s'agit en fait de glissements-coulées qui, d'après Flageollet (1989), désignent des mouvements typiques dans des cendres volcaniques, où le matériel déplacé évolue rapidement en une masse fluide à grand pouvoir destructeur.

Le premier, venant du versant en rive droite de la *quebrada* a environ 8 mètres de large, et a emporté sur environ 80 mètres de long une épaisseur de 80 cm de sol (Fig. 1, point 5 et Photo. 4).

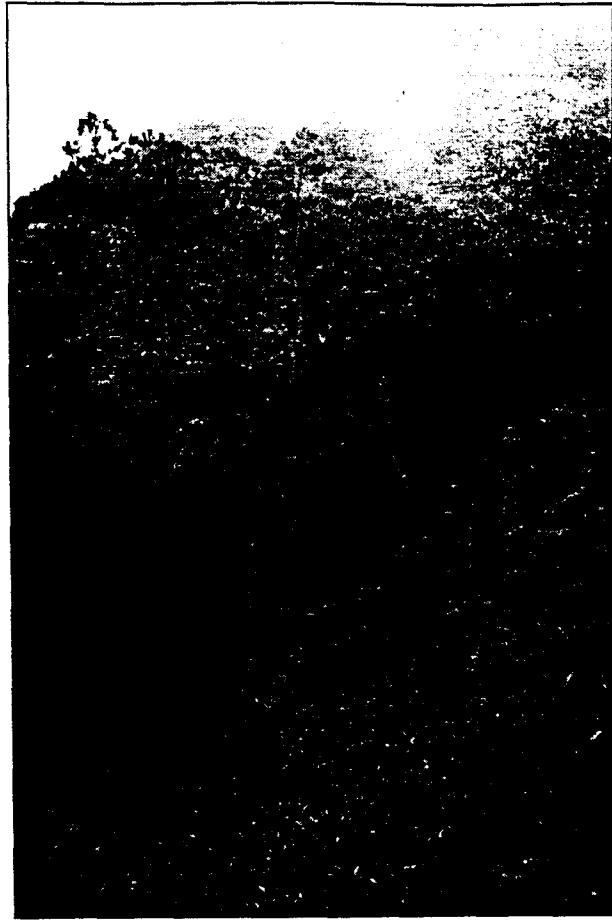
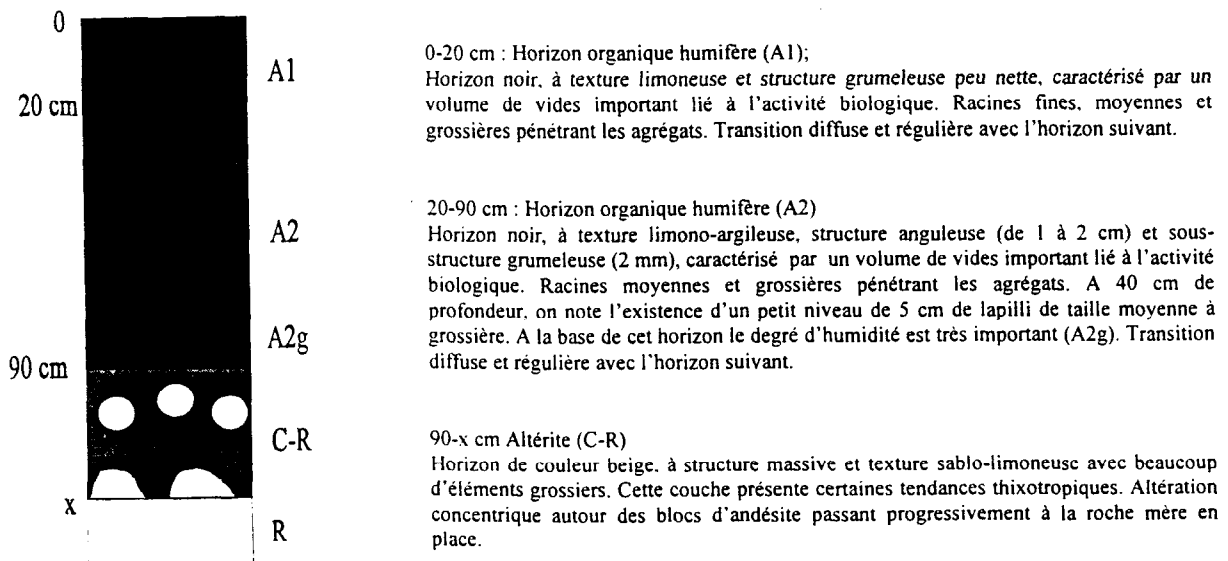


Photo 4 : Glissement-coulée en rive droite de la quebrada de La Comunidad

Comme dans le cas du départ principal décrit précédemment le profil pédologique de la zone de décrochement de ce glissement-coulé est tout à fait particulier. En effet, on y observe les horizons suivants :



Là encore la faible épaisseur d'un sol facilement saturable reposant sur un horizon quasiment imperméable (les traces d'oxydoréduction et l'humidité fort importante de la base de l'horizon A2 ne laissant aucun doute sur la difficulté de l'infiltration de l'eau dans l'altérite) a constitué un facteur fondamental dans le déclenchement du glissement. Il est à noter par contre que ce départ s'est réalisé sur un horizon endurci d'altération de la roche et non pas, comme précédemment, directement sur l'andésite en place. Il semble par ailleurs qu'autour du décrochement actuel l'épaisseur des cendres reposant sur l'altérite tend à croître considérablement. Cette zone de départ aurait ainsi coïncidé avec la présence de sol peu épais.

Ce glissement-coulée aurait ainsi entraîné de 200 à 300 m³ de terre et rochers. Il s'agit là du plus important glissement que nous ayons pu observer. L'importante quantité de matériel resté accumulé au fond même de la *quebrada*, laisse penser que celle-ci ait pu glisser après le passage de la coulée boueuse. Parallèlement, les observations de terrain montrent une augmentation nette de l'intensité de l'érosion (surtout linéairement) en aval de cette zone. Ce phénomène, probablement lié à une augmentation de la viscosité de la coulée (il n'y a, a priori, rien dans la topographie qui puisse expliquer une augmentation brutale de la vitesse du flux) ne peut s'expliquer que par un apport important de matériel. En conséquence, on peut penser qu'une partie non négligeable du matériel mis en mouvement sur le flanc de la *quebrada*, à ce niveau du cours, l'ait été avant ou simultanément au passage de la coulée boueuse.

Compte tenu de l'augmentation des potentialités érosives du flux, mais aussi de conditions géologiques particulières, on note un changement net de la forme de la *quebrada*. Le fond, marqué par des ressauts successifs, a été par endroit très fortement entaillé (parfois sur plus de 2 m de profondeur).

Plus à l'aval, on peut observer deux petits glissements, le premier en rive gauche, le second en rive droite ayant eu lieu avant ou pendant le passage de la coulée. Hormis quelques branchages et 2 ou 3 m³ de terre tombés après l'événement, la totalité du matériel déplacé ici a été emportée. On peut observer, en rive gauche, les traces d'un très fort ruissellement de surface lié au débordement d'un petit canal d'amenée d'eau situé une cinquantaine de mètres au-dessus du fond de la *quebrada*. Compte tenu de la forte pente du secteur, il est difficile d'estimer le débit maximum de cet apport, qui de toute façon n'a pas dû dépasser 200 à 300 l/s. A noter la présence entre ces deux glissements latéraux d'un tronc d'eucalyptus d'une quinzaine de mètres de long, resté coincé dans le fond même du cours, particulièrement érodé dans ce secteur.

Jusqu'à 50 m de la sortie de la *quebrada*, le schéma reste à peu près le même. Ces secteurs marqués par une très forte érosion du fond présentent çà et là des zones d'accumulation de grosses pierres (d'un volume souvent supérieur au m³). De profondes stries (dans le matériel tendre) et de nombreux éclats (sur les roches dures en place) marquent ici encore l'importance du charriage et la violence de la coulée boueuse.

On observe ensuite, en rive gauche, un nouveau glissement latéral ayant pu créer un petit barrage au fond de la *quebrada* ici beaucoup moins pentue. Ce barrage, de quelques dizaines de m³ de matériel divers aurait été emporté lors du passage de la coulée.

Au niveau même de la fin de la partie encanyonée de *quebrada*, on peut observer en rive droite un petit glissement de terrain n'ayant pas du jouer lors de l'événement un rôle très important.

3.5 Secteur 5 : Zone de diminution des vitesses d'écoulement - Dernière protection des zones habitées

Au sortir de la partie encanyonée, la *quebrada* s'élargit brutalement formant un large champ d'épandage (Fig. 1, point 6). Parallèlement, la pente du lit diminue fortement, entraînant une importante perte de compétence de la coulée.

Cette diminution des potentialités de transport de la coulée se traduit par le dépôt des pierres de très grande taille (d'un volume supérieur au m³) à la sortie même de la *quebrada* (Photo. 5).

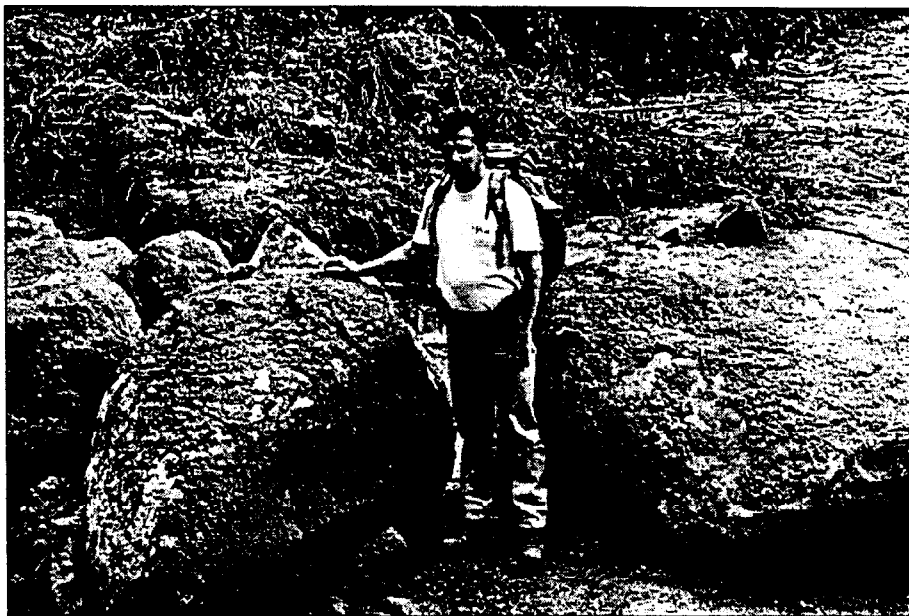


Photo. 5 : Dépôts de pierres de grande taille à la sortie de la quebrada La Comunidad

Les blocs de plus petite taille se sont déposés quelques centaines de mètres en dessous, sur une zone pseudo-plane ayant été déboisée dans les derniers mois, arrêtés par la végétation arbustive, les souches, les pierres plus grosses et des entrelacs de matériel végétal arrachés par la coulée elle-même et probablement poussés à l'avant du flux (Photo. 6).

Compte tenu des pertes de vitesse et de compétence qu'elle a occasionnées, le rôle de cette surface d'épandage a été fondamental pour la protection de la zone habitée située à l'aval. Il est clair que cette protection aurait pu être beaucoup plus efficace si l'ensemble de ce secteur avait encore été végétalisé.

Très vite, le flux qui s'était largement étalé sur la zone d'épandage située en amont du quartier la Comuna, se concentre à nouveau suivant l'ancienne *quebrada*, remblayée au fil des années (Fig. 1, point 7). La force des eaux entaille profondément le remblai ouvrant un nouveau cours entre le talus et la rue, emportant une grosse partie du matériel accumulé ici.

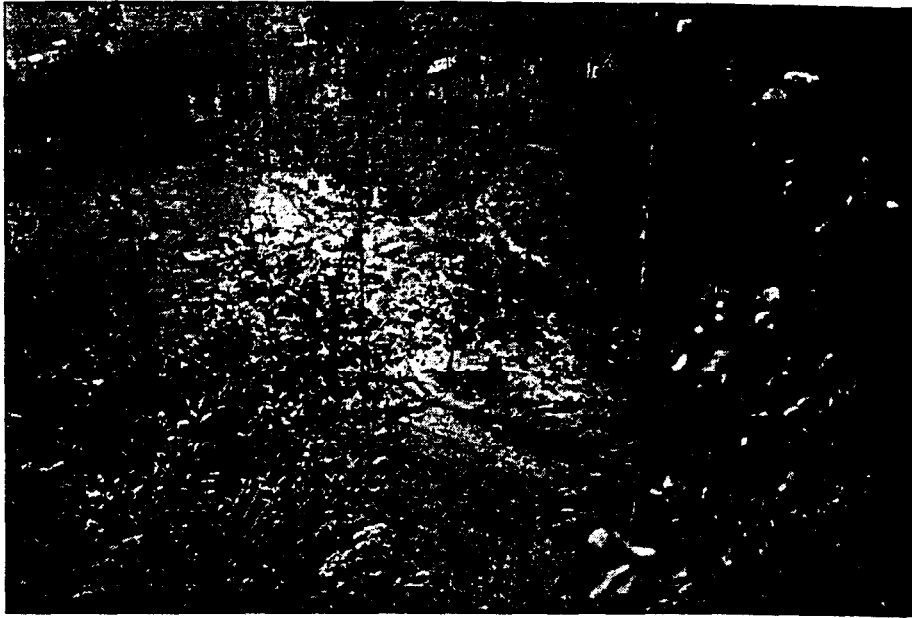


Photo. 6 : Zone pseudo-plane où ce sont déposées les pierres de plus petites tailles

3.6 Secteur 6 : Passage de la lave torrentielle dans le quartier de la Comuna

La coulée rentre alors dans le quartier, laissant ça et là des troncs d'arbres arrachés plus en amont dans la *quebrada*. De gros blocs (de plus d'un mètre cube) ont été transportés et déposés au niveau des premières maisons du quartier, déviant par endroit le cours de la coulées boueuses d'un côté à l'autre de la rue sur les maisons (Photo. 7). Ce phénomène explique la montée du flux jusqu'au premier étage de certaines habitations (Photo. 8).



Photo. 7 : Blocs de rochers déposés au niveau des premières maisons du quartier et ayant déviés la coulées boueuses d'un côté à l'autre de la rue, sur les maisons



Photo. 8 : Traces laissées par le passage de la lave torrentielle sur l'une des maisons du quartier

Suivant l'ancien cours de la *quebrada* et la partie haute de la rue Humberto Albornoz, le flux débouche au croisement avec la rue 12 de Agosto (Fig. 1, point 8). Là, au lieu de suivre le cours même de la *quebrada* (bouchée en totalité par le passage de la rue) la plus grosse partie du flux bifurque et suit la rue Albornoz en direction de l'avenue *Occidental*, détruisant au passage une maison située au niveau du croisement. Reprenant de la vitesse dans cette rue très en pente, la lave torrentielle arrache tout sur son passage, emportant voitures, matériel urbain, pavement et arrachant les poteaux électriques. Une grande quantité de boue, amenée par le flux envahit les maisons. Le lendemain du désastre, les habitants du quartier sortaient la boue des rez-de-chaussée par mètres cubes.

Le lendemain, un bus et un camion se trouvaient encore retournés au milieu de la rue (Fig. 1, point 9): Le bus, littéralement emporté par le flux et déplacé sur une cinquantaine de mètres environ, est resté coincé en travers de la rue (Photo. 9).



Photo. 9 : Bus déplacé par la lave torrentielle

Bien que s'étant mis en place après le passage du plus gros de la coulée, il semble que cet obstacle ait pu jouer le rôle d'une protection pour la partie basse de la rue retenant des pierres et du matériel arraché le long de la partie haute de la rue. De plus, du fait de cet obstacle une partie du flux s'est vue dévier vers le nord en direction de la *quebrada* elle-même, diminuant ainsi, mais certainement trop tard, la quantité de boue s'écoulant dans la partie basse de la rue.

Le flux, suivant ainsi la rue Humberto Albornoz, est ensuite arrivé sur l'avenue *Occidental* (Photo. 10), déposant la plus grande partie du matériel arraché sur la partie haute de la *quebrada* et dans la rue elle-même. De 1 m à 1,5 m de boue se sont ainsi déposés sur l'avenue formant ici un point bas, empêchant pendant plus de 24 heures tout trafic. A noter que l'avenue a joué ce jour là le rôle d'un véritable bassin d'expansion permettant au flux de boue de s'étendre, en largeur, sur une bonne centaine de mètres. Ainsi, seule la partie la plus liquide du flux a pu, par débordement, poursuivre son cours en dessous de l'*Occidental*, ne générant alors que des dégâts mineurs jusqu'à la *Plaza Italia*, un kilomètre plus bas.

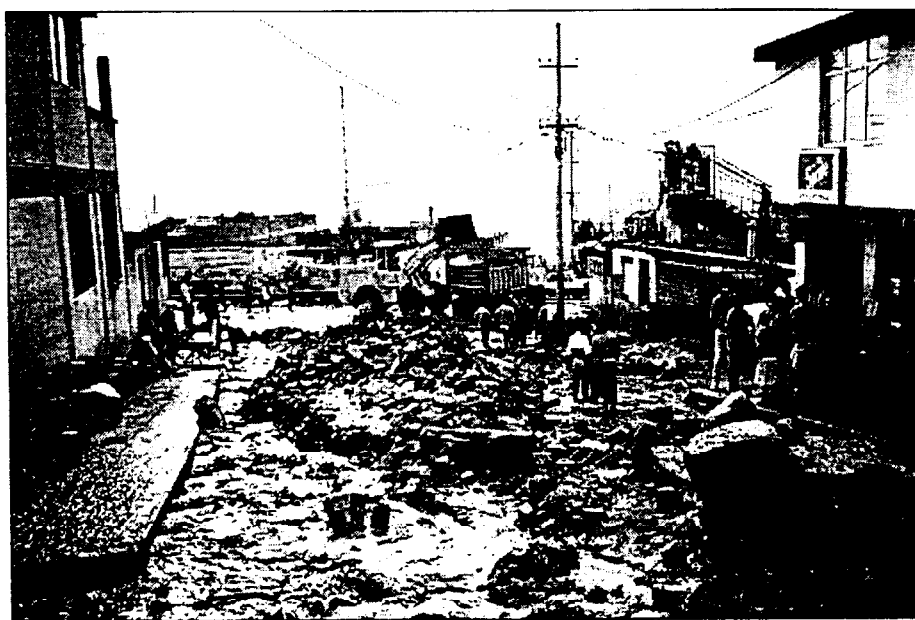


Photo. 10 : Croisement de la rue Humberto Albornoz et de l'avenue Occidental - Secteur de dépôt d'une grande partie du matériel transporté par la lave torrentielle

Au niveau de la *quebrada* elle-même, celle-ci conflue avec une autre plus petite, et suit son cours jusqu'à l'entrée du collecteur du réseau d'égouts (Fig. 1, point 10). Ce dernier, comme l'ensemble du système de collecte des eaux du secteur, a dû être très rapidement bouché du fait de la présence d'une quantité importante de déchets domestiques et de matériel divers. Les eaux ne pouvant s'écouler se sont accumulées en amont d'un important remblai constitué de gravats divers (Photo. 11). Au pied de ce remblai de 40 m de large et 20 m de haut, on pouvait voir, le lendemain, de faibles exfiltrations d'eau. L'existence de chemins d'écoulements préférentiels à travers, ou simplement à l'intérieur même du remblai représente un facteur supplémentaire de risque pour l'ensemble des secteurs urbains situés en dessous.

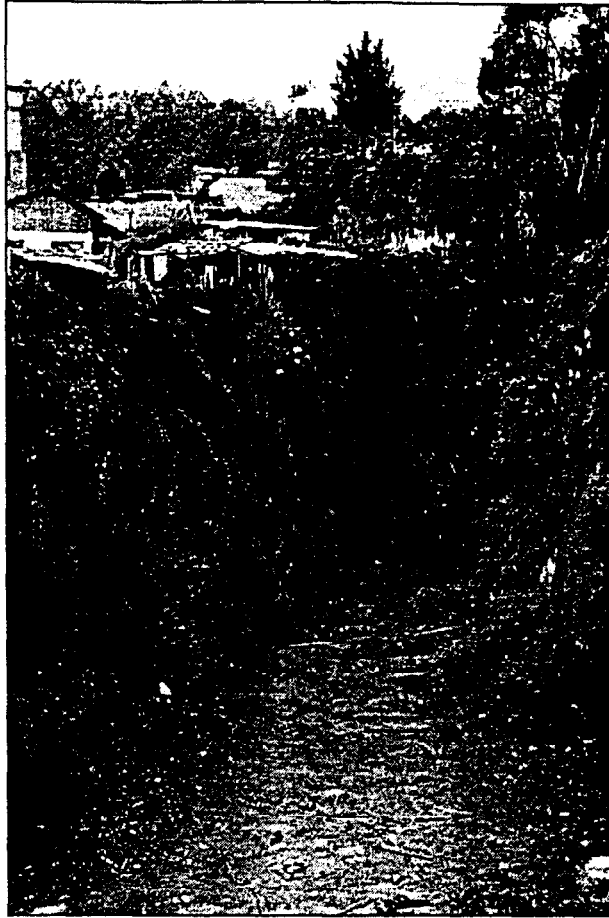


Photo. 11 : Accumulation d'eau à l'entrée du réseau d'égout de la quebrada La Comunidad

4. L'ÉVÉNEMENT DE LA COMUNA DANS LE CONTEXTE HISTORIQUE DES LAVES TORRENTIELLES ET COULÉES BOUEUSES OBSERVÉES DEPUIS 1960 A QUITO

Peltre (1989) a recensé dans les articles de presse plus de 300 événements responsables de 517 accidents ponctuels d'extension et de gravité diverses entre 1900 et 1988. Si les coulées boueuses et les laves torrentielles sont, globalement, les événements les moins fréquents, ce sont en général les plus destructeurs.

4.1 Considérations générales

Ayant lieu en périphérie de la zone urbaine, mais pouvant largement toucher les infrastructures de la ville compte tenu de leur extension, ces phénomènes sont toujours liés au tracé actuel ou ancien des *quebradas*.

Nous ne nous intéresserons ici aux seuls événements ayant eu lieu depuis 1960. En effet, compte tenu des importantes mutations du tissu urbain depuis le début du siècle, ce sont les seuls qui puissent encore être étudiés sur le terrain. Ainsi, entre 1960 et 1988, 24 événements de type crues boueuses ou laves torrentielles ont été recensés, dont 13 graves à très graves ont entraîné des dégâts matériels importants et/ou la perte de vies humaines.

L'argument le plus communément avancé pour expliquer ce genre de phénomène réside en la mise en place, sur la partie amont du bassin versant, d'un barrage pouvant, suite à l'accumulation d'eau, se rompre et engendrer une lave torrentielle dévastatrice.

En fait quatre cas de figure bien distincts peuvent être mis en évidence :

- Cas 1 : accumulations d'eau dans les parties aval des *quebradas*, en général aux entrées du réseau d'égout, suite au bouchage d'un collecteur. La lave torrentielle est alors liée au débordement et à la rupture des remblais aménagés pour écrêter les crues à l'entrée de collecteurs sous dimensionnés. Il s'agit des phénomènes les plus impressionnants et les plus destructeurs du fait de leur grande extension spatiale (1 sur 13).

- Cas 2 : bouchages ou débordements de canaux d'amenée d'eau ou du réseau d'égout à mi-versant, générant des coulées boueuses, au niveau de secteurs fortement peuplés. En général beaucoup plus localisés, ces phénomènes sont toutefois les plus meurtriers compte tenu de l'urbanisation des zones touchées (5 sur 13).

- Cas 3 : glissements de terrain évoluant rapidement en coulées boueuses ou avalanches de débris du fait de la liquéfaction rapide du matériel. Ces phénomènes extrêmement meurtriers s'observent en général sur les versants urbanisés largement déstabilisés par l'activité humaine (4 sur 13).

- Cas 4 : laves torrentielles détruisant l'ensemble d'une *quebrada*, et suivant en général l'ancien tracé de celle-ci à l'intérieur même du tissu urbain - comme à la Comuna -. Nous ne disposons, en général, que d'explications extrêmement divergeantes concernant ces phénomènes. Par contre les différents auteurs (en particulier Feininger, 1976) ayant étudié certains des événements les plus marquants réfutent de façon claire l'existence de barrages, associant le phénomène à un événement hydrologique extrême (3 sur 13).

4.2 Événements similaires : La Raya et La Gasca ?

Depuis 1960, seuls deux événements ont été étudiés et sont documentés :

- La Raya (23 janvier 1986) sur le bassin versant de la *quebrada* du même nom,
- La Gasca (26 février 1975) sur le bassin versant de la *quebrada* El Tejado

Dans le cas de la Raya (De Noni et al., 1988), il semble que le phénomène observé s'apparente plus à une crue boueuse (flux hyperconcentré) sur une zone en pleine mutation de fait de son urbanisation. En effet, un violent orage, très localisé, serait tombé sur le quartier. La forte érosion de secteurs très remaniés, associés au dysfonctionnement d'un réseau d'égouts en cours de réfection serait à l'origine de cet événement. Ce dernier, sans gravité, n'a finalement que perturbé le trafic routier et inondé quelques rez-de-chaussée. Nulle part il n'est fait mention de vitesses importantes ou d'un phénomène particulièrement destructeur.

L'analyse de l'événement du 26 février 1975 à La Gasca (Feininger, 1976) paraît ici beaucoup plus intéressante. En effet, comme pour la Comuna, les descriptions dont nous disposons laissent à penser qu'il s'agissait là aussi d'une lave torrentielle.

Feininger parle lui aussi d'une précipitation exceptionnelle, extrêmement localisée sur le secteur de La Gasca. La lave torrentielle aurait alors été provoquée par une très forte crue ayant érodé le bas des versants de la *quebrada*, remobilisant le matériel stocké le long du cours.

Toutefois, l'auteur mentionne trois faits importants que nous avons nous aussi pu observer sur la *quebrada* La Comunidad, pouvant donner du phénomène une explication différente :

- comme à la Comuna, aucune crue destructrice n'a été observée sur les *quebradas* voisines. Bien que très localisée à l'échelle de la Ville de Quito, l'extension des cellules pluvieuses liées à ce type d'événement dépasse toujours les deux kilomètres carrés (superficie approximative de l'ensemble des deux *quebradas* : Pambachupa et La Comunidad). En conséquence, deux processus peuvent être ici distingués, d'une part, des laves torrentielles ayant une origine spécifique (La Gasca, 1975 et La Comuna, 1997), et d'autre part des crues purement hydrologiques de faible amplitude observables au pied du Pichincha lors de chaque événement pluvieux de fréquence rare.

- l'auteur mentionne l'existence, sur le cours de la *quebrada*, d'une cascade de quelques 40 m de haut et s'étonne de la faible érosion sur la partie haute de la *quebrada* en amont de la cascade (vue d'hélicoptère) avançant l'hypothèse d'une protection plus efficace de la végétation sur ce tronçon du cours. Nous avons quant à nous observé le même type de phénomène, l'expliquant (suite à une étude minutieuse du terrain) par le glissement et la rapide liquéfaction d'une quantité réduite de matériel ayant par la suite chuté sur 50 m, quasiment à la verticale, et acquérant ainsi la vitesse suffisante pour tout détruire en aval.

- Feininger note, comme à la Comuna, l'existence tout au long du cours de la *quebrada* de plusieurs glissements de terrains latéraux ayant apporté des quantités non négligeables de matériel (plusieurs centaines de m³).

En conséquence, il semble que nous ayons eu affaire, le 26 février 1975 à La Gasca et 31 mars 1997 à La Comuna à deux phénomènes similaires (une lave torrentielle), ayant a priori les mêmes causes, et globalement les mêmes conséquences. Par contre, il semble évident que les destructions ayant touché la ville de Quito aient été beaucoup plus importantes lors de l'événement de La Gasca que lors de celui de La Comuna. Doit-on en conclure que le premier, pour des raisons aujourd'hui inconnues, aurait été plus important que le second ?

En 1976, Feininger mettait en garde les autorités sur les conséquences que pourrait avoir la construction de l'Avenue *Occidental* sur la stabilité des sols et des formations superficielles du pied du Pichincha. Or, 20 ans après, suite à l'événement de la Comuna, il semble que l'Avenue *Occidental* (construite à la fin des années 1970) ait cette fois protégé la ville d'un désastre peut-être comparable à celui de 1975. Comme nous l'avons vu précédemment, l'avenue a joué ici le rôle d'un véritable bassin d'expansion. Seule la partie la plus liquide a pu, par débordement, poursuivre son cours en amont, ne générant que des dégâts mineurs jusqu'à la *Plaza Italia*.

En conséquence, cet ouvrage pourrait être, au moins sur certains tronçons, la protection la plus efficace dont disposerait actuellement Quito face aux laves torrentielles.

4.3 Importance du profil en long des quebradas

Il paraît encore aujourd'hui difficile, voire impossible, de prévoir et d'anticiper de tels événements. Par contre, le fait qu'à 20 ans d'intervalle, sur le même secteur géographique, deux événements similaires aient endommagé gravement le même secteur urbain, ne relève pas du hasard.

S'il est clair que la période de retour des événements pluvieux soit l'un des facteurs principaux d'explication du phénomène, il semble que la morphologie même de la *quebrada*, et en particulier son profil en long, ait pu jouer un rôle fondamental dans la génération de ce type de phénomène.

A partir d'un modèle numérique de terrain (pas 20 m), nous avons extrait les profils en long de toute les *quebradas* comprises entre le secteur de La Gasca et l'extrême nord de la ville de Quito (Fig. 2).

Compte tenu du mode de calcul de ces profils, il est malheureusement impossible d'interpréter les ruptures de pentes observables le long du cours des *quebradas*, et donc de mettre en évidence les chutes quasi verticales ayant joué un rôle fondamental dans la génération des phénomènes de la Gasca et de la Comuna. Par contre, la simple comparaison des différents profils est riche d'enseignements.

On peut ainsi différencier deux grands groupes de *quebradas* :

- le premier, très homogène, rassemble la plupart des petites *quebradas*, ayant une superficie inférieure à 1,5 km². Celles-ci se caractérisent par des profils en long à forte pente, au moins sur leur portion moyenne. Dans ce groupe, La Comuna se différencie nettement, la pente moyenne de son cours étant beaucoup plus importante que celle des autres *quebradas*.
- le second, beaucoup plus dispersé, rassemble les *quebradas* ayant une superficie supérieure à 1,5 km². Celles-ci se caractérisent par des profils en long beaucoup moins pentus, comme c'est le cas par exemple, des *quebradas* Rumihurcu et Rumipamba (les deux plus grandes du secteur d'étude).

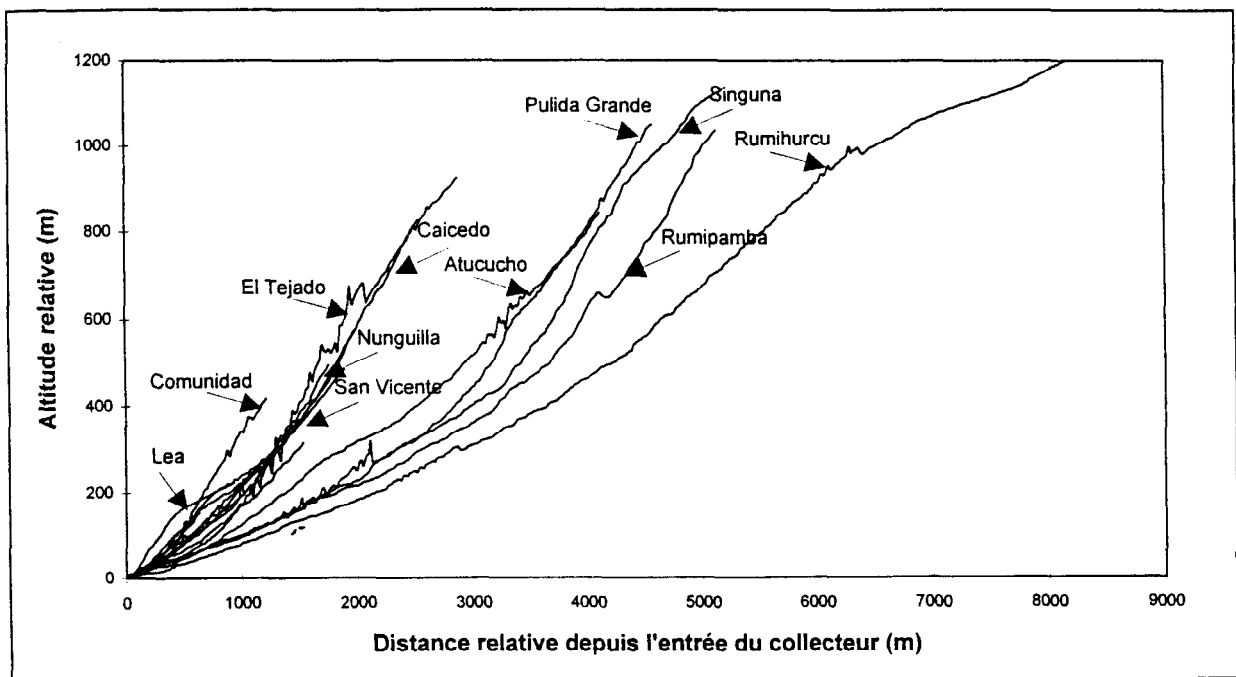


Fig. 2 : Profils en long des principales quebradas de la zone nord occidentale de Quito

Les *quebradas* du premier groupe (à profils en long très pentus) sont bien évidemment plus sujettes à des événements du type de ceux de La Gasca ou de la Comuna, que la *quebrada* Rumihurcu, plus proche de son profil d'équilibre du fait d'une évolution géomorphologique (probablement ancienne - dernière période glaciaire) beaucoup plus marquée.

Il semblerait donc opportun, avant d'envisager un quelconque aménagement des flancs du Pichincha, d'effectuer une campagne exhaustive de topographie de chaque *quebrada* et de réaliser ainsi une étude précise de leurs profils en long. Cette étude, associée à différents travaux concernant la vulnérabilité du secteur, devrait permettre la mise en évidence de points critiques (susceptibles d'être aménagés) sur des *quebradas* dites à risques, vis à vis d'événements du type de ceux de la Comuna ou de La Gasca.

5. LES FACTEURS DE VULNERABILITE EXPLIQUANT L'ACCIDENT DU 31 MARS 1997

Avec deux morts, trois maisons partiellement détruites, une dizaine de véhicules emportés et une organisation sociale affectée pendant plus d'un mois, l'événement du 31 mars 1997 a été catastrophique à l'échelle du quartier. Cependant, et tout en considérant la valeur de chaque vie, il n'en reste pas moins mineur à d'autres échelles.

En particulier, il ne sera pas recensé dans la liste des catastrophes des Nations Unies. En effet, cet organisme n'enregistre que les crises comptant au moins dix morts, plusieurs millions de dollars de dégâts, une organisation sociale durablement perturbée et une intervention extérieure pour les secours. Les conséquences du tremblement de terre de Quito en 1987 ou de l'éruption en Colombie du Nevado del Ruiz en 1985 ont ainsi été considérées comme des catastrophes majeures. En ce qui concerne les risques hydro-morpho-climatiques, une comparaison peut également être faite avec le glissement-coulée qui frappa deux quartiers de Quito (La Colmena et La Libertad) en 1973 et provoqua la mort de 23 personnes.

Catastrophe à l'échelle du quartier, la crise de La Comuna ne sera donc qualifiée que d'accident à l'échelle de la ville ou du pays.

Catastrophe ou accident, celui-ci est le produit de deux éléments, l'un naturel, la lave torrentielle, l'autre social, l'occupation humaine de ce secteur. Après avoir analysé le phénomène naturel sous ses divers aspects (précipitations, crue, instabilité des sols, ...), il apparaît donc indispensable d'identifier les facteurs de vulnérabilité qui sont à l'origine des dégâts occasionnés. Cette analyse nous amènera à considérer La Comuna comme un espace à risque (Sierra, 1997).

L'étude montre l'existence de quatre facteurs principaux de vulnérabilité :

- une occupation urbaine d'un secteur menacé par différents aléas naturels,
- des facteurs institutionnels pesant largement sur l'aménagement du quartier,
- des facteurs physiques et techniques liés à l'urbanisation,
- des insuffisances dans la formation d'une population socialement et économiquement défavorisée.

Il en découlera dans une dernière étape une analyse de la situation actuelle et des leçons à en tirer.

5.1 L'occupation des versants du Pichincha : première cause de vulnérabilité

Les versants du Pichincha connaissent aujourd'hui une forte dynamique d'urbanisation. Malgré une limite imposée par le règlement métropolitain de Quito et l'existence d'une zone protégée (*bosque protector*), les versants du volcan sont encore des fronts pionniers pour la ville. Très nette sur la partie nord de la ville, cette croissance urbaine explique en grande partie l'augmentation du risque sur ce secteur fortement anthropisé.

L'occupation croissante de terrains inadaptés (fortes pentes, instabilité des sols, zone à forte sismicité, probabilité d'éruption volcanique, ...) conduit les études sur les risques à mettre l'accent sur l'urbanisation de ces sites. Dans le cas de Quito, Peltre (1989) avait déjà mis en évidence le lien étroit qui existait entre l'augmentation du nombre d'accidents morpho-climatiques et la croissance spatiale de la ville. De même, l'étude réalisée sur le bassin de la *quebrada* Rumihurcu (Janeau et al., 1997) montre que ces espaces sont actuellement fortement colonisés et aménagés par la population sans aucune planification ni prise en compte des risques encourus.

Les considérations économiques (terrains à bas prix), géographiques (proximité des lieux de travail et des services administratifs ou commerciaux) et sociales (accès à la propriété) sont aujourd'hui plus importantes que l'existence d'un risque.

La Comuna s'inscrit dans cette logique. Bâtie sur de fortes pentes, le long de deux *quebradas* relativement profondes, le quartier poursuit actuellement son développement (Fig. 2). Le recensement de 1990 montre que 1440 habitants vivant dans 339 logements sont installés sur les 17 ha du quartier (soit une densité de 84,7 habitants/ha - données INEC 1990, disponibles dans la base de donnée SUIM de la Direction Générale de la Planification du District Métropolitain de Quito-DGP/DMQ).

Réduire l'importance des risques et l'ampleur des accidents d'origine naturelle passe donc, avant tout, par un meilleur contrôle de l'occupation du sol tout en tenant compte des facteurs juridiques et institutionnels qui la favorise.

5.2 Les facteurs institutionnels de vulnérabilité : un point clef

Les règles juridiques, l'organisation politique et les relations entre différentes autorités peuvent avoir un rôle décisif dans la création d'une vulnérabilité (Sierra et Metzger, in. Janeau et al., 1997).

Nous insisterons ici sur un point fondamental, à savoir le statut de *comuna* du secteur sinistré. En effet, ce quartier est régi par une loi nationale (*Ley de Organización y Regimen de las Comunas, 22 de septiembre 1976*) juridiquement prééminente aux ordonnances municipales. Ce statut, héritage de l'époque durant laquelle le secteur était encore considéré comme rural, montre bien les interactions existant entre espace urbain et espace rural à la périphérie d'une ville en pleine expansion. Bien que La Comuna fasse aujourd'hui partie du District Métropolitain de Quito, la loi lui confère encore une personnalité juridique spécifique.

Ainsi, le quartier reste, à ce jour, dirigé et représenté par un conseil élu de cinq membres, le *cabilde*, exerçant ses compétences sur la gestion de biens collectifs dont certains ont un rôle sur sa vulnérabilité à savoir : le sol et son occupation, les établissements éducatifs, les industries et les canaux d'irrigation.

En conséquence, la municipalité doit tenir compte de ce particularisme pour pouvoir développer son action sur le secteur. De l'avis de certains représentants municipaux, cela ne va pas sans difficultés. Le *cabilde* dont l'action est elle-même encadrée par le Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage (MAG) dont il dépend administrativement, tient à son autonomie, conforté en cela par la loi. Les trois niveaux politico-institutionnels (Etat, Municipalité, Quartier) sont donc ici étroitement imbriqués, rendant la gestion et la planification de cet espace délicate et complexe. L'équipement du quartier, la réglementation de l'utilisation du sol, les actions sociales à mener se heurtent à cette complexité institutionnelle. Les difficultés de communication entre autorités rendent souvent délicates l'obtention d'accords concernant l'aménagement de cette zone.

Son statut fait donc de La Comuna une entité en marge de la ville et semble devoir renforcer sa vulnérabilité face aux risques d'origine naturelle.

5.3 Les facteurs physiques et techniques de vulnérabilité liés à l'urbanisation

Nous analyserons ici, tout ce qui dans le bâti et l'aménagement physique de l'espace, peut générer une vulnérabilité face à des phénomènes morpho-climatiques extrêmes.

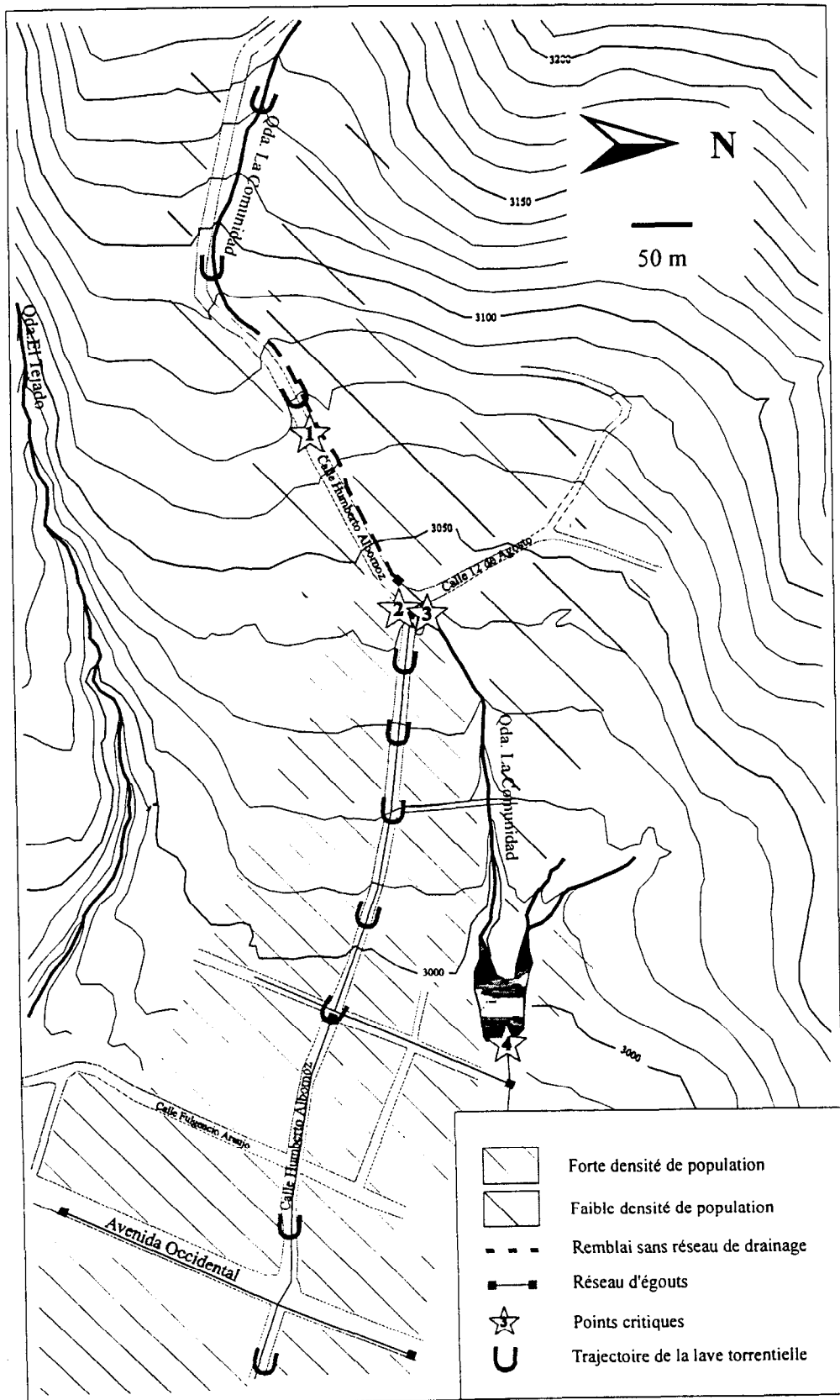


Fig. 2 : Le quartier de La Comuna - Localisation des facteurs physiques de vulnérabilité

5.3.1 Le remblayage des quebradas : un facteur de vulnérabilité généralisé à l'échelle de la ville

Le remblayage est un produit social et sa réalisation ne peut se comprendre que dans le contexte du développement urbain de Quito (Peltre et Metzger, 1997). Dès 1916, à la suite d'un accident similaire survenu sur la même zone, un article du Comercio (journal national édité à Quito) mettait en cause le remblayage des *quebradas* (Peltre, 1986). De même, dans son analyse de l'événement de la Gasca (25 février 1975), Feininger (1976) accusait le remblayage d'avoir été un élément aggravant.

Aujourd'hui, le remblayage est encore montré du doigt dans le cadre de l'accident de La Comuna. Toute la rue Humberto Albornoz en amont de son croisement avec la 12 de Agosto (la "Y") est tracée sur l'ancien passage de la *quebrada*. Il ne reste plus à l'eau qu'une mince rigole pour s'écouler le long du trottoir. Seule une petite bouche d'égout lui permettait de passer sous la "Y" et de retrouver un cours naturel à travers une zone moins peuplée, jusqu'à son entrée dans le réseau d'égouts de la ville. D'après des témoignages, lors de pluies violentes, la rigole débordait largement et l'eau s'écoulait dans la rue. Les bouches d'égouts s'obstruaient rapidement du fait de l'accumulation, à ce niveau, des nombreux déchets récoltés au passage par le flux.

Ce remblai a indubitablement participé à amplifier l'accident pour deux raisons confirmées tant par les enquêtes que par les observations. En effet, il a perturbé le drainage naturel du secteur, déviant ainsi la lave torrentielle vers les secteurs habités et a permis un apport non négligeable de matériel ayant par la suite traversé l'ensemble du quartier.

Le remblai de la partie haute de la rue Humberto Albornoz constituait donc l'une des zones critiques du secteur. Les enquêtes nous apprennent qu'il a été réalisé de façon anarchique, avec des gravats issus des constructions, des déchets et des rochers. De manière incontrôlée au départ, il a ensuite été planifié par le *cabilde* et réalisé au moyen de travaux collectifs. Normalement, ce type de travaux ne peut être mené sans autorisation préalable de la municipalité, et en particulier de l'EMAAP-Q qui doit, avant toute chose, poser un système de drainage. Cette règle fondamentale n'a pas, ici, été respectée. Comme nous l'avons vu, le statut autonome du quartier a donc joué contre sa sécurité.

A travers les différentes enquêtes, nous avons cherché à savoir si les habitants du quartier connaissaient l'existence de ce remblai et s'ils étaient conscients du danger qu'il pouvait représenter. Très peu le citent spontanément comme cause ou facteur aggravant de la catastrophe. Il est vrai que parmi les riverains tous ne connaissaient pas son existence (en particulier ceux du bas du quartier) et que seule une moitié des enquêtés connaissaient l'historique de sa mise en place. Compte tenu du manque d'informations, il semble encore aujourd'hui que la population du quartier ne soit pas consciente du rôle fondamental joué par ce remblai dans le déroulement même de l'accident.

On peut noter l'existence d'un autre remblai dans la partie basse du quartier (Fig. 2, point 4). Si ce dernier n'a pas joué de rôle particulier dans le déroulement du désastre, il pourrait néanmoins constituer une menace importante. Réalisé par l'EMAAP-Q, ce remblai en terrasse couvre l'une des entrées du système d'assainissement de Quito, dans lequel s'écoulent les eaux de ruissellement provenant de la *quebrada*. Il s'agit en fait d'un ouvrage de rétention sommaire permettant de stocker les eaux qui ne pourraient être évacuées par le système de drainage.

Le 31 mars 1997, l'entrée du réseau d'égouts de cette *quebrada* comme celles de tout le secteur, ont été obstruées par les nombreux déchets charriés par la lave torrentielle et par ceux qui se trouvaient sur place (souvent jetés par la population). Le lendemain, nous pouvions observer des exfiltrations d'eau à la base du remblai. Que se serait-il produit si le gros de la lave torrentielle, au lieu de descendre par la rue Humberto Albornoz, avait suivi son cours naturel s'accumulant ainsi en amont du remblai.

Cet ouvrage aurait-il résisté à la forte surcharge, ne se serait-il pas rompu, générant ainsi une catastrophe plus grave encore, en affectant l'ensemble des quartiers situés en aval ? Aussi pouvons-nous considérer ce remblai comme un point critique, non seulement pour La Comuna, mais aussi pour d'autres quartiers de Quito.

5.3.2 Le déboisement et les canaux d'irrigation : des facteurs aggravants surestimés

Sur la partie haute du quartier, l'action anthropique a contribué à augmenter l'écoulement superficiel : certains canaux d'irrigation ont pu se déverser dans la *quebrada* et des lignes de déboisement ont également pu créer des chemins d'écoulements préférentiels sur les versants. Toutefois, à l'échelle de l'accident, ces différents éléments restent négligeables.

La déforestation est à mettre en cause pour d'autres raisons. A la sortie de la *quebrada*, en amont du quartier, se situe un grand replat récemment déboisé. La faible pente et les quelques arbres encore sur pied ont permis à une partie des rochers charriés de se déposer, diminuant ainsi la force destructrice de la lave torrentielle. Si cette zone avait été protégée et conservée en l'état, une plus grande quantité de matériel aurait été stoppée et la vitesse du flux définitivement brisée. L'action anthropique a ainsi accru la vulnérabilité du quartier en le privant d'une de ses protections les plus efficaces.

Les enquêtes montrent pourtant que la population est sensible au déboisement. Huit personnes interrogées sur 36 le désignent comme l'un des facteurs ayant causé l'accident et 11 réclament une action ferme pour empêcher la poursuite de la déforestation voire pour réaliser une campagne de reforestation (soit le premier type d'action proposé).

L'idée selon laquelle la forêt serait un agent protecteur efficace est donc très répandue à Quito, comme le montraient déjà les enquêtes réalisées dans les bassins de la Rumihurcu et surtout de la Rumipamba (enquêtes réalisées en septembre-novembre 1996 par A. Sierra et M. Carcelén). Le classement du *cinturon verde* (bois d'eucalyptus entourant la ville) en *bosque protector* n'a pu que renforcer cette représentation. On peut alors se demander pourquoi le déboisement se poursuit.

La diminution de la surface du *bosque protector* est largement observable sur certains bassins, à la périphérie de la ville (Zevallos, 1996). Comme l'ont montré les études sur le bassin de la Rumihurcu, plusieurs facteurs sont à l'origine de ce phénomène : urbanisation, extension des secteurs cultivés ou pâturés, fonctionnement des briqueteries et vente de bois. Sur le bassin de La Comunidad, on ne trouve pas de briqueterie, les secteurs cultivés sont très limités et les pâturages en voie d'abandon. Le besoin d'espace à des fins d'urbanisation (en particulier de logements) semble être la cause essentielle de la déforestation.

Dans ce contexte, il faudrait sans doute analyser le rôle des propriétaires vendant leurs terres en fonction du marché foncier. De même, les statuts juridiques du *bosque protector* entretiennent des ambiguïtés favorables au déboisement. La municipalité a en charge la planification de son territoire mais, cet espace ayant été classé en *bosque protector*, il incombe à l'INEFAN de le gérer (*Ley de Distrito Metropolitano et Ley Forestal y de Conservación de Areas Naturales y Vida Silvestre, 14 de agosto de 1981*). Là encore, il semble nécessaire de faire le point sur une situation juridique complexe et sur les moyens donnés aux différentes institutions pour mener à bien les objectifs de protection.

Nous avons vu que le bois avait joué un rôle de "grille" en retenant une partie du matériel charrié par la lave torrentielle. C'est cependant son rôle face à l'érosion et au ruissellement qui a été toujours souligné et qui a justifié son classement en *bosque protector*. Pourtant, de nombreuses études réalisées par ailleurs signalent que cette idée peut être fautive et que pour le moins il faut la nuancer (Fristsch (1995) et Cosandey (1990)).

Le reboisement, en particulier en eucalyptus, ne répond donc peut-être pas à tous les besoins. C'est donc un ensemble de solutions qu'il faut aujourd'hui mettre en oeuvre pour protéger efficacement les habitants de ces quartiers.

5.3.3 L'évacuation des eaux : un facteur technique de vulnérabilité

Comme nous l'avons vu précédemment, la partie haute du quartier de La Comuna ne disposait pas d'un véritable réseau de drainage. La *quebrada* avait été remblayée et aucun système d'évacuation des eaux n'avait été mis en place. En dessous de la "Y", les riverains de la rue Humberto Albornoz disposent d'un réseau d'évacuation des eaux usées, incapable de drainer efficacement les eaux de ruissellement lors des événements pluvieux de forte intensité. Plus au nord, dans le prolongement du lit naturel de la *quebrada*, l'entrée d'un réseau d'égouts aurait dû permettre l'évacuation des eaux de pluie. Mais, rapidement bouché par la grande quantité de matériel charrié par la lave torrentielle, ce système de drainage n'a pu fonctionner de façon satisfaisante (Fig. 2, point 3).

Bien calibré et correctement entretenu, le réseau d'assainissement aurait-il permis une évacuation efficace de la crue qui a précédé le passage de la lave torrentielle, au lieu d'inonder les rues ? Aurait-il pu évacuer une partie de l'eau de la lave torrentielle ? Ces questions restent bien sûr sans réponse et posent une nouvelle fois le problème de l'évacuation des eaux à l'échelle de l'ensemble de la ville de Quito.

5.3.4 La qualité du bâti : un leurre ?

La lutte contre les risques d'origine naturelle passent souvent par des études poussées concernant la qualité du bâti. C'est en particulier le cas pour le risque sismique ou pour la construction d'ouvrages d'arts (ponts, digues) dans le cadre de la prévention vis à vis du risque hydro-météorologique. Il est vrai que la résistance du bâti (ou vulnérabilité physique) est l'un des facteurs déterminants dans l'évaluation du risque encouru. A La Comuna, suite à l'accident du 31 mars 1997, trois personnes interrogées comptaient construire un mur pour se protéger d'un tel phénomène. Une des solutions proposées spontanément réside donc dans le bâti.

Or, à La Comuna, les trois maisons partiellement détruites (Fig. 2, point 1 et 2) par le passage de la lave torrentielle étaient construites de parpaings et béton armé comme les trois quarts des habitations du secteur (données INEC 1990, disponibles dans la base de donnée SUIM - DGP/DMQ), le quart restant étant bâties en torchis (matériel moins résistant). Nous pouvons ainsi constater que peu de matériaux sont capable de faire face à l'impact d'une lave torrentielle. L'existence d'une vulnérabilité ne semble donc pas être liée au type de construction mais aux lieux d'urbanisation. Il faut pourtant souligner que la maison la plus touchée lors de l'accident a été reconstruite à l'identique et au même endroit. Aucune leçon n'a apparemment été tirée de l'événement du 31 mars 1997.

5.3.5 Les conditions d'accès : un facteur de vulnérabilité oublié

Si une aide substantielle a été fournie en vue de la reconstruction de la chaussée de la rue Humberto Albornoz, aucune réflexion globale n'a été menée sur l'accessibilité du quartier. Cette rue est la seule connexion entre le quartier et l'ensemble du réseau routier de Quito. De ce fait, les difficultés d'accès liées au passage de la lave torrentielle ont largement réduit l'efficacité des secours (Défense Civile et Croix Rouge). La vulnérabilité d'un quartier se mesure donc aussi en fonction de l'équipement du secteur. Comment secourir et évacuer efficacement les blessés quand la seule voie d'accès est fortement affectée par le désastre ? Il s'agit là d'une réflexion à mener de manière globale, à l'échelle de tous les quartiers situés au pied des versants du Pichincha.

Le tracé même des voies d'accès représente un facteur aggravant. En effet, ici comme ailleurs au pied des versants du Pichincha, les rues construites parallèlement à la pente créent des lignes d'écoulement préférentiel pouvant, en outre, accroître les vitesses des flux y transitant.

5.4 Les facteurs éducatifs de vulnérabilité

Savoir faire face à un phénomène naturel exceptionnel et éviter que celui-ci ne se transforme en accident, voire en catastrophe sont les deux principaux défis des politiques de protection des populations. L'accès à l'information, l'éducation et la préparation des populations sont des facteurs déterminants. A ce titre, il faut rappeler que 12% de la population du quartier ne sait ni lire, ni écrire et que 50% des habitants n'ont été qu'à l'école primaire (données INEC 1990, disponibles dans la base de donnée SUIM - DGP/DMQ). Les populations à faible niveau socio-économique de ces quartiers sont en général très vulnérables et peu aptes à affronter une crise comme celle du 31 mars 1997.

Les enquêtes montrent que les habitants n'ont reçu aucune information spécifique sur les risques. Sur 41 personnes interrogées, 4 seulement disent avoir été informées des dangers d'une possible éruption du Pichincha, et 2 nous ont évoqué les risques liés à une lave torrentielle. De manière plus globale, les habitants connaissent mal les mécanismes causant ce type de désastre (comment le leur reprocher vu le manque de données scientifiques), mais aussi le milieu dans lequel ils vivent (nous l'avons vu précédemment à propos du remblai).

Le comportement des habitants lors de l'événement montre également leur totale impréparation. Certains ont eu l'imprudence de sortir dans la rue lors du passage de la lave torrentielle, et ont été emportés et traînés. C'est en particulier ce qui est arrivé aux deux victimes. L'expérience peut être l'un des éléments importants de l'éducation des populations mais peu cependant ont le souvenir d'avoir vécu ce type d'événement. Parfois cité, l'accident de La Gasca est déjà ancien. Compte tenu de la récurrence de ce type d'accident (un tous les six ans sur les versants du Pichincha en 20 ans, le dernier ayant eu lieu en 1986), la mise en place d'un programme de simulation pourrait être envisagé.

5.5 Une vulnérabilité maintenue : une situation de risque inchangée

Avant l'accident, la population vivait un risque certes modéré mais produit d'aléas naturels effectifs (les crues, les coulées boueuses, les laves torrentielles) et d'une vulnérabilité sociale chaque jour accrue. L'événement du 31 mars 1997 a donc, pour les populations, concrétisé ce risque.

Les différents facteurs de vulnérabilité recensés précédemment demeurent. La dynamique urbaine n'a pas été contrariée, les maisons détruites ont été reconstruites à l'identique (Fig. 2, point 2), aucun programme d'équipement durable (tel un réseau d'évacuation des eaux) n'a été mis en place. De plus, l'organisation sociale et institutionnelle reste inchangée, alors que, comme nous l'avons vu, celle-ci peut empêcher une planification rigoureuse et une vision d'ensemble des problèmes du secteur. La Comuna peut donc toujours être considérée comme un espace à risque.

Les enquêtés dans leur grande majorité n'ont pas d'idées précises sur les actions à mener pour mettre en place, à l'échelle du quartier, une politique globale de protection. En effet, les différentes réponses obtenues lors des enquêtes ne montrent pas une ferme intention de lutter directement contre le risque.

A la question "Qu'allez-vous faire maintenant pour éviter que se reproduise une telle catastrophe ?" la réponse la plus souvent obtenue est "Rien" (29 sur 40). Parmi les autres réponses, on distingue trois types d'actions :

- individuelles (5 réponses) : 3 personnes souhaitent construire un mur de protection et 2 disent qu'elles vont déménager (encore peut-il s'agir d'une simple boutade),
- collectives au niveau du quartier (5 réponses) : les actions proposées (interdiction de déboiser ou de jeter des ordures dans la *quebrada*) permettraient certes de réduire la vulnérabilité mais elles n'éviteraient probablement pas l'occurrence d'un autre accident,
- collectives au niveau municipal (1 réponse) : on constate malheureusement qu'une seule personne propose spontanément d'en appeler aux autorités pour mettre en place un programme d'équipement. Preuve d'un certain fatalisme, les habitants n'attendent rien des autorités. Cette crise de confiance, nourrie par un sentiment d'abandon, est classique (Lagadec, 1994).

Les gens n'attendent rien des pouvoirs publics et ne sont pas prêts à engager une action collective pour obtenir de l'aide. Les autorités elles-mêmes n'ont rien fait pour réduire cette crise de confiance. Six mois après l'accident, rien n'a vraiment été fait pour mettre en place des mesures efficaces de prévention et de protection et ce malgré une large sensibilisation de la population et des pouvoirs publics à travers les médias ou à travers diverses conférences que nous avons eu l'occasion de donner.

On peut toutefois espérer que l'expérience acquise par les populations du quartier et les informations largement diffusées par voie de presse permettront aux habitants de changer leur comportement. Mais on peut en douter, l'événement de La Gasca (qui en son temps avait aussi fait beaucoup de bruit) n'aura pas empêché, 20 ans après, l'occurrence d'un phénomène similaire sur la *quebrada* voisine.

CONCLUSION

En guise de conclusion, un certain nombre de points doivent être mis en exergue. Les parties haute et moyenne du bassin versant de La Comunidad n'ont pas été anthropisées et sont parfaitement conservées pour l'instant. Les différents mouvements de terrain mis en évidence sur les secteurs critiques du bassin et ayant généré la coulée boueuse sont d'origine purement naturelle et n'ont aucun rapport avec une quelconque activité anthropique (déforestation, surpâturage ou canaux de drainage). Ainsi :

- Les fortes pluies tombées quelques heures avant le désastre ont joué un rôle fondamental dans le déclenchement de la coulée boueuse, non du fait des débits qui ont ainsi été générés, mais de la surcharge liée à l'imbibition des 50 à 70 premiers centimètres d'un sol déjà très humide.
- Les très fortes pentes observables au niveau même du cours et en particulier à proximité de la première zone de décrochement ont permis aux quelques dizaines de mètres cubes initialement mis en mouvement de prendre une vitesse importante et de tout emporter sur leur passage.
- La présence d'une grande quantité de matériel au niveau même du cours, liée aux glissements de terrain ayant eu lieu sur les flancs de la *quebrada*, ont permis au flux d'augmenter, d'une part son volume, et d'autre part sa viscosité et donc sa capacité érosive. Il en va de même pour l'ensemble du matériel formant la fond de la *quebrada*, qu'il s'agisse de pierres, de colluvions ou plus simplement de la végétation arrachée par le flux.

L'existence d'une zone pseudo-plane, au bas de la *quebrada*, a certainement permis de limiter les destructions au niveau de la zone urbanisée. En effet, la diminution de la pente a permis une importante perte de la compétence de la coulée et le dépôt des pierres de grande taille.

L'ensemble des *quebradas* comprises entre la Miraflores et la Rumipamba a été fortement touché par l'averse du 31 mars 1997. De fait, une trentaine de glissements de terrain d'importance ont eu lieu ce jour là sur ce secteur.

Toutefois, et comme très souvent dans ce cas, il aura fallu une conjonction de facteurs pour que ce qui n'était a priori qu'un événement hydro-climatique exceptionnel se transforme, sur la *quebrada* la Comuna, en un véritable désastre économique et humain.

S'il paraît encore aujourd'hui difficile de prévoir l'occurrence de tels phénomènes, le fait d'en connaître les mécanismes devrait permettre, à partir d'aménagements adéquats et bien pensés d'en limiter les conséquences. De plus, il semblerait qu'un certain nombre de *quebradas* soient plus menacées que d'autres vis à vis de ce type d'événements. Contrairement aux idées reçues, les grandes *quebradas* seraient, du fait d'une évolution géomorphologique plus poussée, moins susceptibles de voir leurs cours détruits par des laves torrentielles comme ce fut le cas à La Gasca (1975) ou à La Comuna (1997).

Si le phénomène naturel est, dans la plupart des cas, le détonateur de l'accident, il n'en explique que partiellement les conséquences. La vulnérabilité et les différents facteurs qui la caractérisent jouent toujours un rôle déterminant.

- L'occupation urbaine de terrains inadaptés (fortes pentes, instabilité des sols, zone de drainage, ...) et menacés par différents aléas naturels (pluies intenses, crues, coulées de boue, glissements de terrain, tremblements de terre, éruptions volcaniques, ...) constitue le facteur prépondérant de vulnérabilité des zones périurbaines de la ville de Quito. La diminution des risques passe donc, avant tout, par un contrôle strict de la dynamique urbaine et de l'utilisation des sols de ces secteurs.
- Les règles juridiques et institutionnelles conditionnent l'aménagement du quartier et son organisation sociale. De ce fait, et bien qu'étant des éléments abstraits, ils jouent un rôle dans la vulnérabilité en rendant difficile et complexe le contrôle du secteur (remblayage, urbanisation, mise en place d'infrastructures, ...).
- Les caractéristiques physiques et techniques de l'urbanisation ont été des facteurs aggravants, qu'il s'agisse du remblayage des *quebradas*, de la construction de rues parallèles à la pente ou du déboisement et des brûlis. Ces pratiques depuis longtemps connues, se sont malheureusement généralisées à l'échelle de la ville dans le cadre de la consolidation urbaine. Les *quebradas* ouvertes sont devenues rares, certains secteurs déboisés ont été durablement construits et aujourd'hui, la géométrie du tissu urbain n'est plus modifiable. Ces facteurs de vulnérabilité sont donc devenus permanents. Quant à la solidité du bâti elle n'est qu'un leurre face aux laves torrentielles. Répétons-le : c'est le lieu où l'on construit qui est fondamental.
- Les conditions socio-économiques forment un dernier groupe de facteurs. Elles expliquent en partie la dynamique d'occupation et se traduisent par l'insuffisante préparation d'une population, souvent désemparée quand survient l'accident.

Même si cela est souvent le cas, l'activité anthropique n'est pas toujours à l'origine des désastres dits "naturels" comme celui que nous venons d'étudier. Activité humaine ou pas, des événements du type de celui de La Comuna continueront à avoir lieu au pied du Pichincha. Sans politique durable et efficace de prévention et de protection, ces accidents pourront toujours se traduire, au niveau d'un quartier, par des destructions importantes voire la perte de vies humaines.

BIBLIOGRAPHIE

Ayabaca E., Cruz F., Gutiérrez C. (1996) : Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia de las principales estaciones pluviográficas de Quito. Rapport interne SISHILAD.

Ayabaca E., Perrin J.L. (1996) : Primer año de mediciones en la red hidrometeorológica de las Laderas del Pichincha. Rapport interne SISHILAD.

Besson L. (1996) : Les risques naturels en montagne. Traitement, prévention, surveillance. Artès - Publialp.

Cosandey C. (1990) : Recherches en hydrologie forestière et aménagement des bassins versants. Compte rendu de l'article de RH Swanson, PY Bernier et PD Woodward (IAHS, vol. 167, august 1987). Annales de géographie, mai 1990.

De Noni B., De Noni G., Fernandez de Castro M.A., Peltre P. (1988) : Drainage urbain et accidents climatiques à Quito (Equateur) : Analyse d'un cas récent de crue boueuse. Cahier des Sciences Humaines, n° 24 (2), ORSTOM.

Feininger T. (1976) : El flujo de escombros en La Gasca : Un informe científico. Boletín de la Sección Nacional de Ecuador, n° 5-6, IPGH.

Flageollet J.C. (1989) : Les mouvements de terrain et leur prévention. Masson, Coll. Géographie.

Fritsch J.M. (1995) : Occupation des sols et régimes hydrologiques : Les enseignements des bassins versants guyanais. Annales de géographie, avril 1995.

Janeau J.L., Gutiérrez C., Poulénard J., Viveros P., Cisneros F., Cueva C., Ayabaca E., Sierra A. (1997) : Primeros resultados de la area de edafología del Proyecto SISHILAD - Informe de actividades (mayo 1996 - mayo 1997). Rapport interne SISHILAD.

Lagadec P. (1994) : Apprendre à gérer les crises, Société vulnérable-Acteurs responsables. Editions d'organisation, Paris.

Metzger P., Peltre P. (1997) : Urban environment management and "natural" Hazards. The *quebradas* problematic in Quito (Ecuador). Les risques naturels et leur gestion en Equateur - Diversité des exemples, complémentarité des approches. Bul. de l'IFEA, tome 25, n° 3.

Peltre P. (1989) : Quebradas y riesgos naturales en Quito, periodo 1900-1988. Estudios de geografía, vol. 2.

Poulénard J. (1996) : Caractérisation et classification de sols dérivés de cendres volcaniques récentes (volcan Pichincha - Equateur). Mémoire de DEA, Institut National Agronomique Paris-Grignon.

Pourrut P., Leiva I. (1989) : Las lluvias de Quito : Características generales, beneficios y problemática. Estudios de geografía, vol. 2.

Risser V., Gallegos D. (1997) : Estudio de los movimientos de tierras en las Laderas del Pichincha - Informe del año 1996. Rapport interne SISHILAD.

Sierra A. (1997) : Metodología de análisis de los espacios de riesgo en el medio urbano : el ejemplo de las quebradas de Quito. Estudios de geografía, vol. 8.

Zevallos O. (1996) : Ocupación de laderas : Incremento del riesgo por degradación ambiental urbana en Quito, Ecuador. Ciudades en Riesgo : Degradación ambiental, riesgos urbanos y desastres. La Red, USAID.

Que soient remerciés ici l'ensemble du personnel du Programme SISHILAD et les institutions qui y sont associées : l'ORSTOM, l'EMAAP-Q et l'INAMHI.