

## LE GLISSEMENT DE TERRAIN ET LES INONDATIONS CATASTROPHIQUES DE LA JOSEFINA EN ÉQUATEUR

Éric Cadier \*, Othon Zevallos \*\*, Pedro Basabe \*\*\*

### Résumé

Le 29 mars 1993, s'est produit en Équateur un gigantesque glissement de terrain, d'un volume estimé à environ 20 millions de m<sup>3</sup>, qui a barré le rio Paute. Ce glissement a provoqué un nombre de morts estimé entre 35 et plus de 100. Entre le 29 mars et le 1<sup>er</sup> mai, un lac de près de 200 millions de m<sup>3</sup> s'est formé en amont du barrage constitué par le glissement, noyant une zone fertile et habitée de près de 1 000 ha et provoquant la destruction de routes, de voies de chemin de fer et de la centrale thermoélectrique régionale. Le 23 avril, l'eau a commencé à couler dans le canal d'évacuation creusé dans le barrage pour atténuer la violence de la rupture, motivant l'évacuation des 14 000 habitants de la vallée en aval et la préoccupation des responsables du grand barrage d'Amaluza, situé 60 km en aval, qui produit entre 60 et 75% de l'électricité consommée en Équateur. Le samedi 1<sup>er</sup> mai, le débit s'est accru de façon spectaculaire passant de quelques dizaines de m<sup>3</sup>/s à près de 10 000 m<sup>3</sup>/s, dépassant la plupart des prévisions des experts. Cet écoulement formidable a tout balayé sur son passage : blocs de plusieurs m<sup>3</sup>, routes, maisons, épargnant de justesse le barrage d'Amaluza au terme d'un suspense éprouvant. Après avoir décrit quelques aspects géotechniques du glissement de terrain et hydrauliques de la rupture du barrage et de la propagation de l'onde de crue, nous comparerons les différentes méthodes utilisées pour prévoir le temps de rupture et le débit de pointe de la crue. Trois méthodes ont été utilisées : l'utilisation d'abaques empiriques, la modélisation physique et la modélisation numérique. Ces prévisions, vitales pour tout ce qui est en aval sont pour le moins délicates. Nous avons constaté de fortes divergences dans les prévisions des experts. On présente enfin quelques aspects de la gestion de cette crise, de la reconstruction qui l'a suivie, ainsi que de la prévention des désastres naturels. La rupture du barrage de la Josefina est un événement de première grandeur, dont la plupart des paramètres sont connus. Elle doit être utilisée pour faire progresser les connaissances et diminuer l'imprécision des méthodes de prévision en matière de rupture des très grandes digues.

**Mots-clés :** *Glissement de terrain ; barrage ; inondations ; propagation de crues ; rupture de barrage ; modélisation physique, mathématique et prévisions ; gestion de crise.*

---

\* Adresse postale : Mission ORSTOM Apartado 1711-6596 Quito ÉQUATEUR. Mail : cadier@orstom.ecx.ec; Tel-fax d'INSEQ : (5932)468.327; fax de l'ORSTOM 569.396.

\*\* Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Hidráulica, Isabel La Católica s/n, Quito, Ecuador. Tel (5932) 507.144; 563.077.

\*\*\* Proyecto PRECUPA, Casilla 01-01-1980, Cuenca, Ecuador. Tel (5932) (7) 880.418; 800.463. Fax: 890.900.

## EL DESLIZAMIENTO Y LAS INUNDACIONES CATASTRÓFICAS DE LA JOSEFINA EN ECUADOR

### Resumen

El 29 de marzo de 1993 se produjo en el Ecuador un gigantesco deslizamiento con un volumen estimado de 20 millones de  $m^3$  que represó el río Paute. El deslizamiento provocó un número de muertos estimado entre 35 y más de 100. Entre el 29 de marzo y el 1 de mayo se formó un lago de cerca de 200 millones de  $m^3$  aguas arriba del deslizamiento que inundó una zona fértil y poblada de casi 1 000 ha, con la destrucción de carreteras, ferrocarriles, y de la central termoeléctrica de la región. El 23 de abril, el agua empezó a salir por el canal de desagüe excavado en la masa deslizada a fin de mitigar efectos mayores. Sin embargo esto motivó la evacuación de los 14 000 habitantes del valle aguas abajo y la preocupación de los responsables de la gran presa de Amaluza ubicada a 60 km aguas abajo, que produce entre el 60 y 75% de la energía eléctrica consumida por el Ecuador. El sábado 1 de mayo, el caudal aumentó de forma espectacular pasando de algunas decenas de  $m^3/s$  hasta cerca de 10 000  $m^3/s$ , sobrepasando la mayoría de las previsiones de los expertos. Este enorme flujo arrasó con todo lo que estaba a su alcance: bloques de varios  $m^3$ , carreteras, casas, puentes, etc., salvándose apenas la presa de Amaluza después de un suspense estremecedor. El trabajo presenta algunos de los aspectos geotécnicos e hidráulicos del deslizamiento de la Josefina, la rotura de la presa y la propagación de la onda de crecida. Se comparan además los diversos métodos utilizados para predecir el tiempo de rotura y el caudal de pico de las crecidas. Con tal objeto se utilizaron tres procedimientos: la utilización de ábacos empíricos, la modelización física y la modelización numérica. Estas predicciones, de vital importancia para todo lo ubicado aguas abajo, son muy delicadas. Se constataron fuertes divergencias entre las diversas previsiones de los expertos. Finalmente se analizan algunos aspectos de la situación de crisis, así como las acciones de reconstrucción y de prevención de desastres naturales. La rotura de la presa de la Josefina es un evento de primera magnitud, donde la mayor parte de los parámetros eran conocidos. Estas experiencias deben ser utilizadas para mejorar los conocimientos del fenómeno y disminuir la imprecisión de los métodos de previsión de rotura de grandes presas.

**Palabras claves:** *Deslizamiento; represamiento; inundaciones; propagación de crecidas; rotura de presa; modelización física, matemática y previsiones; gestión de crisis.*

## THE LANDSLIDE AND CATASTROPHIC FLOODING OF THE JOSEFINA IN ECUADOR

### Abstract

On the 29th of March 1993, a large landslide with an estimated volume of 20 million  $m^3$ , took place in Ecuador, damming the Paute river. This landslide caused a number of deaths estimated between 35 and more of 100. Between the 29<sup>th</sup> of March and the 1<sup>st</sup> of May, a reservoir with a volume of near 200 million  $m^3$  formed upstream of the blockage, flooding almost 1 000 hectares of fertile and occupied land and destroying roads, railways and a regional thermoelectric plant. On the 23<sup>rd</sup> of April the water started to flow out of the dam through a channel which had been excavated in the dam in order to reduce the further damage. This in turn prompted the evacuation of the 14,000 habitants of the valley downstream, and caused great anxiety among those responsible for the Amaluza dam, situated 60 Km downstream, which produces between the 60 and the 75% of all the electric energy consumed in Ecuador. On Saturday May 1, the river's discharge rose dramatically, nearing the 10,000  $m^3/s$  mark, and exceeding the predictions of most experts. This large flow carried large rocks and destroyed everything in its path like roads, houses, bridges, etc. only leaving standing the Amaluza dam after moments of frightening suspense. This work describes some of the geotechnical and hydraulical aspects of the Josefina landslide, the rupture of the dam and the routing of the flood wave. The various methods used to predict the rupture time and peak discharge of the flood are also compared. Three methods were employed: empirical procedures, scale modelling and numerical modelling. These predictions were of vital importance to everything situated downstream. There were strong differences between the various predictions made by the experts. In addition, some aspects of the crisis management of the reconstruction and of the natural disaster prevention are considered. The rupture of the Josefina dam is an event of first magnitude where most of the parameters were known. The experience gained must be used to improve the knowledge of this kind of events and to reduce the uncertainty of the prediction methods of large dam failure.

**Key Words:** *Landslide; damming; flooding; flood routing; dam breaking; scale, numerical modelling and prediction; crisis management.*

## INTRODUCTION

Le 29 mars 1993 s'est produit au sud de l'Équateur un glissement de terrain d'un volume estimé à environ 20 millions de m<sup>3</sup> qui a barré le rio Paute par une digue de 100 m de hauteur, 600 m de largeur et 1,1 km de longueur, formant un lac de près de 200 millions de m<sup>3</sup> qui a mis un mois à se remplir. Sa rupture a ensuite provoqué des dégâts importants jusqu'à 100 km en aval. Les dommages directs sont estimés à 147 millions de dollars (CREA, 1993), auxquels il faut ajouter les atteintes à l'environnement, aux voies de communication de l'ensemble de la région et la réduction de la durée de vie du barrage de l'Amaluza. Au-delà de ses lourdes conséquences locales sur le plan humain, économique et social, cette catastrophe a bien failli plonger tout le pays dans une très grave crise énergétique en mettant en péril le barrage d'Amaluza qui fournit près des trois quarts de l'électricité du pays.

Nous décrirons tout d'abord les principales phases de cette catastrophe (Cadier *et al.*, 1994 ; Plaza & Zevallos, 1994 ; Canuti *et al.*, 1994) :

- le glissement de terrain de la Josefina
- le remplissage du lac en amont du barrage formé par le glissement
- le creusement du canal destiné à accélérer et à atténuer la violence de la rupture du barrage formé par le glissement
- la rupture du barrage formé par le glissement de la Josefina
- la propagation de l'onde de crue dans la vallée située en aval, jusqu'au barrage hydro-électrique d'Amaluza

Nous étudierons ensuite plus en détail le scénario de la rupture et comparerons la précision et l'efficacité des différentes méthodes et modèles de prévision de ruptures de digues en terre utilisés.

Nous analyserons enfin quelques aspects de la gestion de l'ensemble de la crise, avant et après la rupture du barrage de la Josefina.

La plupart des données que nous avons utilisées ou citées proviennent de mesures sur le terrain, de laboratoire et de calculs effectués par l'INECEL (Institut Équatorien d'Électrification). Ces mesures concernent les courbes hauteur-volume des différentes retenues, les niveaux de ces dernières au cours des phases de remplissage et de rupture ainsi que les hydrogrammes en différents points du rio Paute, lors de la rupture.

### 1. LE GLISSEMENT DE TERRAIN DE LA JOSEFINA : CAUSES, DYNAMIQUE ET COMPOSITION

Le 29 mars à 20h 30 un pan entier d'une montagne appelée "*Parquiloma*" (connue localement sous le nom de "*Cerro Tamuga*") et située au nord du rio Paute à une vingtaine de km en aval de la ville de Cuenca, s'est effondré, tuant au moins 35 personnes et détruisant une route vitale et unique qui permettait de relier les villes de Paute, de Gualaceo et le barrage de l'Amaluza, à Cuenca et au reste du pays. Les premières estimations du volume de ce glissement ont été très variables : entre 20 (Plaza & Eguez, 1993), 36 (Aguilera & Romo, 1993) et 44 millions de m<sup>3</sup> (James, 1993). Des calculs plus précis effectués à partir d'une restitution photogrammétrique ont fourni une estimation de 19 millions de m<sup>3</sup> (Sevilla, 1993 ; 1994). Ce glissement, présentant une pente de 25 à 45% et couvrant une surface de 40 ha, a barré le rio

Paute en constituant une digue de 100 m de hauteur, 600 m de largeur et 1,1 km de longueur, derrière laquelle s'est ensuite formé un lac de 200 millions de m<sup>3</sup>. Les figures 1 et 2 permettent de situer ce gigantesque éboulement.

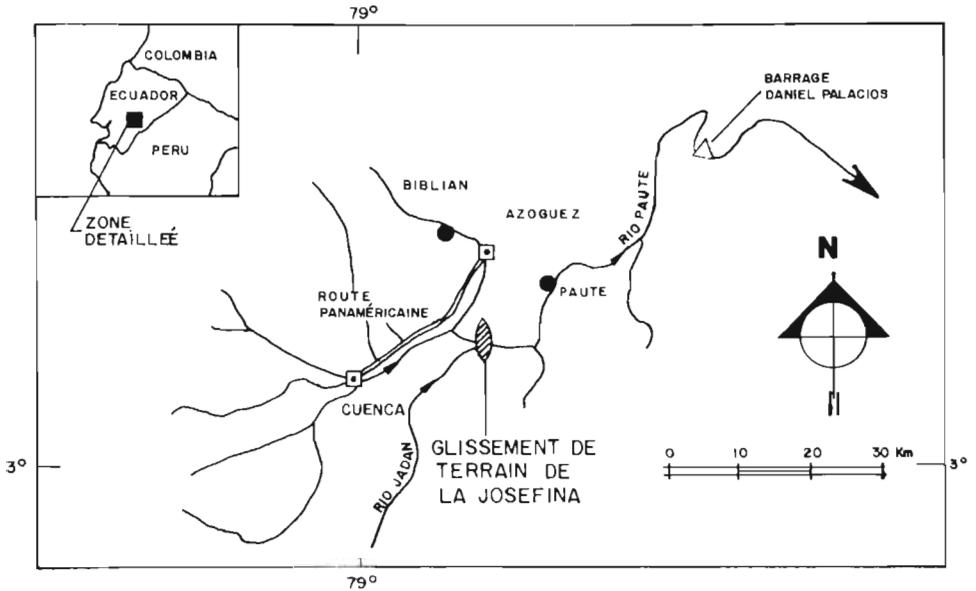


Fig. 1 - Carte de situation.



Fig. 2 - Vue du glissement et du lac depuis l'amont, un jour avant la rupture (photo C. Menendez). (A) Tête du glissement ; (B) Direction du mouvement ; (C) Accumulation des matériaux ayant glissé ; (D) Canal creusé dans la partie la plus basse du glissement ; (E) Lac accumulé en amont du glissement.

Cette zone fait partie du bord occidental d'un bassin sédimentaire interandin qui est composé d'un mélange de roches sédimentaires, métamorphiques et parfois volcaniques du néogène (Plaza & Eguez, 1993). Il y aurait eu en réalité deux glissements successifs. Le premier, constitué de roches relativement peu disloquées, a été recouvert quelques instants plus tard par un second glissement ou éboulement rocheux, dans lequel, au contraire, toutes les couches du sol ont été mélangées, des blocs rocheux disloqués de toute taille étant enserrés dans du matériel fin et pulvérulent. Ceci a été confirmé par une étude sismique du barrage et a pu être constaté dans les coupes du glissement postérieures à la rupture. La vitesse du glissement a dû être grande, puisque des morceaux de la route située rive gauche, du côté du glissement, ont été projetés à plusieurs centaines de mètres sur l'autre rive, à une altitude plus élevée, attestant d'une forte énergie cinétique. Selon Zevallos (1994), la densité moyenne des matériaux du glissement a été estimée à 2,76, avec une porosité de 15%, un angle de friction de 45°, une cohésion de 0,5T/m<sup>2</sup> et un D50% de 100 mm.

### 1. 1. Les causes du glissement

La convergence et la superposition de plusieurs facteurs semblent avoir déclenché ce mouvement de terrain. Tout d'abord, il se situe dans une zone tectonique avec des intrusions locales propices à ce genre d'accident. Un glissement plus ancien a d'ailleurs été mis en évidence (Sevilla, 1994). Des plans de faille, très inclinés et dirigés vers la vallée ont pu favoriser l'éboulement. Les pluies ont été, le mois précédant l'événement, deux fois plus élevées que la normale (Acosta & Salazar, 1993). On a fait état de crevasses par où s'engouffrait l'eau, en amont du glissement, mais on peut aussi supposer que des carrières situées dans sa partie inférieure et dans lesquelles de l'eau s'écoulait ont contribué à le fragiliser à la base. En tout état de cause les origines du déclenchement du phénomène sont probablement multiples et restent un sujet très polémique. De plus, peu d'informations sont disponibles sur la situation antérieure à ce glissement dans la mesure où le secteur n'était pas surveillé.

### 2. LE REMPLISSAGE DE LA RETENUE : L'INONDATION DES ZONES EN AMONT DU GLISSEMENT DE TERRAIN

L'eau s'est accumulée derrière le barrage formé par le glissement de terrain de la Josefina. Un lac de 200 millions de m<sup>3</sup> a mis plus d'un mois à se remplir.

Les dégâts ont été considérables. Entre 800 (INECEL, 1993) et 1000 hectares (Zeas, 1994) de fond de vallée fertile et relativement peuplée ont été inexorablement noyés ainsi que d'importants axes routiers, une voie de chemin de fer, une usine thermoélectrique régionale et une partie de la banlieue de la ville de Cuenca. On a pu observer de nombreux glissements induits provoqués par la saturation des talus plongeant dans les eaux du lac, tout d'abord lors de la montée des eaux, mais surtout au moment de la vidange rapide de la retenue au cours de laquelle les pressions hydrostatiques dans le sol n'ont pas eu le temps de se dissiper.

Durant ce mois, le débit moyen de la rivière a été de 71 m<sup>3</sup>/s. Les valeurs maximales et minimales enregistrées ont été respectivement de 186 et de 25,6 m<sup>3</sup>/s (Zevallos, 1994). Par ailleurs, les valeurs maximales à retenir en liaison avec la retenue sont les suivantes :

Cote de l'eau : 2 362,3 m

Profondeur maximum de la retenue : 77 m

Volume de la retenue : 200 millions de m<sup>3</sup>

Longueur du lac : 9 km

Surface inondée : 800 à 1 000 ha

### 2. 1. Les difficultés de prévision de la montée des eaux du lac

Les premières estimations du temps de remplissage de la retenue ont été de mauvaise qualité. Cela est lié d'une part à une sur-évaluation des débits entrants, estimés initialement à 100 m<sup>3</sup>/s, alors qu'une baisse des précipitations au cours du remplissage a induit une diminution des débits. D'autre part, le volume du réservoir créé par le glissement a été sous-estimé.

Cette mauvaise estimation initiale, qui aurait pu sans doute être corrigée, a eu pour conséquence :

- a) de suspendre trop tôt le creusement du canal, dont le radier aurait pu être encore abaissé, ce qui aurait pu éviter de noyer une bonne centaine d'hectares et permis de réduire un peu plus le débit de pointe au moment de la rupture.
- b) d'évacuer près de 15 jours trop tôt les populations habitant en aval, ce qui a entraîné une certaine lassitude et une démobilisation au moment fatidique de la rupture du barrage.

Nous reviendrons à la fin de cet article sur plusieurs aspects de la gestion de cette crise.

### 3. CREUSEMENT DU CANAL D'ÉVACUATION D'EAU : SITE CHOISI ET TECHNIQUES EMPLOYÉES

Afin de diminuer les effets de l'inondation et de la rupture du barrage, l'armée a creusé un canal d'écoulement de 18 m de profondeur, de 6 m de largeur à sa base et de 407 m de longueur, dont la section transversale a été reportée sur la figure 3. On avait, au préalable, analysé et rejeté d'autres solutions peu viables comme un tunnel, le pompage, le dynamitage et la stabilisation et/ou la transformation du glissement de terrain en un barrage permanent.

Jusqu'à 21 engins de terrassement ont enlevé 165 000 m<sup>3</sup> de matériaux en 13 jours. Le rabaissement de la crête de près de 20 m a évité l'inondation de 250 ha supplémentaires en amont. Si l'on n'avait pas creusé ce canal, le volume de la retenue aurait atteint 330 millions de m<sup>3</sup> et le débit, au moment de la rupture, aurait été proche de 30 000 m<sup>3</sup>/s avec des conséquences encore plus graves (Zevallos, 1993).

On ne peut que regretter l'arrêt prématuré de ces travaux le 14 avril, provoqué par la sous-évaluation du temps de remplissage, mais aussi par la crainte, qui s'est révélée à posteriori peu justifiée, de voir ce barrage rompre sur plus d'un kilomètre de longueur sous l'effet d'un phénomène de renard hydraulique. De plus, les techniciens étaient pressés par le temps et plusieurs machines utilisées de manière trop intensive ont été détériorées. Les cinq derniers mètres du canal ont ainsi été creusés avec un talus beaucoup trop raide, dans des conditions très dangereuses.

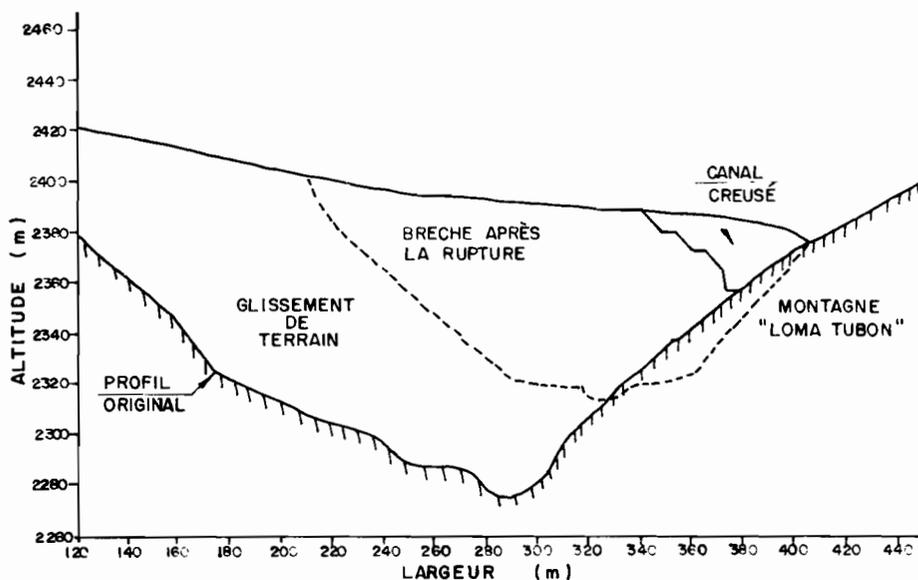


Fig. 3 - Section transversale du canal d'évacuation (adapté de Aguilera & Romo, 1993).

Enfin, quand l'eau a commencé à s'écouler, le canal d'évacuation a été très souvent obstrué par des éboulements développés dans ses parois à la fois trop raides et constituées de matériaux non consolidés. L'eau, par son action érosive, provoquait ainsi l'obstruction du canal qu'elle était censée creuser. En conséquence, ces éboulements ont retardé de cinq ou six jours le moment de la rupture et augmenté le niveau du lac de quatre mètres supplémentaires qui n'avaient pas été prévus.

Les dimensions finales du barrage et du canal (Fig. 2) sont les suivantes :

Cote du fond de la retenue : 2 280 m

Cote du radier du canal : 2 356,6 m

Profondeur de la retenue au point de déversement : 76,6 m

Longueur du canal : 407 m

Pente du talus de la partie supérieure : 1V:4H

Pente du talus des cinq derniers mètres : entre 100 et 200%

#### 4. LE PROCESSUS DE RUPTURE DU BARRAGE DE LA JOSEFINA

À l'inverse du remplissage, le processus de rupture est difficile à prévoir. On ne sait pas exactement quand il se déclencherà ni le temps que mettra la digue à être emportée. C'est ce temps qui conditionnera le débit maximum et donc l'importance des inondations et des dégâts en aval. Dans le cas de la Josefina, c'était le plus mal connu des facteurs de risques et aussi le plus grand puisque l'existence même de la ville de Paute et du barrage de l'Amaluza était en jeu. Deux facteurs peuvent permettre de diminuer ce débit maximum :

- Il faut que le volume à évacuer soit le plus faible possible, donc que la rupture du barrage ait lieu le plus tôt possible, d'où l'intérêt du creusement du canal.
- Quand le processus exponentiel de rupture est amorcé, il faut, au contraire, le ralentir le plus possible. Ceci n'a pas pu être réalisé lors de la rupture de la Josefina.

#### 4. 1. La phase d'érosion régressive dans le canal

L'eau a commencé à s'écouler par le canal le 23 avril. Les experts prévoyaient une durée de un à trois jours pour que le seuil d'érosion régressive remonte les 407 m du canal, atteigne son extrémité amont et provoque la rupture du barrage. Il en aura fallu sept au cours desquels le canal aura été sans cesse obstrué par les éboulements qui, en amont, ont fait remonter le niveau du lac de quatre mètres. Le désarroi des responsables et des populations était tel, que la veille de la rupture, le Comité de gestion de crise a suspendu provisoirement l'alerte rouge, permettant ainsi aux populations d'accéder aux zones interdites situées dans la vallée en aval.

À posteriori, en analysant les causes du retard du processus érosif dans le canal, on peut tirer un certain nombre d'enseignements :

- a) Les pentes latérales près du fond du canal étaient trop fortes et le fond du canal trop étroit, d'où son obstruction répétée par des éboulements de terrain.
- b) La pente longitudinale du canal était trop faible, et par conséquent, en amont du seuil d'érosion régressive, l'eau n'avait pas la capacité d'enlever les plus grands blocs des éboulements.
- c) Il aurait été souhaitable d'installer dès le début un système permettant de traverser le canal (petit téléphérique ou bateau sur le lac), facilitant le déblaiement des éboulements obstruant le canal.

#### 4. 2. La rupture du barrage

Cette rupture a eu lieu, dans un contexte de démobilisation générale, le samedi 1<sup>er</sup> mai au matin, c'est-à-dire près d'une semaine après la date prévue. Une fois amorcé, le processus de rupture a été plus rapide que ne l'avaient supposé la plupart des experts. Le 30 avril, à 17h30, les militaires avaient tiré des missiles anti-char, pour tenter, sans succès, de fissurer un gros bloc qui obstruait le canal. Le 1<sup>er</sup> mai au matin, à 5h30 le débit est estimé à environ 200 m<sup>3</sup>/s. Puis tout va très vite. Le processus de rupture est amorcé. À 7h15, les mesures limnimétriques indiquent que le niveau du lac commence à baisser. À 8h, la télévision montre des images impressionnantes des écoulements et de l'érosion du barrage. Entre 9h et 10h, on observe une baisse du niveau du lac de plus de 4 mètres, ce qui correspond à un volume évacué de 30 millions de m<sup>3</sup> et donc à un débit moyen proche de 9 000 m<sup>3</sup>/s. Les estimations du débit maximum, qui ont eu lieu vers 9h 40, oscillent entre 9 000 m<sup>3</sup>/s et 14 000 m<sup>3</sup>/s et celle de la vitesse maximum immédiatement en aval du lieu de rupture entre 15 et 20 m/s.

Il aura fallu 24 heures supplémentaires pour que l'écoulement atteigne un régime d'équilibre. Le volume total écoulé a été de 175 millions de m<sup>3</sup> dont 75 millions entre 8h et

11h le 1<sup>er</sup> mai. Comme l'avaient prévu les modèles, un lac résiduel de 40 mètres de profondeur, à la cote de 2 322,4 m, et d'un volume approximatif de 20 millions de m<sup>3</sup>, a subsisté en amont.

## 5. LA PROPAGATION DE LA CRUE EN AVAL

La pointe de crue a atteint la ville de Paute en une heure et demie et l'Amaluza en trois heures, comme prévu. Dans les biefs inondés, les hauteurs d'eau étaient de l'ordre de 6 et 8 mètres dans les parties les plus larges, de 12 à 25 ou peut-être 30 mètres dans les secteurs plus encaissés. On a par exemple relevé un niveau maximum de 24 mètres à la station hydrométrique de Paute A.J. Dudas (ou Chalacay) (INECEL, 1993), située à mi-chemin entre La Josefina et l'Amaluza, dans une gorge étroite. Des routes, des ponts et des maisons ont été détruits jusqu'en Amazonie, à 160 kilomètres en aval du barrage de la Josefina, bien au-delà du barrage d'Amaluza.

La propagation de la crue et les zones inondées dans les 60 km de vallée séparant la Josefina du barrage d'Amaluza ont été correctement prévues par des modèles comme le modèle de DAMBRK (voir plus loin). L'inondation s'étant produite de jour, il n'y a pas eu de victimes, l'évacuation des habitants ayant pu être organisée normalement. Cependant, la moitié de la ville de Paute a été détruite, des kilomètres de routes ont été emportés et de nombreux champs ont été rendus stériles. La morphologie du fond des vallées a été profondément modifiée par des dépôts alluviaux pouvant atteindre plusieurs mètres. Un grand nombre de glissements de terrain "secondaires" ou "induits" ont eu lieu lors de la crue, la rivière déséquilibrant des pans entiers de montagne.

Le barrage d'Amaluza avait été heureusement vidé au maximum par l'INECEL, qui avait baissé son niveau de 31 m, ce qui lui permettait de stocker un volume de crue de 51 millions de m<sup>3</sup>. Le débit maximum entrant dans la retenue n'était plus que de 8 000 (Aguilera & Romo, 1993 ; Zeas, 1993) à 10 000 m<sup>3</sup>/s (Zeas, 1993). L'usine hydroélectrique avait été arrêtée et toutes ses entrées avaient été fermées et calfeutrées en prévision d'une submersion. Après laminage et stockage par la retenue, on a mesuré un débit déversé maximum de près de 5 000 m<sup>3</sup>/s (Cepeda, 1995), alors que l'évacuateur de crue était dimensionné pour 7 700 m<sup>3</sup>/s. Des simulations ont montré que, si l'on n'avait pas creusé le canal d'évacuation, le débit de pointe aurait été de 30 000 m<sup>3</sup>/s, ce qui aurait probablement provoqué la destruction du barrage d'Amaluza.

Au barrage, deux turbines ont été remises en marche trente heures après la crue, de manière prématurée cependant, dans la mesure où la concentration de sédiments en suspension était encore élevée. Notons aussi la bonne qualité de l'évacuateur de crue qui a supporté sans dommage un écoulement tout à fait exceptionnel.

Un volume de sédiments estimé à 1,2 millions de m<sup>3</sup> (Jerves, 1995) a néanmoins pénétré dans le barrage d'Amaluza au cours de cette crue. Si l'on considère les sédiments encore mobilisables le long des 60 km de lit, on peut supposer que la vie utile de ce barrage a été notablement réduite.

En fin de compte, près de 175 millions de m<sup>3</sup> ont été évacués, le niveau d'eau a diminué de 40 m, en laissant une retenue résiduelle de 20 millions de m<sup>3</sup> (postérieurement, le niveau de cette retenue a été baissé artificiellement de 7 mètres supplémentaires). Il y a eu un nombre

de morts estimés entre 35 (Cruz, 1993), 72 (Chamot *et al.*, 1993) et même 150 (Zeas, 1994), tous provoqués directement par le glissement de terrain, sur lequel on dénombrait 22 petites maisons. Si la rupture s'était produite de nuit, il y aurait probablement eu d'autres victimes parmi les habitants de la vallée située en aval, qui n'auraient pas pu s'échapper. Cruz (1993) estime les dégâts directs à 150 millions de dollars US, 35 morts, 6 420 sinistrés, 40 km de route revêtue détruits, 1 800 ha de terres stérilisées, sans compter les atteintes à l'environnement et la réduction probable de la vie utile du barrage d'Amaluza.

## 6. COMPARAISON DES DIVERSES MÉTHODES DE PRÉVISION DE RUPTURE DE BARRAGES EN TERRE

### 6. 1. Généralités

La rupture des barrages naturels dépend de la taille et de la géométrie du glissement des matériaux qui le composent, du débit de la rivière et de la présence de contrôles rocheux. La majorité des glissements a une durée de vie très courte. Parmi les 63 cas étudiés par Schuster & Costa (1986), 22% ont été emportés en moins d'une journée et la moitié a lâché dans les 10 jours suivant le glissement.

La principale cause de rupture est le débordement (*overtopping*). Dans ces cas-là, la rupture est presque toujours très rapide et elle produit de fortes crues et inondations. Plus le débit de la rivière est important, la taille du barrage faible et le matériau fin, plus la rupture sera violente. Le début de la formation de la brèche de rupture se produit quand l'érosion régressive du talus, partant de l'aval, est remontée jusqu'à la partie amont du barrage.

Les barrages formés par des glissements sont en général plus massifs que ceux construits par l'homme. Ils sont d'autant plus stables que le rapport entre leur largeur à la base et leur hauteur est élevé (Schuster & Costa, 1986). Ils peuvent aussi devenir permanents lorsque le débit est trop faible pour éroder les matériaux du glissement ou quand il existe des contrôles géologiques. La caractéristique la plus importante qui empêche la rupture est la résistance à l'érosion des matériaux, par cuirassement.

### 6. 2. Étude bibliographique

Les recherches existantes, en majorité, envisagent le problème de façon mathématique en admettant l'hypothèse simplificatrice d'une rupture instantanée ou alors elles ne tiennent pas compte du processus d'érosion du barrage. Chen & Ambruster (1980), Hunt (1984), Schocklitsh (*US corps of eng.*, 1960) et plus récemment Gozali & Hunt (1993) ont fait d'importantes recherches expérimentales sur la rupture instantanée et graduelle de barrages. Cependant, dans toutes ces études, le flux produit par la rupture du barrage est simulé par une opération de vannes et non comme le résultat d'un processus d'érosion.

Macdonald & Langridge-Mompolis (1984), Hagen (1982), Schuster & Costa (1986) et Froelich (1987), se sont appuyés sur des cas historiques dans le monde et ont proposé des équations et des abaques empiriques pour estimer le débit de crue produit par la rupture d'un barrage. Ces méthodes, certes utiles, présentent les inconvénients suivants :

- 1) elles n'indiquent pas si le barrage rompra ou non ;
- 2) elles ne tiennent pas compte des caractéristiques des matériaux qui composent le barrage ;

3) hormis la hauteur, elles ne prennent pas en compte la taille du barrage ;

4) elles ne donnent pas d'informations sur le temps et l'hydrogramme de rupture.

Les modèles disponibles ou commercialisés de rupture de barrages, comme celui de BREACH et celui de DAMBRK développés par Fread (1984), sont fondés sur de fortes simplifications du processus d'érosion du barrage ; leurs résultats ne sont donc pas toujours très fiables.

Les modèles physiques de rupture de barrages ont été appliqués à des cas particuliers comme celui du barrage de Sarras (Escande, 1961), ou celui du glissement de Mayunmarca en 1974 au Pérou (Chang & Alva, 1991).

### 6. 3. Les prévisions effectuées au cours de la crise

Les études de rupture du barrage de la Josefina ont eu pour objectif de prévoir ses effets dans la vallée en aval et d'élaborer des scénarios permettant de gérer le projet hydroélectrique d'Amaluza. La prévision du débit de pointe est absolument vitale pour la sécurité de tout ce qui est en aval.

Plusieurs groupes de travail indépendants ont été constitués. Malgré la divergence des études et des résultats, tous sont tombés d'accord sur la sévérité des conséquences de la rupture du barrage. Un groupe a cependant soutenu que le barrage ne romprait pas, ou alors que la rupture se produirait sur une période comprise entre 3 et 15 jours (Penille & Jacome, 1993).

Les difficultés rencontrées pour effectuer des prévisions fiables soulignent l'intérêt de l'information rassemblée ci-dessous afin d'essayer d'améliorer la connaissance et les méthodes de prévision de ce type de rupture.

#### 6. 3. 1. Les méthodes empiriques

En utilisant l'abaque proposé par Schuster & Costa (1986), qui permet de comparer le cas particulier de la Josefina à l'ensemble des catastrophes similaires connues, on trouve, pour un barrage de 83 mètres de hauteur et un volume de 200 millions de m<sup>3</sup>, un débit maximum de 10 000 m<sup>3</sup>/s, ce qui est proche de la réalité.

En revanche, la formule de Hagen (1982) donne un débit de pointe de 28 200 m<sup>3</sup>/s, donc nettement surestimé.

#### 6. 3. 2. Modélisation numérique

Natale (1993) de l'Université de Pavie, en collaboration avec l'Université de Cuenca, a utilisé son modèle d'érosion fondé sur les équations de continuité de l'érosion et des sédiments. Il a retenu cinq hypothèses et a finalement considéré que la rupture en 72 heures constituerait le cas le plus critique. Durant cette période 177 millions de m<sup>3</sup> devaient s'écouler. Selon cet auteur, le débit de pointe devait atteindre un peu moins de 2 000 m<sup>3</sup>/s, 22 heures après le début de l'écoulement.

James *et al.* (1993b), de l'*US Corps of Ing.*, en collaboration avec l'Université de Cuenca, ont testé le modèle de Natale à partir d'une couche de 25 m d'épaisseur (D50% = 10 cm, n = 10%), située sur une autre couche de granulométrie plus grossière (D50% = 70 cm, n = 50%).

La cote initiale était de 2 358 m et le débit de la rivière de 100 m<sup>3</sup>/s. Selon les auteurs, le débit maximum devait être de l'ordre de 2 700 m<sup>3</sup>/s, 26 heures après le début du passage de l'eau.

Avec le modèle de DAMBRK on est parti de l'hypothèse d'un temps de rupture de 15 heures, d'une brèche finale de 100 mètres, avec une pente latérale de 1:1. Le débit résultant, dans le cas le plus défavorable, a été de près de 5 500 m<sup>3</sup>/s. On a aussi utilisé ce modèle pour prévoir les niveaux maxima d'eau en aval le long de la rivière. Pour cela la rivière a été divisée en 34 biefs. Par mesure de sécurité, ont été adoptées, pour le plan d'évacuation des populations, les conditions les plus pessimistes, avec des niveaux de submersion compris entre 7,8 et 19,3 mètres (Aguilera & Romo, 1993).

Zevallos *et al.* (1993) de l'EPN, en collaboration avec l'INECEL, ont utilisé le modèle BREACH pour simuler la rupture du barrage. Ils ont adopté les conditions suivantes : érosion de la crête de 12 à 25 mètres, débit initial de la rivière 80 m<sup>3</sup>/s, largeur maximum de brèche de 50 m ; pente de la rivière 0,017 et coefficient de rugosité de Manning du canal de 0,05.

Pour la propagation de la crue dans le lit, ils ont utilisé le modèle DAMBRK avec sa version d'onde dynamique, qui utilise l'équation de mouvement la plus complète. Pour cela on a divisé la rivière en 30 biefs. Pour le laminage de la crue dans la retenue d'Amaluza on a utilisé le modèle HIDRO1 développé à l'EPN (*Escuela Politécnica Nacional de Quito*). Celui-ci utilise la méthode du Puls modifiée.

Les résultats de ces simulations ont été les suivants : débit maximum au barrage de la Josefina : de 7 100 à 16 500 m<sup>3</sup>/s ; débit maximum entrant dans le barrage d'Amaluza : de 5 500 à 12 000 m<sup>3</sup>/s ; débit maximum déversé au barrage d'Amaluza de 0 à 3 033 m<sup>3</sup>/s ; profondeurs maximums des zones inondées de 8 à 16 m ; temps de montée : de 6 à 8 heures et temps de transfert de la crue à la ville de Paute et à Amaluza respectivement de 1,5 et 3 heures. La figure 4 reproduit les hydrogrammes observés en plusieurs sites.

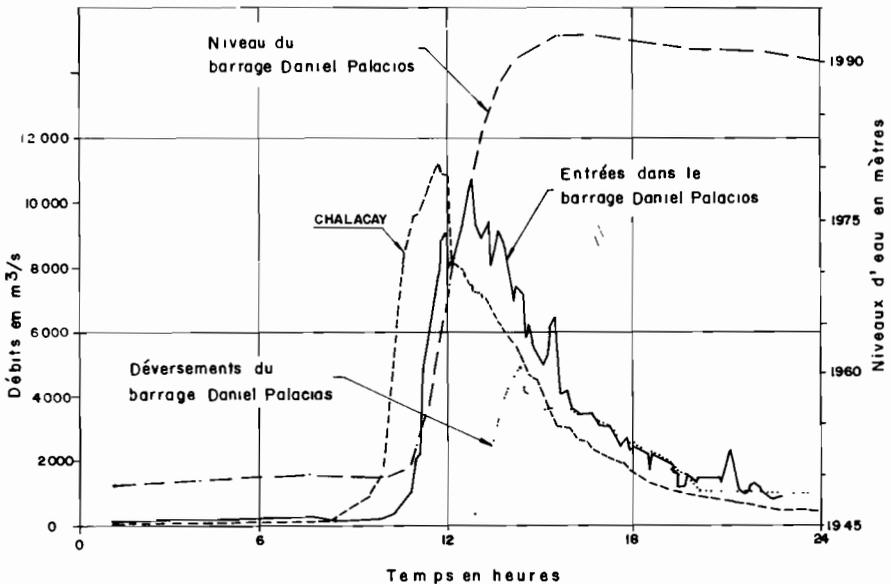


Fig. 4 - Hydrogramme de rupture en plusieurs sites.

6. 3. 3. *Modélisation physique*

Pour avoir une meilleure précision sur la rupture du barrage, on a construit un modèle sans distorsion à l'échelle de 1:200, avec la similitude de Froude. On a modélisé le diamètre des matériaux sans correction d'échelle linéaire et le poids spécifique a été le même. Ceci assure que le paramètre de mobilité de Shields est le même sur le modèle et le prototype et garantit la reproduction du phénomène d'érosion (Zevallos *et al.*, 1993).

Les matériaux constitutifs

La localisation, le type et les caractéristiques des matériaux, tant en surface qu'en profondeur ont été les paramètres les plus importants retenus pour la modélisation de la rupture, mais en même temps ils ont été la source de la plupart des incertitudes et des divergences. Les valeurs moyennes adoptées pour la modélisation sont les suivantes :

Poids spécifique du matériel : 2,76 T/m<sup>3</sup>

Granulométrie :

D50%= 100mm (0,1 mm - 2.000mm) ;

D90/D30=30

Porosité : 15 % ( 10-50% )

Angle de friction : 45°

Cohésion : 0,5 T/m<sup>2</sup>

Angularité : élevée

En raison de l'incertitude existante à propos des matériaux constituant le barrage, Zevallos (1993) a utilisé deux granulométries qui conduisent à deux hypothèses de rupture : l'une, optimiste, où le barrage se stabilise à la cote 2 345 grâce à la présence de gros blocs et, l'autre, pessimiste, qui simule un barrage homogène de matériau moyen.

	Hypothèse optimiste	Hypothèse pessimiste
Granulométrie (D50%) :	25 cm	10 cm
Cote initiale crête (m)	2 356,6	2 356,6
Débit maximum (m <sup>3</sup> /s)	7 900	16 000
Durée de la rupture (h)	8	6
Durée de la phase érosive avant la rupture (h)	37	36
Volume évacué (millions de m <sup>3</sup> )	75	185
Cote d'équilibre (m)	2 345	2 314
Volume final (millions de m <sup>3</sup> )	125	15

Les deux essais réalisées par Rivero & Marin (1993) sur un modèle d'échelle 1:150 avec D50% = 15 cm ont donné les résultats suivants :

	1er essai	2 <sup>ème</sup> essai
Cote initiale (m)	2 353	2 358,85
Volume emmagasiné (millions de m <sup>3</sup> )	126	150
Débit maximum (m <sup>3</sup> /s)	8 000	6 500
Temps de montée (heures)	21	30
Cote d'équilibre (m)	2 330,85	2 329,85
Volume final (millions de m <sup>3</sup> )	36	33

Les figures 5, 6 et 7 permettent de comparer le modèle réduit avec la réalité.



Fig. 5 - Simulation sur modèle réduit : phase initiale d'érosion régressive lente du canal.



Fig. 6 - L'érosion exponentielle réelle du barrage de la Josefina.

Insistons sur le fait que toutes ces estimations ont été réalisées avant la rupture, pour tenter d'estimer un débit maximum, encore inconnu mais d'importance vitale pour tout ce et ceux qui existent en aval. La divergence de ces prévisions atteste de leur complexité.



Fig. 7 - Simulation sur modèle réduit : phase d'érosion exponentielle du barrage.

#### 6. 4. Comparaison des méthodes de prévision de rupture

- a) L'abaque proposé par de Schuster & Costa (1986), d'utilisation très simple, a donné une bonne approximation du débit maximum de crue.
- b) La combinaison de modèles réduits physiques et mathématiques est recommandée pour simuler la rupture de barrages et ses effets en aval. Leur utilisation est cependant délicate, car les résultats fournis par ces modèles sont très sensibles aux paramètres d'entrées que l'on ne connaît pas toujours. Il est en particulier absolument indispensable d'estimer correctement la granulométrie du barrage pour pouvoir simuler correctement sa rupture.
- c) Le modèle DAMBRK a été précieux pour simuler la propagation de la crue. Il ne permet malheureusement pas de simuler la rupture du barrage, puisqu'il nécessite des données non connues (hauteur de la brèche, temps de rupture). De plus, ne prenant pas en compte le transport solide, il n'a pas pu reproduire correctement les niveaux de l'eau dans les premiers kilomètres en aval du barrage où le fond de la vallée s'est trouvé rehaussé de plusieurs mètres par les dépôts provenant de la rupture du barrage.
- d) Le modèle BREACH s'est révélé inadapté car il demande lui aussi que l'on fixe la cote finale d'équilibre du barrage et la largeur finale de la brèche qui

sont justement des inconnues. D'autre part ce modèle présente de sérieuses insuffisances et une certaine instabilité par rapport à la variation de paramètres tels que l'inclinaison des talus et la largeur de la crête. Dans ce modèle, le diamètre moyen du matériau qui constitue le barrage n'a pas d'influence sur la rupture, ce qui ne correspond pas à la réalité.

e) Les difficultés rencontrées pour la réalisation de bonnes prévisions ont montré la nécessité d'améliorer les connaissances dans les domaines suivants :

- les caractéristiques spécifiques du site de la catastrophe : débit de la rivière, hauteur du barrage, volume emmagasiné, courbe hauteur-volume, dimensions du barrage, dimensions du canal d'écoulement, matériaux qui forment le barrage, etc.

- le processus d'érosion des barrages. Il faut étudier, en particulier, l'interaction du flux de l'eau et des sédiments en condition d'écoulement torrentiel non permanent, la taille de la brèche de rupture, la sédimentation dans le lit en aval, la hauteur de stabilisation du barrage et en conséquence l'hydrogramme de crue qui en résulte.

## 7. QUELQUES LEÇONS ET ASPECTS DE LA GESTION DE CETTE CRISE

### 7. 1. Nature et conscience du danger

Le glissement de terrain de La Josefina et ses conséquences ont montré l'importance qu'il faut attribuer à ce type de danger dans le cadre d'une planification locale et régionale, pour tenter d'épargner les vies humaines, les biens et les infrastructures. Cet événement a aussi mis en évidence la grande vulnérabilité de la région à des phénomènes naturels de tout ordre, parmi lesquels il faut citer les menaces morphologiques, géologiques et hydrométéorologiques, qui sont souvent aggravées par l'action de l'homme. Tous ces facteurs, associés à la localisation des habitants, déterminent finalement les risques que courent les populations.

Après la catastrophe, plusieurs voix se sont élevées pour dénoncer l'absence de planification et de prévention. Dans les communautés scientifiques, techniques et parmi les autorités, on s'est interrogé sur les causes de l'événement et sur les possibilités qu'il y avait de l'éviter ou du moins de le prévoir.

La zone de La Josefina était connue pour son instabilité. Les crevasses près de la ligne de crête et les incessantes déformations de la route qui passait dans sa partie inférieure, en sont la preuve. Ainsi, deux ans avant la catastrophe, une inspection du site relatée par la presse (journal "El Tiempo" du 19/03/91 à Cuenca) fut effectuée par des autorités locales accompagnées d'un ingénieur du Service Géologique National. L'article de presse signalait que le danger d'un glissement était imminent et que la situation nécessitait une intervention immédiate, car susceptible de provoquer des dommages imprévisibles dans la mesure où le fond de la vallée pouvait être obstrué à tout moment et retenir les eaux du rio Paute. Il était en même temps fait mention de crevasses ainsi que de la nécessité de suspendre l'exploitation de la carrière située au pied du futur glissement.

Cela montre bien que l'information préalable n'était pas absente. C'est avant tout la conscience réelle du danger qui a fait défaut aux institutions, chargées de prendre des décisions face à un énorme risque potentiel dont la probabilité d'occurrence, de l'aveu même des spécialistes, était difficile à évaluer.

## 7. 2. Réponse institutionnelle, structures mises en place

Il s'agit de bien distinguer les institutions chargées de gérer ce type de situation et ses conséquences : celles qui existaient avant le glissement de terrain ; celles qui ont été mises en place très rapidement afin de gérer un événement dont l'ampleur était totalement inhabituelle ; celles, enfin, qui ont été chargées, après la crise, de la réhabilitation des zones sinistrées ou de la prévention de désastres ultérieurs.

La prévention et la gestion de ce type de catastrophe est normalement du ressort de la "*Junta Provincial de Defensa Civil*", appuyée par les départements techniques de plusieurs autres institutions (Forces Armées, INECCEL, CREA, Services Géologiques des Ponts et Chaussées, etc).

Face à l'ampleur de l'événement, la gestion de la crise a été confiée dès le début à deux organismes spécialement créés : le "*Comité de gestión de crisis*" sous la responsabilité de l'Armée, et le "*Consejo de Programación de obras emergentes en la Cuenca del Paute y de sus afluentes*". Ces derniers ont demandé l'appui et coordonné l'action d'universités équatoriennes et de plusieurs organismes nationaux et internationaux. Sur le plan international, les experts de la Division des Affaires Humanitaires (DHA) des Nations Unies, du Corps Suisse d'Aide en cas de Catastrophe (ASC), de l'ORSTOM, ainsi que des experts chiliens, italiens, nord-américains et suisses sont intervenus en tant que conseillers techniques. L'aide aux populations civiles a pour sa part été assurée par la Croix Rouge, l'Église, l'USAID, l'Union Européenne et plusieurs ONG.

Après la crise, la réhabilitation des zones sinistrées a été confiée au même "*Consejo de Programación de obras emergentes en la Cuenca del Paute y de sus afluentes*" qui a souvent coordonné directement le financement et la construction d'ouvrages, et négocié et canalisé les aides de divers gouvernements ou institutions équatoriennes et étrangères. Un important projet de reconstruction, d'un montant de 14 millions d'ECU est en phase de négociation avec l'UE.

Dans le domaine de la prévention, il faut citer plus particulièrement le projet PRECUPA de coopération entre diverses institutions équatoriennes et l'organisation Suisse, ASC, déjà citée, qui était déjà intervenue comme conseiller au cours de la catastrophe. Le projet PRECUPA a pour objectif d'assurer la prévention et la réduction des risques d'origine géotechnique, géologique/sismique, et d'inondation sur l'ensemble du bassin du rio Paute, ainsi que le contrôle de la qualité des eaux du lac résiduel en amont du glissement. L'une des préoccupations du projet PRECUPA est l'utilisation des résultats de ses études par l'information des populations, la formation des techniciens et l'appui aux organismes équatoriens de protection civile.

## 8. CONCLUSIONS : LES ENSEIGNEMENTS DE CET ÉVÉNEMENT MAJEUR

Nous avons apporté quelques éléments d'information sur les aspects géotechniques du glissement de terrain et sur l'importance des dégâts causés par les inondations tant en aval qu'en amont du barrage de la Josefina. Nous avons abordé quelques aspects humains, sociaux et institutionnels de cette crise et de sa gestion, déjà largement traités par plusieurs auteurs (Cruz, 1993 ; Leone & Velásquez, ce numéro, etc). Nous essayerons, dans cette conclusion, de montrer ce que cette crise de la Josefina nous a appris. Les institutions

équatoriennes ou internationales seront-elles mieux préparées, à l'avenir, pour faire face à un événement similaire ? Avons-nous su profiter des nombreuses informations existantes sur ce désastre majeur pour faire progresser nos connaissances sur les mécanismes fondamentaux des phénomènes qui en sont à l'origine ? Quelles sont les recommandations que nous pourrions faire ? Citons enfin l'ouvrage fondamental "Sin plazo para la esperanza", tout récemment compilé par Zevallos *et al.* (1996) et qui réunit les points de vue les plus importants sur ce drame aux multiples facettes.

### 8. 1. La gestion en temps réel de la crise

La crise a été coordonnée par une cellule qui a dû répondre immédiatement aux questions des décideurs, parfois sans disposer de tous les éléments nécessaires. Cette cellule a fait ce qu'elle a pu. On a signalé, à posteriori ses erreurs et ses points faibles, comme les divergences dans la prévision de la montée du lac ou des débits maximums au moment de la rupture. Mais cette cellule a permis de creuser le canal, sans lequel le barrage d'Amaluza aurait été probablement détruit, et d'organiser les secours et les évacuations.

Comment faudrait-il organiser une future cellule de crise ? Comme cela a été le cas, il faut qu'elle soit capable de se mobiliser très vite, car la majeure partie des barrages sont emportés en quelques jours. Souvent, tout ce que l'on peut faire est délimiter les zones menacées et organiser les évacuations. Pour cela, il faut pouvoir disposer très rapidement d'une équipe rodée, disposant de moyens de transport et de reconnaissance (la contribution de l'armée est ici essentielle). Cette équipe doit être composée de spécialistes en *géologie/géotechnique* (équipés d'instruments de mesure des caractéristiques mécaniques des sols, munis d'outils de reconnaissance sismique ou de radars, etc), de *topographes/cartographes*, d'*hydrauliciens*, d'*hydrologues* et de *spécialistes de ruptures de digues* en terre. À ce sujet, il est nécessaire de maintenir en permanence une unité opérationnelle capable de réaliser en des temps très brefs des modèles réduits physiques et mathématiques permettant de simuler et donc de prévoir la violence de la rupture de la digue.

### 8. 2. La gestion post-crise et la réhabilitation

Il y a eu beaucoup d'intervenants : organismes gouvernementaux équatoriens ; organismes étrangers (dont l'aide est allée de dons ponctuels d'un gouvernement à la mise en oeuvre de projets globaux comme ceux de la CEE ou de PRECUPA) ; ONG diverses ; l'Église, etc. Il est hors de notre propos de débattre de cette question pourtant extrêmement importante pour la réorganisation d'une région touchée par une crise de cette ampleur, analysée par Léone et Velásquez (ce numéro).

### 8. 3. La prévention

Le premier problème est de savoir où va se produire un glissement dangereux. Le second, plus délicat, est de savoir quand.

Peut-on faire un inventaire des glissements les plus dangereux ? Éloigner les populations des zones trop risquées ? Prévoir des solutions alternatives pour les infrastructures vitales et parfois uniques comme les routes, les ponts, les oléoducs, les lignes électriques ? Est-ce que l'on aurait pu prévoir ce glissement de terrain (en Équateur, c'est le deuxième en 6 ans après celui del PISQUE près de Quito) ou bien est-on condamné à réagir seulement après coup ?

#### 8. 4. L'utilisation de l'information acquise pour améliorer les connaissances fondamentales sur ce type de phénomène

Nous évoquerons seulement ici la question de la rupture de la digue qui, après le glissement de terrain, est apparue comme étant l'un des phénomènes les plus difficilement prévisibles.

##### 8. 4. 1. *La divergence des prévisions*

Jusqu'à l'heure de la rupture, les prévisions des experts étaient extrêmement divergentes. Certains, comme les experts chiliens (Penille & Jacome, 1993) pensaient que ce barrage, de plus d'un kilomètre de long ne céderait pas. La majorité des experts se rangeait à l'avis de Natale (1993) qui prévoyait un débit maximum proche de 2 000 m<sup>3</sup>/s ; seuls Zevallos *et al.* (1993) et Rivero & Marin (1993) ont cerné la réalité en effectuant des prévisions comprises entre 6 000 et 16 000 m<sup>3</sup>/s. En prenant simultanément toutes les hypothèses les plus défavorables, ils ont même obtenu une estimation de 40 000 m<sup>3</sup>/s.

Ces divergences montrent bien que les connaissances sur l'évolution de ce genre de rupture sont insuffisantes. Tout dépend, en fait, de la vitesse de l'eau, de sa densité, mais aussi du pourcentage global de roches de grande taille, qui restent sur place et constituent une base. C'est le barrage résiduel qui a stoppé le processus érosif. Mais, en terme de prévision, le problème est de savoir quelle peut-être la vitesse du processus érosif et quand et à quelle hauteur peut avoir lieu la stabilisation du barrage résiduel.

Nous avons été témoins de la manière inexorable et rapide dont les blocs de plusieurs dizaines de tonnes ont été emportés l'un après l'autre, après que les eaux eurent déblayé le matériel plus fin et peu cohérent. Ce manque de cohésion du matériel qui les entoure est, à notre avis, l'une des clefs de la rapidité de la rupture, au même titre que la granulométrie des matériaux. Mais comment intégrer cela aux modèles ?

##### 8. 4. 2. *Intérêt scientifique du suivi de cette catastrophe*

Les mesures, films et observations réalisés sur le site de la Josefina représentent une occasion exceptionnelle de faire progresser nos connaissances dans le domaine des ruptures de digues, dans celui des transports hydrauliques de gros blocs par de fortes vitesses, ou dans celui de l'ingénierie des pentes, puisque l'on connaît parfaitement les variations des niveaux d'eau qui ont provoqué les glissements de terrains. Nous avons ici une occasion unique de rassembler les éléments utiles pour une meilleure prévision et une gestion plus efficace du prochain désastre de cette nature qui peut survenir dans de nombreuses régions du globe, notamment dans les Alpes.

## Références citées

- ACOSTA, T. & SALAZAR, J., 1993 - Hipótesis sobre el origen del deslizamiento La Josefina y geomorfología del área de influencia. in: *Memorias del Coloquio Científico el Deslizamiento de la Josefina*, 13p., 8 fig., 1 map., Quito: EPN.
- AGUILERA, E. & ROMO, M., 1993 - Deslizamiento "La Josefina": Planificación y Decisiones para el manejo de la crisis, 6p., 6 fig., 1 tab., Coloquio. EPN. Quito-Ecuador, 21-23 de julio.
- CADIER, E., ZEVALLOS, O. & VACCA, A., 1994 - Le glissement de terrain et les inondations catastrophiques de La Josefina en Équateur. in: *Actes des 23èmes journées de l'hydraulique de la SHF*, 1: 355-358 ; Nîmes.
- CANUTI, P., FRASONI, A. & NATALE, L., 1994 - La Josefina rockslide and rio Paute landslide dam, Ecuador 2) Failure of the rio Paute landslide dam. *Landslide News*, N°8: 6-7, Japon Landslide Society.
- CEPEDA, L., 1995 - Manejo de la central Hidroeléctrica Paute durante el desfogue de la Josefina. En fase de publicación.
- CHAMOT, P., STUDER, Y. & WIRZ, F., 1993 - *El deslizamiento La Josefina en el valle del río Paute, Cuenca, Ecuador*, 47p. + 77 p. annexe Bern: DHA/UN, ASC (Suiza).
- CHANG, L. & ALVA, J.E., 1991 - Deslizamientos y Aluviones en el Perú, CISMID: Universidad Nacional de Ingeniería.
- CHEN, C.L. & AMBRUSTER, J.T., 1980 - Dam-Break Wave Model: Formulation and Verification. *Journal of The Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 106, N° HY5: 747-767.
- C.R.E.A., 1993 - Evaluación preliminar de los daños por el deslizamiento de la Josefina.
- CRUZ, M., 1993 - Evaluación de daños. Defensa Civil.
- ESCANDE, L., 1961 - The Influence of Certain Parameters on a Sudden Flood Wave Downstream from a Dam, *La Houille Blanche*, N° 5.
- FREAD, D.L., 1984 - DAMBRK: The NWS Dam-Break Flood Forecasting Model, National Weather Service, Office of Hydrology, Silver Spring, Md.
- FROELICH, D.C., 1987 - Embankment-Dam Breach Parameters. in: *Proceedings of 1987 National Conference on Hydraulic Engineering*: 570-575, ASCE, NY.
- GOZALI, S. & HUNT, B., 1993 - Dam-Break Solutions for a Partial Breach, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 31, N° 2: 205-214.
- HAGEN, V.K., 1982 - Re-evaluation of Design Floods and Dam Safety. in: *14th ICOLD Congress*, Rio de Janeiro.
- HUNT, B., 1984 - Perturbation Solution for Dam-Break Floods. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 110, N° 8.
- INECEL, 1993 - Varias comunicaciones personales inéditas.
- JAMES, M., 1993 - Análisis de experiencias de roturas de presas para la preparación de un plan de emergencia. in: *coloquio científico "El deslizamiento de la Josefina"*, 11p., Quito.
- JAMES, M., GALARZA, L., CISNEROS, F., CORDERO, P., de BRIEVE, B., ABRIL, B. & MARTINEZ, F., 1993 - Informe de Resultados de los Modelos Matemáticos, 21 de Abril de 1993.
- JERVES, L., 1995 - Sedimentación del embalse Amaluza por efecto de la crecida de la Josefina. Comunicación personal.
- LÉONE, F., VELÁSQUEZ, E., 1996 - Analyse en retour de la catastrophe de la Josefina (Équateur, 1993): Contribution à la connaissance du concept de vulnérabilité appliqué aux mouvements de terrain. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 25(3) :
- MACDONALD, T.C. & LANGRIDGE-MOMPOLIS, J., 1984 - Breaching Characteristics of Dam Failures, *Journal of Hydraulics, A.S.C.E* 110, N° 5, May: 567-586.
- NATALE, L., 1993 - Reporte técnico de la misión italiana sobre simulación de erosión en la presa sector La Josefina Río Paute. Abril 7.
- PENILLE, I. & JACOME, A., 1993 - Informe. Deslizamiento Josefina Ciudad de Cuenca-Ecuador, Abril.
- PLAZA, G. & ZEVALLOS, O., 1994 - La Josefina rockslide and rio Paute landslide dam, Ecuador 1) The La Josefina rockslide. *Landslide News*, N° 8, Japon Landslide Society.
- PLAZA, G. & EGUEZ, A., 1993 - Consideraciones geológico-geotécnicas sobre el deslizamiento de la Josefina. in: *Memorias del Coloquio Científico el Deslizamiento de la Josefina*. Quito: EPN.

- RIVERO, J. & MARIN, L., 1993 - Breve descripción del comportamiento del Modelo Hidráulico de la Presa La Josefina, Guayaquil, 16 de abril.
- SCHUSTER, R.L. & COSTA, J.E., 1986 - A Perspective on Landslide Dams, Landslide Dams: Processes, Risk, and Mitigation. *Geotechnical Special Publication No. 3*, ASCE: 1-20, qR.L. SCHUSTER Ed.
- SEVILLA, J.H., 1993 - El Deslizamiento "La Josefina". Consideraciones Geológicas.
- SEVILLA, J.H., 1994 - The Josefina landslide and its implications in the electrical service for the Republic of Ecuador. in: *Proceedings 7th international IAEG Congress: 1801-1810*, Rotterdam: Balkema.
- U.S.ARMYPORPSOFENGINEERS, 1960 - Floods Resulting From Suddenly Breached Dams: Conditions of Minimum Resistance. Hydraulic Model Investigation, Miscellaneous Paper No.2-374, Report No. 1, Waterway Experiment Station, Vicksburg, Missisipi.
- ZEAS, R., 1993 - El deslizamiento de la Josefina, tragedia nacional. in : *Coloquio científico: El deslizamiento de la Josefina*, Quito, Ecuador : EPN, 21-23 juillet.
- ZEAS, R., 1994 - *El deslizamiento de la Josefina, tragedia nacional*. U. de Cuenca: Instituto de investigaciones de ciencias técnicas.
- ZIVALLOS, O., 1993 - El deslizamiento de La Josefina - Evaluación Hidráulica. Coloquio. EPN. Quito-Ecuador, 21-23 de julio.
- ZIVALLOS, O., 1994 - Expériences de modélisation physique et mathématique pour la prévision de rupture de barrages. in : *Actes des 23èmes journées de l'hydraulique de la SHF*, 1: 261-267; Nimes.
- ZIVALLOS, O., BASTIDAS, L. & VALDOSPINOS, N., 1993 - Estudio del Proceso de Rotura del Embalse La Josefina Río Paute, Quito-Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, abril 20.
- ZIVALLOS, O., FERNÁNDEZ, M.A., PLAZA, G.N. & KLINKICHT, S.S., 1996 - *Sin plazo para la esperanza. Reporte sobre el desastre de la Josefina, Ecuador 1993*, 348p., Quito : EPN-USAID-CSS.

1996

Tome 25  
N° 3

LIMA - PÉROU

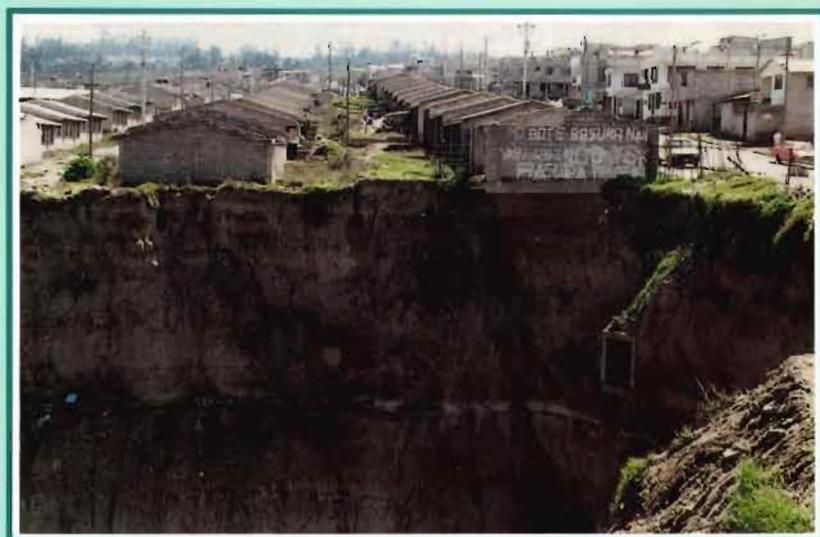
# BULLETIN

de l'INSTITUT FRANÇAIS  
d'ÉTUDES ANDINES

---

## LES RISQUES NATURELS ET LEUR GESTION EN ÉQUATEUR

DIVERSITÉ DES EXEMPLES  
COMPLÉMENTARITÉ DES  
APPROCHES



---

Sous la direction de  
Robert d'Ercole



IFEA

CRSTOM



ISSN 0303 - 7495

**BULLETIN  
DE L'INSTITUT FRANÇAIS  
D'ÉTUDES ANDINES**

1996, Tome 25, N° 3

**Directeur :** Georges Pratlong  
**Responsable de l'édition :** Anne-Marie Brougère

Toute correspondance concernant la revue doit être adressée à :

**Institut Français d'Études Andines - Éditions**  
**Casilla 18-1217 - Lima 18 - Pérou**  
**Tél: 51-1 447 60 70**  
**Fax: 51-1 445 76 50**  
**Courrier Électronique :** [abrouger@ifea.org.pe](mailto:abrouger@ifea.org.pe)

**Composition:**  
Anne-Marie Brougère  
Juan Carlos Tello

**Maquette de la couverture:**  
Alain Dagand

**Impression:**  
Editorial Gráfica Pacific Press S.A.  
Los Negocios, 219  
Surquillo  
Lima - Pérou

Photo de la couverture :

*Urbanización Carapungo*, dans le nord de Quito, menacée par l'érosion début 1994. Exemple d'un aménagement mal conçu par rapport au site : le lotissement, coordonné par le *Banco de Vivienda* au début des années 90, a été construit en bordure d'une grande *quebrada*, profonde de 60 à 80 mètres environ. Le collecteur d'eaux pluviales de l'ensemble de l'urbanisation, visible sur la droite du cliché et déversant en cascade dans des cendres volcaniques (la *cangahua*), a concentré le ruissellement, causant ainsi l'érosion régressive du talus sur une dizaine de mètres environ. Malgré la déviation du collecteur vers une autre sortie, le recul du talus s'est poursuivi depuis.

(Cliché Bernard Lortic, ORSTOM)