BRGM

LES ECOULEMENTS FACTEURS DE RISQUES EN GEOLOGIE : NATURE ET MODELISATION

Thierry LAFFORGUE

R 30922
ENV 4S 90

Mai 1990

BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES
BRGM Services Sol et Sous-Sol
Département Environnement et Risques
B.P. 6009 - 45060 Orléans Cédex 02 - France

BUREAU DE RECHERCHES
GEOLOGIQUES ET MINIERES
etablissement public
à caractere industriel
et commercial
Siège : Tour Mirabeau
39-43, quai André-Citroen
75739 Paris cedex 15, France
Tél.: (33) 1 40 58 89 00
Télex : BRGM 780258 F
Telecopieur : (33) 1 40 58 89 33
R.C. 58 B 5614 Paris
SIRET : 58205814900419
Centre scientifique et technique :
Avenue de Concyr
Orleans-La Source (Loiret)
B P 6009
45060 Orleans cedex 2, France
Tél.: (33) 38 64 34 34
Télex : BRGM 780258 F
Telecopieur : (33) 38 64 35.18

SOMMAIRE

1 - INTRODUCTION 3

2 - LES DIFFERENTS ECOULEMENTS FACTEURS DE RISQUES EN GEOLOGIE 4

2.1 - ECOULEMENTS DE SOL (FLUAGE, SOLIFLUCTION) 4

2.2 - ECOULEMENTS D'EAU (INONDATION, ONDE DE SUBMERSION) 4

2.3 - ECOULEMENTS VISQUEUX (COULEES DE LAVE, DE BOUE, DE NEIGE DENSE) 5
2.3.1 - Les coulées de lave 5
2.3.2 - Les coulées de boue et de débris 6
2.3.3 - Les coulées de neige dense 6

2.4 - ECOULEMENTS GLACIAIRES (GLACIER, GLACIER ROCHEUX) 6

2.5 - ECOULEMENTS TURBULENTS FLUIDISES (COURANTS DE TURBIDITE, DE PYROCLASTITE, DE NEIGE FROIDE) 7
2.5.1 - Ecoulements pyroclastiques 7
2.5.2 - Courants de turbidité 7
2.5.3 - Les avalanches de neige pulvérulente 8

2.6 - ECOULEMENTS DE GAZ DENSES (COULEES DE GAZ VOLCANIQUES) 8

2.7 - ECOULEMENTS DE BLOCS (AVALANCHE DE DEBRIS) 9

3 - MODELISATION 11

3.1 - LES DONNEES DE TERRAIN 11

3.2 - APERCU SUR LA MECANIQUE D'ECOULEMENT 11

3.3 - MODELES D'ECOULEMENT 14
3.3.1 - Modèles analytiques 14
3.3.2 - Modèles analogiques 14
3.3.3 - Modèles numériques 15

4 - CONCLUSIONS - PERSPECTIVES 16

BIBLIOGRAPHIE 17

ANNEXES : Figures

1 - INTRODUCTION

Le risque géologique est toujours lié à un mouvement.

Une région peut être menacée par l'ébranlement de son soubassement (tremblement de terre, amorce de glissement de terrain, effondrement), de recouvrement par des matériaux transportés dans l'atmosphère (retombées volcaniques) ou sur la surface topographique (écoulements, chutes de blocs).

La place qu'occupent les écoulements parmi les facteurs de risques géologiques est considérable.

Derrière ce terme se rassemblent des phénomènes variés, largement répartis sur le globe, des climats polaires aux climats équatoriaux, du sommet des plus hautes montagnes jusqu'au fond des océans (glissement de sol, coulées de boue, de lave, de débris, de pyroclastite, de gaz, souffle, déferlante, inondation, tsumani, avance glaciaire, avalanche de neige ou de rocher, courant de turbidité).

Si, de manière générale, la prévision et la prévention du risque géologique s'appuient d'abord sur l'estimation de la nature, de la localisation et de la date de l'événement, dans le cas des écoulements, il est tout aussi indispensable d'évaluer le cheminement du phénomène, son évolution physique dans le temps et l'espace, son comportement vis-à-vis des ouvrages de protection. Une telle étude ne peut être réalisée de façon quantitative que par le biais de la modélisation.

Le but de ce rapport est de présenter rapidement les différents écoulements géologiques à risque et les principales voies utilisées pour les modéliser.

2 - LES DIFFERENTS ECOULEMENTS FACTEURS DE RISQUES EN GEOLOGIE

Nous entendrons par écoulement la mise en mouvement, essentiellement sous l'effet de la gravité, d'un fluide sur une surface topographique. Ce fluide peut être simple (eau, air) ou complexe, plus ou moins chargé en matériaux solides ou en gaz (lave, neige, boue), son régime d'écoulement laminaire ou turbulent, continu (coulée) ou très discontinu (déferlante, onde de submersion) , son mouvement activé par la seule gravité ou facilité par d'autres phénomènes (détente gazeuse, fluidisation, lubrification).

Ces événements, variés et complexes, sont encore incomplètement compris pour la majorité d'entre eux. Leur classification est mal définie, en particulier pour les mouvements de terrain et les écoulements volcaniques turbulents. Nous utiliserons ici une classification fondée sur la nature des composants (fluide-solide) de l'écoulement et sur la dynamique de son mouvement (voir tableau I).

2.1 - Ecoulements de sol (fluage, solifluction)

Il s'agit de mouvements très fréquents, puisque l'écoulement des sols est le plus important processus de mouvement de terrain en volume, mais très lents (généralement inférieurs au centimètre par an). Ces mouvements affectent des sols, et/ou des roches stratifiées, sur quelques décimètres à quelques mètres d'épaisseur, même sur des pentes très faibles (quelques degrés). Le fluage intéresse des sols non saturés en climat tempéré ou chaud, la solifluction des sols saturés en climat froid. Du fait de leur lenteur, ces mouvements ne sont pas dangereux en eux-mêmes, mais ils peuvent initier des glissements de terrain plus rapides.

2.2 - Ecoulements d'eau (inondation, onde de submersion)

A cause de leur fréquence et de leur étendue, les inondations sont parmi les plus grandes calamités naturelles. L'eau, salée ou douce, peut incorporer des boues et des débris divers (au-dessus de 30 % de fraction solide, on passe progressivement aux coulées de boue).

D'un point de vue dynamique, on peut distinguer deux catégories d'inondation :

- Les montées d'eau régulières et relativement lentes (grandes marées, fortes pluies). Dans ce cas, les processus liés aux écoulements rapides interviennent peu sur la détermination des zones inondées.

- Les ondes de submersion, correspondant à des arrivées brutales d'eau rupture de barrage naturel ou artificiel, tsunami). L'écoulement de l'eau est alors violent, il faut tenir compte de sa dynamique (formation d'une déferlante) et de l'évolution possible du fluide (passage fréquent à des coulées de boue) pour déterminer les zones menacées.

2.3 - Ecoulements visqueux (coulées de lave, de boue, de neige dense)

La lave, la boue et la neige dense (neige mouillée) ont des comportements rhéologiques similaires de type fluide de Bingham. Un tel fluide ne se met en mouvement que lorsqu'on lui applique une contrainte minimale supérieure à un seuil d'écoulement. L'existence de ce seuil empêche le mouvement du fluide sur de faibles pentes ou pour de faibles épaisseurs. Il détermine le développement de levées latérales qui chenalisent l'écoulement et d'une zone supérieure centrale de vitesse uniforme, le ruban. Les viscosités des laves, boues et neiges denses sont élevées, généralement plus de mille fois celle de l'eau.

2.3.1 - LES COULEES DE LAVE

Il existe dans le monde un demi-millier de volcans actifs (c'est-à-dire dont on connaît au moins une éruption historique). Les laves émises sous forme de coulées sont essentiellement des basaltes et des andésites.

Ces coulées sont en général peu dangereuses pour les personnes, car assez lentes, mais elles causent une destruction totale des biens dans les zones recouvertes et les terres agricoles sont perdues pour des siècles. La famine qui suivit l'éruption de 12 km³ de basalte au Laki (Islande) en 1783 (Fig. 1) a provoqué la mort de 10 000 personnes, soit 20 % de la population islandaise de l'époque (Blong, 1984).

2.3.2 - LES COULEES DE BOUE ET DE DEBRIS

Ces coulées sont beaucoup plus fréquentes et répandues que les coulées de lave. Toute arrivée brutale et importante d'eau dans un terrain riche en matériaux fins est susceptible de créer des coulées de boue. L'eau peut être libérée par une fonte rapide de neige et de glace (éruption volcanique), une rupture de barrage, ou de fortes pluies. La matrice fine est généralement constituée par des argiles d'altération ou des cendres volcaniques.

On parle de lahar lorsque le matériel solide est d'origine volcanique (cendres volcaniques), de coulée de débris lorsqu'une coulée de boue intègre des blocs rocheux en quantité significative.

Les coulées de boue et de débris peuvent se déplacer sur de très grandes distances (jusqu'à 200 à 300 km) et parfois à grandes vitesses (100 km/h et plus). La destruction est quasi totale dans les zones recouvertes. Une coulée de boue libérée par l'éruption du Nevado del Ruiz (Colombie) en 1985 (Fig. 2) a fait 25 000 victimes dans la ville d'Armero, à plus de 50 km de la zone de départ de la coulée (Williams, 1987).

2.3.3 - LES COULEES DE NEIGE DENSE

Ces coulées correspondent à la mise en mouvement d'une neige contenant de l'eau liquide, qui augmente sa densité (entre 200 et 600 kg/m^3) et joue un rôle de lubrifiant, qui facilite le glissement d'une neige déjà sans cohésion (rapport CEMAGREF, 1983).

Ces coulées de neige sont assez lentes (10-20 km/h) mais ont une capacité de transport et de poussée importante.

2.4 - Ecoulements glaciaires (glacier, glacier rocheux)

Le mouvement d'un glacier se compose à la fois d'un fluage, de type plus ou moins binghamien dans sa masse, et d'un glissement de type solide à sa base. La vitesse d'écoulement est lente mais irrégulière, avec parfois des accélérations par à-coups qui déplacent le glacier de plusieurs mètres par jour (Röthlisberger, 1987). De tels à-coups peuvent destabiliser un glacier et déclencher des avalanches de glace (Fig. 3).

On parle de glacier rocheux lorsque la charge solide du glacier excède 50 %. Ces glaciers, souvent recouverts d'un sol et difficiles à détecter, sont plus fréquents qu'on l'imagine.

2.3.2 - LES COULEES DE BOUE ET DE DEBRIS

Ces coulées sont beaucoup plus fréquentes et répandues que les coulées de lave. Toute arrivée brutale et importante d'eau dans un terrain riche en matériaux fins est susceptible de créer des coulées de boue. L'eau peut être libérée par une fonte rapide de neige et de glace (éruption volcanique), une rupture de barrage, ou de fortes pluies. La matrice fine est généralement constituée par des argiles d'altération ou des cendres volcaniques.

On parle de lahar lorsque le matériel solide est d'origine volcanique (cendres volcaniques), de coulée de débris lorsqu'une coulée de boue intègre des blocs rocheux en quantité significative.

Les coulées de boue et de débris peuvent se déplacer sur de très grandes distances (jusqu'à 200 à 300 km) et parfois à grandes vitesses (100 km/h et plus). La destruction est quasi totale dans les zones recouvertes. Une coulée de boue libérée par l'éruption du Nevado del Ruiz (Colombie) en 1985 (Fig. 2) a fait 25 000 victimes dans la ville d'Armero, à plus de 50 km de la zone de départ de la coulée (Williams, 1987).

2.3.3 - LES COULEES DE NEIGE DENSE

Ces coulées correspondent à la mise en mouvement d'une neige contenant de l'eau liquide, qui augmente sa densité (entre 200 et 600 kg/m^3) et joue un rôle de lubrifiant, qui facilite le glissement d'une neige déjà sans cohésion (rapport CEMAGREF, 1983).

Ces coulées de neige sont assez lentes (10-20 km/h) mais ont une capacité de transport et de poussée importante.

2.4 - Ecoulements glaciaires (glacier, glacier rocheux)

Le mouvement d'un glacier se compose à la fois d'un fluage, de type plus ou moins binghamien dans sa masse, et d'un glissement de type solide à sa base. La vitesse d'écoulement est lente mais irrégulière, avec parfois des accélérations par à-coups qui déplacent le glacier de plusieurs mètres par jour (Röthlisberger, 1987). De tels à-coups peuvent destabiliser un glacier et déclencher des avalanches de glace (Fig. 3).

On parle de glacier rocheux lorsque la charge solide du glacier excède 50 %. Ces glaciers, souvent recouverts d'un sol et difficiles à détecter, sont plus fréquents qu'on l'imagine.

2.5 - Ecoulements turbulents fluidisés (courant de turbidité, de pyroclastite, de neige froide)

Les écoulements dits fluidisés sont des écoulements turbulents dans lesquels l'attraction de la gravité sur les particules solides présentes dans la coulée est compensée par les frottements dus à des mouvements verticaux du fluide qui les entoure. Les particules restent en suspension dans le fluide. Ces écoulements très rapides incorporent en avançant du fluide environnant (air ou eau), peuvent se déplacer sur un coussin de fluide comprimé et sont en général précédés par une "onde de choc".

A des vitesses modérées (inférieures à 20 m/s), et lorsque les gaz se sont échappés pour les coulées pyroclastiques, l'écoulement perd son caractère fluidisé et devient généralement laminaire.

2.5.1 - ECOULEMENTS PYROCLASTIQUES

Le terme d'écoulement pyroclastique recouvre une variété de phénomènes comprenant les nuées ardentes, coulées de ponces et ignimbrites, pour les plus denses, les déferlantes et les souffles, pour les moins denses. Il s'agit d'écoulement de matériaux laviques chauds (jusqu'à 1 000°) fragmentés, portés par un mélange de gaz magmatiques et d'air.

Ces phénomènes sont très rapides (jusqu'à 500 km/h), turbulents et fluidisés près du point de sortie ; ils deviennent progressivement laminaires binghamiens en fin de parcours.

Les volumes émis peuvent atteindre plusieurs km³ (7 km³ à Katmaii en Alaska en 1912) et parcourir des distances de plusieurs dizaines de km. Le pouvoir destructeur de tels phénomènes est voisin de 100 % dans les zones recouvertes. Les écoulements pyroclastiques du Mont St Helens (USA) en 1980 ont provoqué pour 1,5 milliards de dollars de dégâts dans une région heureusement évacuée (Fig. 4). Ceux de la montagne Pelée (Martinique) en 1902 ont anéanti la ville de St Pierre et ses 28 000 habitants (Fig. 5).

2.5.2 - COURANTS DE TURBIDITE

Les courants de turbidité sont des écoulements avalancheux sous-marins de sédiments fins (sable, boue) arrachés à la pente continentale. Le fluide porteur est l'eau de mer mais l'écoulement plus dense dévale la pente continentale et peut s'écouler très loin (plusieurs centaines de km) et recouvrir des surfaces considérables. L'événement du Grand Banks en 1929 a couvert plus de 260 000 km², soit environ la moitié de la superficie de la France. De tels phénomènes peuvent être déclenchés par des tremblements de terre, des cyclones ou de fortes arrivées de sédiments (inondation en surface) depuis le continent. Ils ne sont bien sûr pas menaçants pour les populations mais endommagent régulièrement les câbles sous-marins.

L'événement du Grand Banks a coupé 13 câbles transatlantiques (Heezen et Ewing, 1952).

2.5.3 - LES AVALANCHES DE NEIGE PULVERULENTE

Ces avalanches mobilisent une neige sèche et froide, de faible densité, que l'on appelle plus communément de la poudreuse. Lorsque l'avalanche acquiert une vitesse suffisante (60 à 80 km/h), la neige et l'air se mélangent pour former un aérosol, qui se comporte comme un gaz lourd, dévale les pentes, gagne en vitesse (jusqu'à 400 km/h) et en force destructrice. Les avalanches de neige sont des phénomènes courants dans les montagnes des pays à climat tempéré et froid. Les préjudices qu'elles font subir sont loin d'être négligeables (une trentaine de victimes chaque année en France par exemple).

2.6 - Ecoulements de gaz denses (coulées de gaz volcaniques)

Il s'agit de gaz dense, principalement du gaz carbonique (CO_2) avec un peu de monoxyde de carbone (CO) et de gaz sulfurés (SO_2 ou H_2S).

Tous ces gaz sont très toxiques. Le gaz carbonique, incolore et inodore, tue par syncope en moins d'une minute à des concentrations de 10 à 15 % seulement.

Ces gaz sont essentiellement d'origine magmatique. Leur libération peut correspondre à la rupture d'un système géothermal, ou hydrothermal.

Une chute de pression (faille, éruption phréatique) dans un aquifère chargé en gaz dissous permet leur dégazage et leur libération en surface. Une telle éruption à l'Hékla (Islande) en 1948 a produit 47 millions de m^3 de gaz toxique. Celle de Dieng (Java) en 1979 a fait 148 victimes (Le Guern et al., 1982).

Le gaz carbonique peut également s'accumuler dans les eaux d'un lac de cratère. Ce type de lac, stratifié, présente un gradient de densité qui maintient les gaz dissous à un niveau proche de la saturation, dans les couches profondes. Une éruption, un glissement de terrain ou un refroidissement de surface, peuvent inverser le gradient, provoquer un basculement des eaux du lac et un brusque dégazage des eaux venues des zones profondes. Celles-ci étant devenues très sursaturées en gaz aux faibles pressions qui règnent en surface.

Le Cameroun a connu deux éruptions gazeuses de ce type récemment (rapport Ministère de l'Environnement, 1987) au lac Momoun (1984, 37 victimes) et au lac Nyos (1986, 1 700 victimes). Le gaz carbonique libéré, dense et froid à cause de sa détente adiabatique, s'écoule rapidement sur le relief (20-30 m/s au lac Nyos ; Fig. 6).

2.7 - Ecoulements de blocs (avalanche de débris)

Un amas de blocs mis en mouvement, dont la taille des éléments est faible par rapport à celle de l'ensemble, se comporte comme un écoulement homogène et peut être considéré comme une coulée fluide. De tels événements sont fréquents, déclenchés par la chute de pans de falaises instables, des éruptions volcaniques ou des tremblements de terre. Ils sont parfois d'ampleur catastrophique, leur volume peut atteindre 10 milliards de m^3 (Flim, Sadmarreh en Iran) et leur vitesse 300 km/h.

L'étude de ces phénomènes a montré que la distance qu'ils parcourent dépend de la hauteur de chute, mais aussi du volume déplacé.

Dans les grands écoulements de ce type (au-delà de 5 millions de m^3), se développe une fluidisation acoustique qui diminue les frottements avec le sol et leur permet d'atteindre une plus grande extension (jusqu'à 16 km supplémentaires). Une telle fluidisation acoustique, produite par la propagation d'ondes de compression à la base de l'écoulement, est de nature différente de celle due aux mouvements verticaux turbulents des coulées de pyroclastite, de turbidité ou de neige pulvérulente (Melosh, 1983, 1987). Une avalanche de débris est un écoulement laminaire.

L'addition d'eau et la présence d'argile qui lubrifient et transforment une avalanche de débris en coulée de débris, peuvent accroître son extension de façon non négligeable. Fluidisation acoustique et lubrification argileuse ont augmenté de presque 10 km l'extension de la coulée du Huascaran au Pérou en 1970, qui parvint en fin de parcours jusqu'aux villes de Yungay et Ranrahirca et y fit 30 000 victimes (Fig. 7).

		Zéro
Extrêmement lent	(EL)	
		0,06 m/an
Très lent	(TL)	
		1,5 m/an
Lent	(L)	
		1,5 m/mois
Modéré	(M)	
		1,5 m/jour
Rapide	(R)	
		0,3 m/min
Très rapide	(TR)	
		3,0 m/sec
Extrêmement rapide	(ER)	

Tableau II - Vitesse des écoulements géologiques
(d'après Varnes, 1978)

Type d'écoulement / Propriétés de l'écoulement	Nature du fluide eau = eau liquide gaz = gaz volcaniques	Nature de la charge solide	Abondance en charge solide:1=0-25%;2=25-50% 3=50-75%;4=75-100%	Régime d'écoulement Lam = laminaire Turb = turbulent Glis = glissement	Fluidisation T=turbul. ; A=acoust.	Vitesse (voir tableau II)	Force motrice G=gravité ; D=détente V=vitesse initiale	Force de résistance S=frottement solide V=frottement visqueux T=frottement turbulent	Fréquence dans le monde	Force destructrice (sur la vie et les biens)	Dégâts par an dans le monde
Fluage Solifluction Glacier rocheux	eau+air eau glace	sol (+roche) sol roche (+sol)	3-4 2-3 3	Lam Lam Lam	 - -	EL-TL TL-L TL-L	G G G	S S S	+++ +++ +++	+ + +	+ + +
Inondation progressive	eau	(boue) (débris)	(1)	Turb (Lam)	-	TR-ER	G (+V)	T (+V)	+++	++	+++
Onde de submersion (tsunami, rupture de barrage)	eau	-	-	Turb	-	ER	G + V	T	+	+++	+
Coulée de lave	lave (+gaz)	cristaux	1-2	Lam	-	R-ER	G	V	++	+++	+
Coulée de boue, lahar Coulée de débris	eau eau	boue (+roche) boue + roche	2-3 2-3	Lam (Turb) Lam (Turb)	- -	TR-ER TR-ER	G G	V V	+++ +++	+++ +++	+++ +++
Coulée de terre	eau (+air)	sol	3-4	Lam	-	L-TR	G	S (+V)	+++	++	++
Avalanche de neige dense	air + eau	neige	2	Lam	-	TR-ER	G	S + V	+++	++	++
Glacier	glace	roche	1-2	Lam + Glis	-	TL-R	G	S + V	+++	+	+
Nuée ardente Coulée pyroclastique	gaz + air gaz + air	pyroclaste (+roche) pyroclaste (+roche)	1 1	Turb (Lam) Turb (Lam)	T T	ER ER	G+D+V G+D+V	S + T S + T	+ +	+++ +++	+ +
Souffle - Déferlante	gaz + air	pyroclaste (+roche)	1	Turb	T	ER	G+D+V	S + T	+	+++	+
Courant de turbidité	eau	boue	1	Turb	T	TR-ER	G	S + T	+++	++	+
Avalanche de neige pulvérulente	air	neige	1	Turb	T	TR-ER	G	S + T	+++	++	++
Coulée de gaz dense	gaz (+air)	-	-	Turb	-	R-ER	G (+D)	T	+	++	+
Avalanche de débris	air (+eau)	roche (+boue)	2-3	Lam	A	ER	G	S + V	++	+++	+

Tableau I - Les écoulements facteurs de risques en géologie

3 - MODELISATION

3.1 - Les données de terrain

Tous ces écoulements présentent un développement complexe sur le terrain. L'écoulement à son début est souvent très différent de ce qu'il devient en fin de progression. Les volumes peuvent être émis brutalement (avalanche de blocs, déferlantes) ou progressivement (coulées volcaniques, certaines coulées de boue). Des matériaux nouveaux sont incorporables en cours de route. Au Huascaran en 1970 par exemple, l'avalanche de blocs a doublé de volume en incorporant de la neige et des moraines. Les avalanches de neige et les courants de turbidité peuvent gagner la plus grande partie de leur volume en cours de déplacement.

Les propriétés physiques du fluide sont évidemment très évolutives. La viscosité d'une coulée de lave, par exemple, augmente d'un facteur 10 000 pendant son trajet à l'air libre. Celles de certains lahars du Mont St Helens ont diminué d'un facteur 1 000 après mélange avec l'eau d'une rivière (Pierson et Scott, 1985).

Avant toute modélisation sérieuse, il faut chercher à posséder une bonne connaissance de tous ces paramètres et de leurs lois d'évolution. La complexité et les difficultés d'observation de la plupart de ces écoulements ne facilitent guère leur compréhension, et si des progrès importants ont pu être obtenus ces dernières années, d'autres, nombreux, restent encore à faire avant de pouvoir se considérer en terrain sûr dans ce domaine.

3.2 - Aperçu sur la mécanique d'écoulement

Un écoulement s'arrête lorsque les forces de résistance au mouvement deviennent supérieures aux forces motrices.

La force motrice principale est la gravité. Sa composante active sur une coulée est fonction de son épaisseur et de la pente, selon :

$$\tau_\alpha = \rho g h \sin\alpha$$

avec τ_α = contrainte
ρ = masse volumique
g = gravité
h = épaisseur de la coulée
α = angle de la pente

Certains écoulements possèdent une vitesse initiale due à une chute aérienne depuis une colonne éruptive (coulée de pyroclastites) ou une falaise (avalanche de blocs). Dans le cas des souffles et déferlantes, la forte vitesse initiale et la détente des gaz magmatiques fournissent une force motrice importante qui peut conférer à ces phénomènes une relative indépendance vis-à-vis de la topographie.

Les forces de résistance au mouvement sont différentes selon la nature de l'écoulement.

Pour qu'un matériau se mette en mouvement, il doit d'abord subir une contrainte minimale que la loi de Coulomb permet d'estimer :

$\tau_s = C + \sigma \tan\Phi$ avec τ_s = contrainte
C = cohésion du matériau
σ = composante normale de la gravité
Φ = angle de friction interne

Cette loi, qui fournit une estimation du frottement solide, est très utilisée pour décrire le mouvement de sol ou les glissements de terrain solide. Les fluides à écoulement laminaire sont surtout freinés par des frottements internes, qui caractérisent leur viscosité.

Pour un fluide de Newton (comme l'eau) qui ne possède pas de seuil d'écoulement, on observe :

$\tau_N = \eta\,(du/dz)$ où τ_N = contrainte
η = viscosité
du/dz = gradient vertical de la vitesse de cisaillement

Avec un fluide de Bingham (lave, boue, neige dense), il faut tenir compte en plus du seuil d'écoulement, soit :

$\tau_B = \tau_Y + \eta\,(du/dz)$ où τ_Y = seuil d'écoulement

Les écoulements turbulents (coulées pyroclastiques, de turbidité, neige pulvérulente, gaz) sont beaucoup plus sensibles aux frottements turbulents contre le sol, dont l'équation de Chézy est une approximation utile :

$\tau_F = 0.5\, C_g\, \rho\, v^2$ avec τ_F = contrainte
C_g = coefficient de friction avec le sol
ρ = masse volumique
v = vitesse

et à la résistance de l'air, que l'on peut approcher par :

$d(Mv)/dt = -0.5\, \rho_a C_a A v^2$ où M = masse
v = vitesse
t = temps
ρ_a = masse volumique de l'air
C_a = coefficient de frottement avec l'air
A = surface de frottement

(MacEwen et al., 1989)

Afin de décrire les modalités mécaniques de l'écoulement, le modèle doit s'appuyer sur des lois de conservation et d'écoulement.

Les lois de conservation permettent de vérifier la conservation de la masse, du moment et de l'énergie.

Les lois d'écoulement permettent de gérer les transferts de matière. Il existe un grand nombre d'approches mathématiques des processus d'écoulement. Ce sont des lois théoriques issues de la mécanique des fluides, comme les équations de Navier-Stokes appliquées aux écoulements continus (coulée), celles de Barré de Saint Venant qui permettent d'estimer la progression d'un front d'onde et sont applicables aux écoulements discontinus (avalanches, déferlantes) :

$$\frac{\delta U}{\delta t} + U\frac{\delta U}{\delta x} + g\frac{\delta h}{\delta x} + g(Se-Ss) - \frac{q}{F}(U - v\cos\beta) = 0$$

$$\frac{\delta F}{\delta t} + U\frac{\delta F}{\delta x} - F\frac{\delta U}{\delta x} - q = 0$$

Barré de Saint Venant (Scheidegger, 1975)

celle de Hulme utilisée pour les fluides de Bingham :

$$\Delta q = \frac{\rho g \sin\alpha h y^3}{3\eta}\left[\left(\frac{hy}{h}\right)^3 - \frac{3}{2}\left(\frac{hy}{h}\right)^2 + \frac{1}{2}\right] w\Delta t$$

(Hulme, 1974)

ou celle de Salm destinée aux avalanches de neige :

$$m\frac{dv}{dt} = \frac{\rho_N - \rho_a}{\rho_N} mg \sin\beta - R$$

(Salm, 1966)

Quelques lois empiriques existent, qui tentent de mettre en relation la morphologie finale de la coulée avec les caractéristiques du matériau ou les conditions d'écoulement. Walker, par exemple, a décrit à l'Etna une loi empirique reliant la longueur et le débit moyen pour les coulées de lave de plus d'1 km :

$$L = 1 + 0.21Q$$

(Walker, 1973)

Le concept de ligne d'énergie permet de déduire l'extension (L) probable d'une avalanche de débris à partir de l'angle de friction interne (Φ) du matériau éboulé, du volume déplacé (V) et de la dénivellation (H) de l'écoulement.

$$\frac{H}{L} = \tan\Phi, \text{ avec } \Phi \text{ variable selon } C$$

(Hsü <u>in</u> Voight, 1978)

3.3 - Modèles d'écoulement

La modélisation des écoulements géologiques à risques existe depuis une vingtaine d'années, mais connaît depuis quelques années un développement très important. Ceci s'explique d'une part grâce à la progression de la connaissance de ces phénomènes et, d'autre part et surtout, par l'arrivée de moyens de calcul importants et à faibles coûts facilitant le développement des modèles numériques.

Il existe trois types de modèles d'écoulement.

3.3.1 - MODELES ANALYTIQUES

Un modèle analytique cherche à déterminer directement la valeur des paramètres de l'écoulement (par exemple la longueur finale d'une coulée) à partir de lois physiques d'écoulement (théoriques ou empiriques) et de la valeur initiale des paramètres (Fig. 8).

Compte tenu de l'abondance des paramètres en jeu et de l'irrégularité de la topographie, les écoulements gravitaires naturels ne sont pas modélisables de façon analytique sans simplifications importantes.

On doit limiter le nombre de paramètres, simplifier leurs lois de comportement, réaliser des écoulements à deux dimensions le long de profils topographiques.

Des modèles de ce type existent pour les avalanches (Pariseau, 1980), les coulées de boue (Cunningham, 1972) et de lave (Baloga, 1987 ; Dragoni et al., 1986, 1989).

3.3.2 - MODELES ANALOGIQUES

Ces modèles sont construits selon une approche plus empirique puisque l'on tente alors de reproduire les écoulements en laboratoire à échelle réduite (Fig. 9 et 10).

Un fluide, en général biphasé, dont les propriétés mécaniques et rhéologiques sont choisies de façon à se rapprocher de celles du fluide modélisé, en tenant compte des différences de nature et d'échelle, est répandu sur un plan incliné ou la maquette d'une surface topographique.

L'avantage de ce type d'expérience, réalisée en laboratoire et donc renouvelable à volonté, est surtout de permettre de poursuivre l'étude des mécanismes d'écoulement lorsque l'on manque d'observations de terrain. En lâchant des solutions argileuses sur des plans inclinés immergés dans de l'eau, on peut simuler l'écoulement turbulent de nuées ardentes (Huppert et al., 1986), de courants de turbidité (Allen, 1985) ou d'avalanches de neige pulvérulente (CEMAGREF, 1983). Les écoulements laminaires sont reproduits à

l'air libre sur plan incliné, ou maquette, en général par des silicones ou des solutions argileuses plus ou moins concentrées (Hulme, 1974 ; Condarelli et al., 1975). L'utilisation de gaz dense (fréon) permet de modéliser l'écoulement de déferlantes ou de gaz volcaniques (Havens et Spicer, 1983).

Les études de risque par modèle analogique sont orientées sur l'évaluation directe du risque lié à un écoulement sur un site donné. Cette méthode présente des inconvénients. Elle n'est pas applicable aux écoulements qui parcourent de grandes distances (dizaines de km). De plus, on n'imagine pas construire une maquette pour tous les sites menacés d'inondation, de glissement de terrain ou d'avalanche.

3.3.3 - MODELES NUMERIQUES

Ces modèles font appel à des méthodes de calcul numérique gérées par ordinateur. Contrairement aux approches analytique et analogique, les modèles numériques ne considèrent pas l'écoulement comme un phénomène continu, mais comme une suite de phénomènes discrets.

Le profil, ou la surface d'écoulement, obtenu d'après photo aérienne ou image satellite, est digitalisé et divisé en pas ou en mailles (selon qu'il y a deux ou trois dimensions). Pendant l'écoulement, les mouvements du fluide et l'évolution des paramètres sont recalculés par le modèle à chaque pas de temps depuis le début de l'écoulement jusqu'au moment choisi par l'utilisateur. Les méthodes de calcul numérique les plus utilisées sont les différences finies et les éléments finis, explicites ou implicites.

Les modèles numériques peuvent prendre en compte un nombre important de paramètres, et de lois de comportement, et simuler des écoulements sur une topographie complexe et modifiable (Fig. 9 à 14).

La modélisation numérique est déjà appliquée aux avalanches de neige (Hutter et al., 1986 ; Brugnot et Vila, 1985) ou de roches (MacEwen et al., 1989 ; Rochet, 1987), aux coulées de lave (Ishihara et al., 1984 ; Barca et al., 1988), de pyroclastites (MacEwen et al., 1983), de boue (Takahashi et al., 1984). Tous ces modèles donnent de bons résultats, bien que des progrès restent à faire dans l'acquisition des données de terrain qui permettent de les caler.

4 - CONCLUSIONS - PERSPECTIVES

Le cheminement d'un écoulement conditionne dans une large mesure le risque qu'il représente. Des catastrophes récentes (Nevado del Ruiz, Huascaran, St Helens) ont montré comment une coulée peut franchir des dizaines de km avant d'aller anéantir des sites que l'on aurait pu croire à l'abri.

Les pays en voie de développement sont au premier rang des pays concernés. Depuis trente ans, l'effet destructeur des catastrophes naturelles s'y intensifie car elles affectent des régions toujours plus peuplées. L'obstacle économique et social majeur au développement que constituent les catastrophes naturelles dans ces pays est désormais largement reconnu (rapport UNDRO, 1985).

Mais les pays développés sont loin d'être épargnés. Les seuls mouvements de terrain y sont si répandus et si fréquents dans certaines régions qu'ils peuvent se placer au premier rang en termes de coûts économiques et de pertes en vies humaines, avant les tremblements de terre, même dans des pays au risque sismique élevé (Flageollet, 1989). Aux U.S.A. ou au Japon, les mouvements de terrain causent en moyenne chaque année la mort de 25 à 100 personnes et provoquent pour 1 à 2 milliards de dollars de dégâts.

Le développement actuel rapide des méthodes de modélisation des écoulements géologiques répond à un besoin réel. La nouvelle décennie 1990-2000, déclarée décennie internationale pour la réduction des risques naturels, devrait les voir trouver un vaste champ d'application.

BIBLIOGRAPHIE

ALLEN J.R.L., 1985 - Principles of physical sedimentation. London, Georges Allen and Unwin.

BAGNOLD R.A., 1954 - Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear.

BAKKEHØI S., CHENG T., DOMAAS U., LIED K., PERLA R., SCHIELDROP B., 1981 - On the computation of parameters that model snow avalanche motion. Can. Geotech. J., 18, 121, p. 1-10.

BALOGA S., PIERI D., 1986 - Time-dependent profiles of lava flows. J. of Geophys. Research, 91, B9, p. 9543-9552.

BARCA D., CRISCI G.M., DI GREGORIO S., MARABINI S., NICOLETTA F.P., 1988 - Lava flow simulation by cellular automata and Pantelleria's example. Kagoshima Int. Conf. on Volcanoes, p. 475-478.

BEGET J.E., LIMKE A., 1988 - Two-dimensional kinematic and rheological modelling of the 1912 pyroclastic flow, Katmai, Alaska. Bull. Volcanol. , 50, p. 148-160.

BLONG R.J., 1973 - A numerical classification of selected landslides of the debris slide - avalanche - flow type. Engin. Geol., 7, p. 99-114.

BLONG R.J., 1984 - Volcanic hazards. Academic Press Australia, 423 p.

BOLT B.A., HORN W.L., MACDONALD G.A., SCOTT R.F., 1975 - Geological hazards : earthquakes, tsunamis, volcanoes, avalanches, landslides, floods. Springer Verlag, 328 p.

BOWEN A.J., NORMARK W.R., PIPER D.J.W., 1984 - Modelling of turbidity currents on navy submarine fan, California continental borderland. Sedimentology, 31, p. 169-185.

BRENNER R.P., MEIER R., UDIBOWO C., 1987 - Geotechnical properties of volcanic mud in a near-shore area of East Java. 9th Southeast Asian Geotechnical Conf., Bangkok, Thailand, 5, p. 13-24.

BRITTER R.E., SIMPSON J.E., 1978 - Experiments on the dynamics of a gravity current head. J. Fluid. Mech., 88, part 2, p. 223-240.

BRUGNOT G., POCHAT R., 1981 - Numerical simulation study of avalanches. J. Glaciology, 27, 95, p. 77-88.

BRUGNOT G., VILA J.P., 1985 - Investigation théorique et expérimentale des caractéristiques dynamiques des avalanches de neige dense. La Houille Blanche, n° 2, p. 133-142.

CAS R.A.F., WRIGHT J.V., 1987 - Volcanic successions modern and ancient : a geological approach to processes, products and successions. Allen & Unwin, 528 p.

CHU C.K., 1978 - Numerical methods in fluid dynamics. Advances in applied mechanics, 18, p. 285-331.

CLARKE G.K.C., 1987 - Fast glacier flow : ice streams, surging and tide water glacier. J. Geophys. Research, 92, B9, p. 8835-8843.

Comité Supérieur d'Evaluation des Risques Volcaniques, 1986 - Risques d'éruption gazeuse carbonique en Auvergne. Rapport préliminaire établi par le Centre de Recherches Volcanologiques de Clermont-Ferrand, 19 p.

CONDARELLI D., LECHI G.M., LO GIUDICE E., TONELLI A.A., 1975 - Studio di fattibilita di un modello fisico-matematico dell'Etna nel quadro di una zonizzazione vulcanica. Rivista Mineraria Siciliana, n° 151-153, p. 27-40.

COROMINAS J., MORENO M., 1988 - Mechanism of mudflow : a case study in the Spanish Eastern Pyrenees. In Landslides, Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, Bonnard C. (Ed.), p. 589-594.

CUNNINGHAM M.J., 1972 - A mathematical model of the physical processes of an earthflow. J. of Hydrology, 11, 1, p. 47-54.

DAMUTH J.E., EMBLEY R.W., 1979 - Upslope flow of turbidity currents on the Northwest flank of the Ceara Rise : Western Equatorial Atlantic. Sedimentology, 26, p. 825-834.

DANES Z.F., 1972 - Dynamics of lava flows. J. Geophys. Research, 77, 8, p. 1430-1432.

DENT J.D., LANG T.E., 1980 - Modelling of snow flow. J. of Glaciology, 20, 94, p. 131-140.

DENT J.D., LANG T.E., 1983 - A biviscous modified Bingham model of snow avalanche motion. Annals of Glaciology, 4, p. 42-46.

DOLLFUS O., PENAHERRERA C., 1962 - La lave torrentielle du 10 janvier 1962 dans la Cordillère Blanche (Pérou). Rev. Géomorph. Dyn., Ed. SEDES, T. XIII, p. 10-17.

DRAGONI M., 1989 - A dynamical model of lava flows cooling by radiation. Bull. Volcanol. n° 51, p. 88-95.

DRAGONI M., BONAFEDE M., BOSCHI E., 1986 - Downslope flow models of a Bingham liquid : implications for lava flows. J. of Volc. and Geoth. Res., 30, p. 305-325.

EIDSVIK K.J., 1980 - A model for heavy gas dispersion in the atmosphere. Atmospheric Environment, 14, p. 769-777.

ENOS P., 1977 - Flow regimes in debris flow. Sedimentology, 24, p. 133-142.

EPPLER D.B., FINK J., FLETCHER R., 1987 - Rheologic properties and kinematics of emplacement of the chaos jumbles rockfall avalanche, Lanen Volcanic National Park, California. J. of Geophys. Research, 92, B5, p. 3623-3633.

ERISMANN T.H., 1986 - Flowing, rolling, bouncing, sliding : synopsis of basic mechanisms. Acta Mechanica, 64, p. 101-110.

FASTHOOK J.L., 1987 - Use of a new finite element continuity model to study the transient behavior of ice stream and causes of its presents low velocity. J. of Geophys. Research, 92, B9, p. 8941-8951.

FISHER R.V., SCHMINCKE H.U., BOGAARD P.V., 1983 - Origin and emplacement of a pyroclastic flow and surge unit at Laacher See, Germany. J. of Volc. and Geoth. Res., 17, p. 375-392.

FLAGEOLLET J.C., 1989 - Les mouvements de terrain et leur prévention. Ed. MASSON, 224 p.

HAMPTON M.A., 1979 - Buoyancy in debris flows. J. of Sediment. Petrol., 49, 3, p. 753-758.

HARBAUGH J.W., BONHAM-CARTER G., 1970 - Computer simulation in geology. Wiley & Sons Inc., 575 p.

HEEZEN B.C., EWING M., 1952 - Turbidity currents and submarine slumps, and the 1929 Grand Bank earthquake. Am. J. Science, n° 250, p. 849-873.

HIGGINS J.D., BIJAYANANDA N., MILLS S., COPP H., ROBERTSON J.A., 1983 - The mechanics of mudflows. Report 51, State of Washington Water Research Center, 116 p.

HOPFINGER E.J., 1983 - Snow avalanche motion and related phenomena. Ann. Rev. Fluid. Mech., 15, p. 47-76.

HULME G., 1974 - The interpretation of lava flow morphology. Geophys. J. R. Astr. Soc., 39, p. 361-383.

HUPPERT H.E., TURNER J.S., CAREY S.N., SPARKS R.S.J., HALLWORTH M.A., 1986 - A laboratory simulation of pyroclastic flows down slopes. J. of Volc. and Geoth. Res., 30, p. 179-189.

HUTTER K., SZIDAROVSZKY F., YAKOWITZ S., 1986 - Plane steady shear flow of a cohesionless granular material down an inclined plane : a model for flow avalanches. Part I : Theory. Acta Mechanica, 63, p. 87-112.

IKEYA H., 1981 - A method of designation for area in danger of debris flow. Erosion and sediment transport in Pacific rim steeplands. I.A.H.S. Publ., n° 132, p. 576-588.

IKEYA H., 1989 - Debris flow and its countermeasures in Japan. Bull. Ann. Int. Géol. Ing., 40, p. 15-35.

ISHIHARA K., IGUCHI M., KAMO K., 1984 - A numerical simulation of basaltic lava flows and its application to the 1983 lava flows at Miyahejima.

Bull. Volcanol. Soc. Japan, 29, 2e series, Special issue (en japonais), p. 5242-5252.

JANDA R.J., SCOTT K.M., NOLAN K.M., MARTINSON H.A., 1981 - Lahar movement, effects, and deposits in the 1980 eruptions of Mt St Helens. Washington, D.W. Lipman and D.R. Mullineaux (Eds.), U.S.G.S. Prof. Paper 1250, p. 461-478.

JOHNSON A.M., 1970 - Physical processes in geology. Freeman, Cooper & Co.

JUDSON A., KING R.M., BRINK G.E., 1986 - Multi-basin avalanche simulation : a model. Cold Regions Science and Technology, 13, p. 35-47.

KEEFER D.K., JOHNSON A.M., 1983 - Earth flows : morphology, mobilization and movement. U.S.G.S. Prof. Paper 1264.

KENT P.E., 1965 - The transport mechanism in catastrophic rock falls. Journal of Geology, 74, p. 79-83.

KIEFFER S.W., 1981 - Fluid dynamics of the May 18 blast at Mount St Helens in the 1980 eruptions of Mt St Helens. Washington, D.W. Lipman and D.R. Mullineaux (Eds.), U.S.G.S. Prof. Paper 1250.

KIRWAN A.D., DOYLE L.J., BOWLES W.D., BROOKS G.R., 1986 - Time-dependent hydrodynamic models of turbidity currents analysed with data from the Grand Banks and Orleansville events. J. of Sediment. Petrol., 56, 3, p. 379-386.

KOBAYASHI Y., KAGAWA T., 1986 - Analysis of flow process of debris avalanches induced by earthquakes. Geologia Applicata e Idrogeologia, XXI, p. 77-89.

KOMAR P.D., 1977 - Computer simulation of turbidity current flow and the study of deep-sea channels and fan sedimentation. In The Sea, marine modelling, Goldberg et al. (Eds.), New-York, Wiley Interscience.

LAFFORGUE T., 1990 - Modélisation numérique des coulées de lave. Thèse de Doctorat, Université Paris XI.

LE GUERN F., TAZIEFF H., FAIVRE-PIERRET R., 1982 - An example of health hazard : people killed by gas during a phreatic eruption : Dieng Plateau (Java, Indonesia), Feb. 20th, 1979. Bull. Volcanol., 45, 2, p. 153-156.

LIED K., BAKKEHØI S., 1980 - Empirical calculations of snow-avalanche run-out distance based on topographic parameters. J. of Glaciology, 26, 94, p. 165-177.

LYATKHER V.M., KVASHILAVA N.G., 1984 - Mechanical model of the occurrence of mudflows. Research Department, All-union Planning.

MACEWEN A.S., MALIN M.C., 1989 - Dynamics of Mount St Helens 1980 pyroclastic flows, rockslide-avalanche, lahars, and blast. J. of Volc. Geoth. Res., 37, p. 205-231.

MAJOR J.J., NEWHALL C.G., 1989 - Snow and ice perturbation during historical volcanic eruptions and the formation of lahars and floods : a global review. Bull. Volcanol., 52, p. 1-27.

MALIN M.C., SHERIDAN M.F., 1982 - Computer-assisted mapping of pyroclastic surges. Science, 217, p. 637-640.

MELOSH H.J., 1983 - Acoustic fluidization. American Scientist, 71, p. 158-165.

MELOSH H.J., 1987 - The mechanics of large rock avalanches. Geol. Soc. America, Review in Engineering Geology, VII, p. 41-49.

MIDDLETON G.V., HAMPTON M.A., 1973 - Sediment gravity flows : mechanics of flow and deposition. SEPM Pacific Section Short Course Anaheim 1973, Turbidites and Deep Water Sedimentation, p. 1-31.

Ministère de la Coopération - Rapport présenté par H. Tazieff, R.X. Faivre Pierret, F. Le Guern, R.M. Chevrier - "La catastrophe du lac Nyos". 76 p.

Ministère de l'Agriculture, CEMAGREF, 1983 - Neige et avalanche. Rapport CEMAGREF, 78 p.

Ministère de l'Environnement, D.R.M., 1987 - Etude d'un système de surveillance pour le lac Nyos et d'autres lacs à risque au Cameroun. Rapport D.R.M., 132 p.

MUCK M.T., UNDERWOOD M.B., 1990 - Upslode flow of turbidity currents : a comparison among field observations, theory, and laboratory models. Geology, 18, p. 54-57.

NOH W.F., PROTTER M.H., 1963 - Difference methods and the equations of hydrodynamics. J. of Mathematics and Mechanics, 12, 2, p. 149-191.

NOYE J., 1978 - Numerical simulation of fluid motion. North-Holland Publishing Co., Proc. Int. Conf. Numerical Simulation of Fluid Dynamic Systems, Monash University, Melbourne, 1976, 580 p.

NYE J.F., 1951 - The flow of glaciers and ice-sheets as a problem in plasticity. Proc. Royal Society of London, Series A., 207, p. 554-572.

NYE J.F., 1952 - The mechanics of glacier flow. J. of Glaciology, 2, 11-20, p. 82-93.

Office of the United Nations Disaster Relief Co-Ordinator (UNDRO), Genève, 1985 - Volcanic emergency management. New-York, 86 p.

ORZAG S.A., ISRAEI M., 1974 - Numerical simulation of viscous incompressible flows. Ann. Rev. Fluid Mech., p. 281-318.

PARISEAU W.G., 1980 - A simple mechanical model for rockslides and avalanches. Engin. Geol., 16, p. 111-123.

PARK S., IVERSEN J.D., 1984 - Dynamics of lava flows : thickness growth characteristics of steady two-dimensional flow. Geoph. Res. Lett., 11, 7, p. 641-644.

PIERSON T.C., SCOTT K.M., 1985 - Downstream dilution of a lahar : transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. Water Resources Res., 21, 10, p. 1511-1524.

PIPER D.J.W., NORMARK W.R., 1983 - Turbidite depositional patterns and flow characteristics, Navy Submarine Fan, California Borderland. Sedimentology, 30, p. 681-694.

SALM B., 1966 - Contribution to avalanche dynamics. Publ. Ind. Assoc. Hydrol. Sc., 69, p. 199-214.

SATAKE K., 1989 - New ride on an old wave. EOS, 6 June 1989, p. 636.

SAURET B., 1985 - Coulée de boue, laves torrentielles : étude bibliographique. Rapport du Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement, 137 p.

SCHEIDEGGER A.E., 1973 - On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. Rock Mechanics, 5, p. 231-236.

SCHEIDEGGER A.E., 1975 - Physical aspects of natural catastrophes. Elsevier Scientific Publishing Co., 289 p.

SHERIDAN M.F., 1979 - Emplacement of pyroclastic flows : a review. Geol. Soc. America, Special Paper 180, p. 125-136.

SHERIDAN M.F., MALIN M.C., 1983 - Application of computer-assisted mapping to volcanic hazard evaluation of surge eruptions : Vulcano, Lipari and Vesuvius. J. of Volc. Geoth. Res., 17, p. 187-202.

SHERMAN B., 1978 - Kinematic wave models for overland flow. Quarterly Applied Mathematics, January 1978, p. 435-444.

SIGURDSON H., DEVINE J.D., TCHOUA F.M., PRESSER T.S., PRINGLE M.K.W., EVANS W.C., 1987 - Origin of the lethal gas burst from Lake Monoun, Cameroun. J. of Volc. Geoth. Res., 31, p. 1-16.

SPARKS R.S.J., WILSON L., HULME G., 1978 - Theoretical modelling of the generation, movement and emplacement of pyroclastic flows by column collapse. J. of Geophys. Res., 83, B4, p. 1727-1739.

STOW D.A.V., BOWEN A.J., 1980 - A physical model for the transport and sorting of fine-grained sediment by turbidity currents. Sedimentology, 27, p. 31-46.

SZIDAROUSZKY F., HUTTER K., YAKOWITZ S., 1986 - A new theory and numerical method for solving plane steady chute flows of a granular material : application to flow avalanches. Mitteilungen der Versuchandstalt für Wasserbau Hydrologie und Glaziologie, n° 89, 106 p.

ROCHET L., 1987 - Application des modèles numériques de propagation à l'étude des éboulements rocheux. Bull. Liaison L.C.P.C., 150/151, p. 84-95.

RÖTHLISBERGER H., 1987 - Sliding phenomena in a steep section of Balmhorngletsher, Switzerland. J. of Geophys. Res., 92, B9, p. 8999-9 015.

ROTTMAN J.W., SIMPSON J.E., 1983 - The initial development of gravity currents from fixed volume releases of heavy fluid. In Atmospheric Dispersion of Heavy Gases and Small Particules, Ooms G. and Tenneker (Eds.), Springer-Verlag, Berlin, p. 347-395.

TAKAHASHI T., 1978 - Mechanical characteristics of debris flow. J. of Hydraulics Division, HY 8, p. 1153-1169.

TAKAHASHI T., TSUJIMOTO H., 1984 - Numerical simulation of flooding and deposition of a debris flow. Disaster Prevention Res. Int. Ann., n° 27B2, p. 1-19 (en japonais).

TAKAHASHI T., NAKAGAWA H., KANOU S., 1984 - Characteristics of the overland flood flows and the sedimentation due to breaking of the levee in the urban area. Disaster Prevention Res. Inst. Ann., n° 27B2, p. 1-15 (en japonais).

TURCOTTE D., SCHUBERT G., 1982 - Geodynamics : applications of continuum physics to geological problems.

VALLEJO L.E., 1979 - An explanation for mudflows. Géotechnique, 29, 3, p. 351-354.

VALLEJO L.E., 1980 - Mechanics of mudflow mobilization in low angled clay sloper. Engin. Geol., 16, p. 63-70.

VARNES D.J., 1978 - Slope movement types and processes. In Landslides - Analysis and control, R.L. Schuster and R.J. Krizck (Eds.), Nat. Ac. Sciences Transportation Res. Board, Special Report 176, p. 11-33.

VILA J.P., 1984 - Modélisation mathématique et simulation numérique d'écoulements à surface libre. La Houille Blanche, n° 617, p. 485-489.

VOIGHT B., 1978 - Rockslides and avalanches. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam.

VOIGHT B., 1988 - Earth and Min. Sci., 57, 2, p. 17-30.

VOIGHT B., JANDA R.J., GLICKEN H., DOUGLASS P.M., 1983 - Nature and mechanics of the Mount St Helezns rockslide-avalanche of 18 May 1980. Géotechnique, 33, p. 243-273.

WALKER G.P.L., 1973 - Lengths of lave flows. Roy. Soc. Lond. Phil. Trans. Sci., A, V. 274, p. 107-118.

WARD T., O'BRIEN J.S., 1981 - Hydraulic and rheologic modelling of mud and grain flows. Erosion and sediment transport in Pacific rims steeplands, I.A.H.S. Publ., n° 732, p. 269-286.

WESTERCAMP D., 1985 - La prévision générale des risques volcaniques. Méthodologie, application à la Montagne Pelée. Rapport BRGM n° 85 SGN 421 IRG.

WILLIAMS S.N., 1987 - Nevado del Ruiz volcano, Colombia : the November 1985 eruption and related events. J. of Volc. Geoth., 33, p. 355-360.

WILSON C.J.N., 1980 - The role of fluidization in the emplacement of pyroclastic flows : an experimental approach. J. of Volc. Geoth., 8, p. 231-249.

WILSON C.J.N., 1984 - The role of fluidization in the emplacement of pyroclastic flows ; 2 : experimental results and their interpretation. J. of Volc. Geoth., 20, p. 55-84.

WOHLETZ K.H., SHERIDAN M.F., 1979 - A model of pyroclastic surge. Geol. Soc. America, Special Paper 180, p. 177-194.

A N N E X E S

F I G U R E S

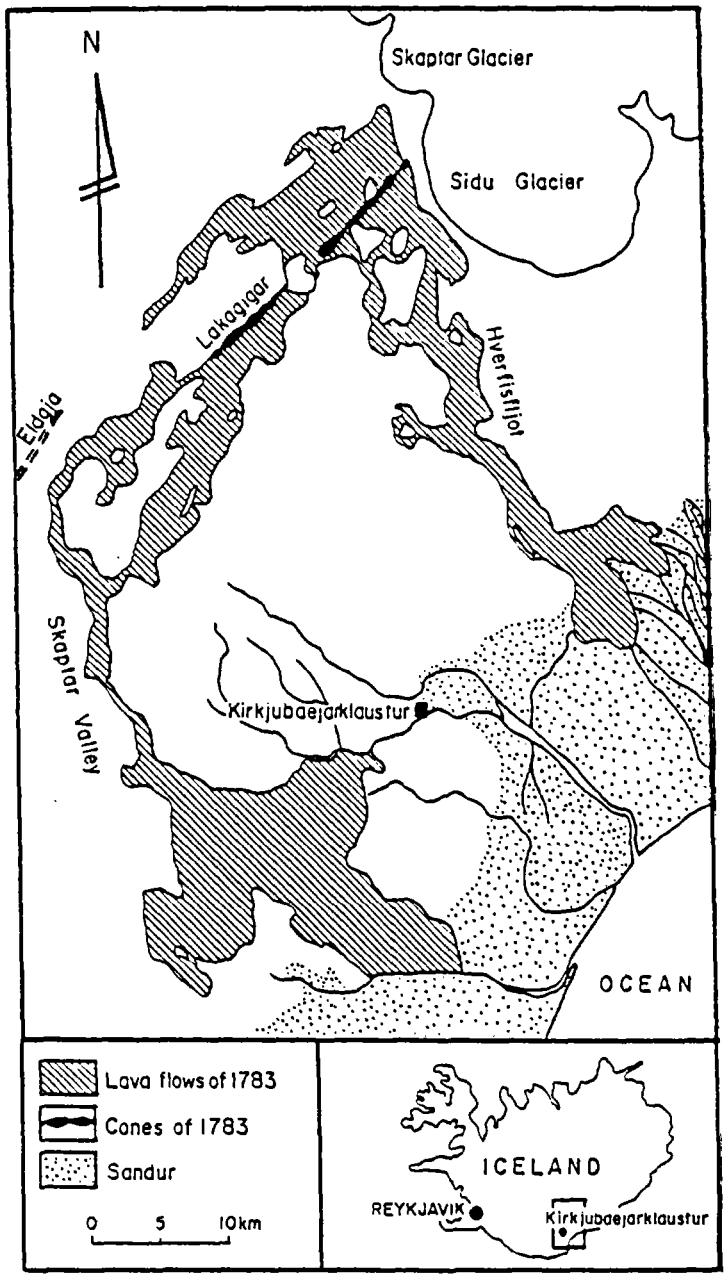


Fig. 1 - Coulée de basalte de Lakagigar, 1783-84 au Laki, Islande (d'après Blong, 1984)

La surface recouverte est de 550 km², le volume total de 12,3 km³

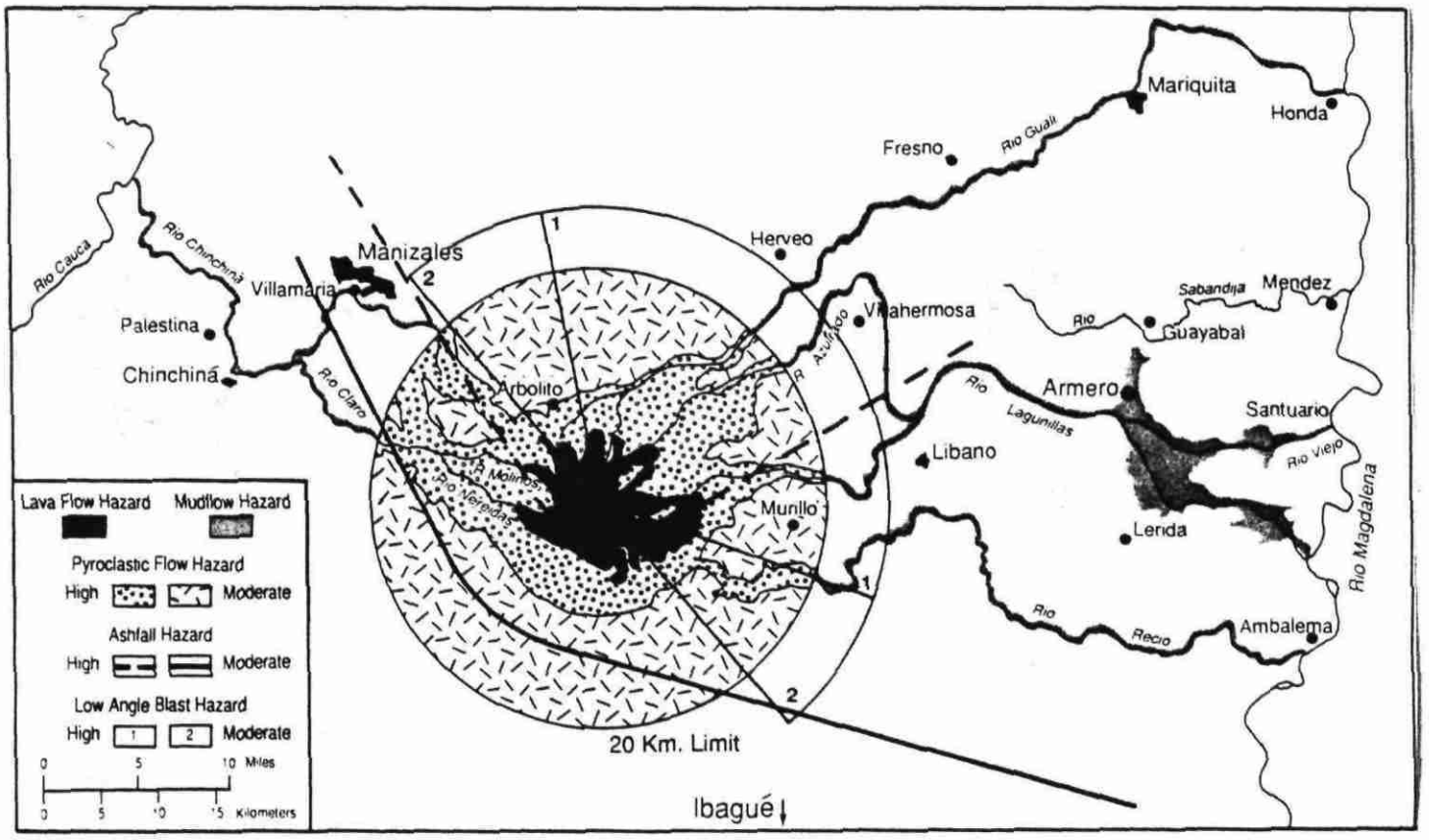


Fig. 2 - Carte de risques volcaniques au Nevado del Ruiz, Colombie (d'après INGEOMINAS in Voight, 1988)

Lors de l'éruption de 1985, des lahars ont dévalé les Rio Guali, Chinchina et Azufrado-Lagunillas. La ville d'Armero a été complètement détruite.

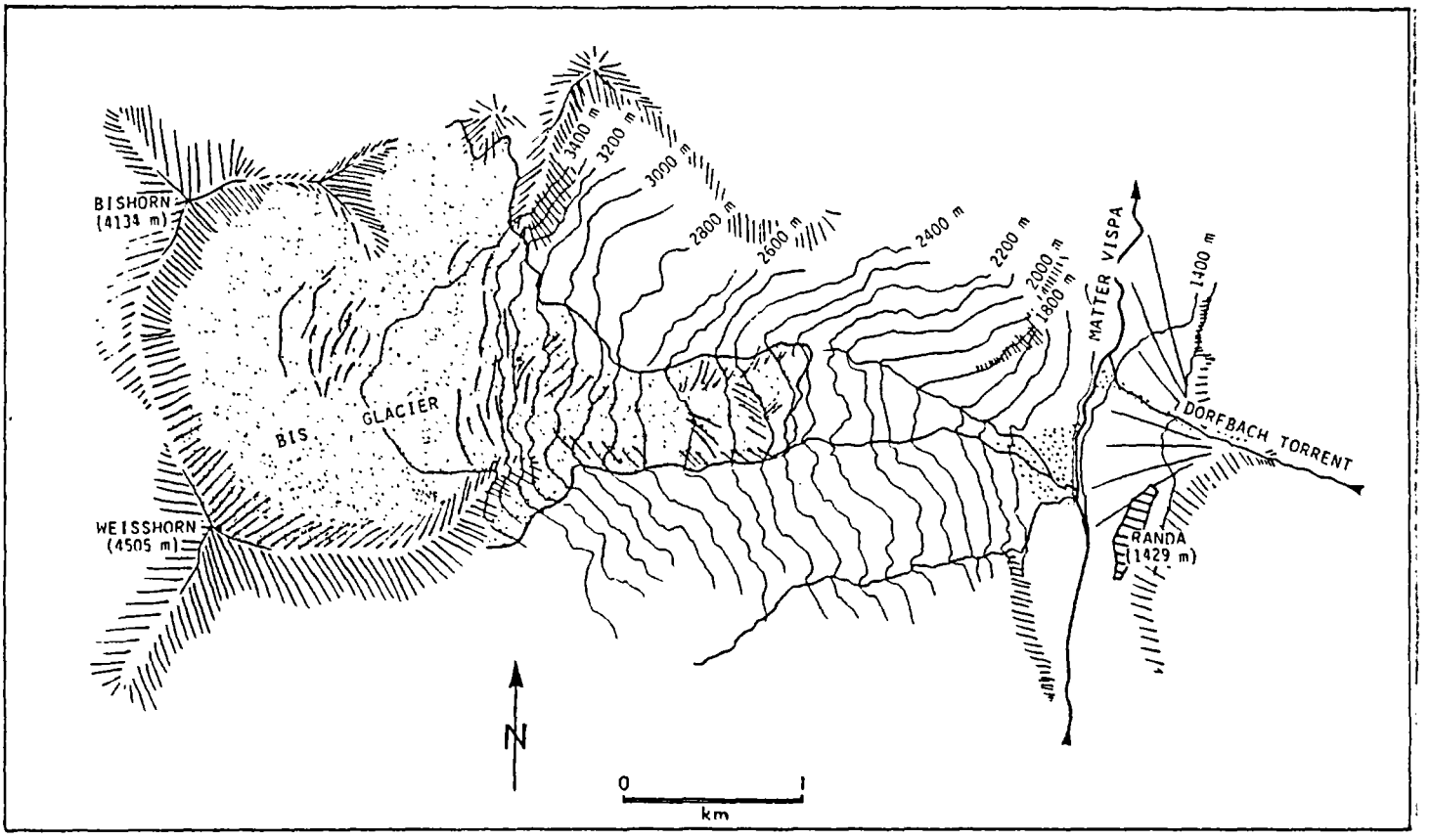


Fig. 3 - Carte du glacier Bis et du village de Randa dans la vallée Matter, Suisse (in Eisbacher et Clague, 1984)

Les mouvements du glacier provoquent régulièrement des avalanches de glace. Depuis 3 siècles, une dizaine d'avalanches, d'un volume pouvant dépasser 10^7 m^3, ont atteint le village de Randa ou ses environs proches.

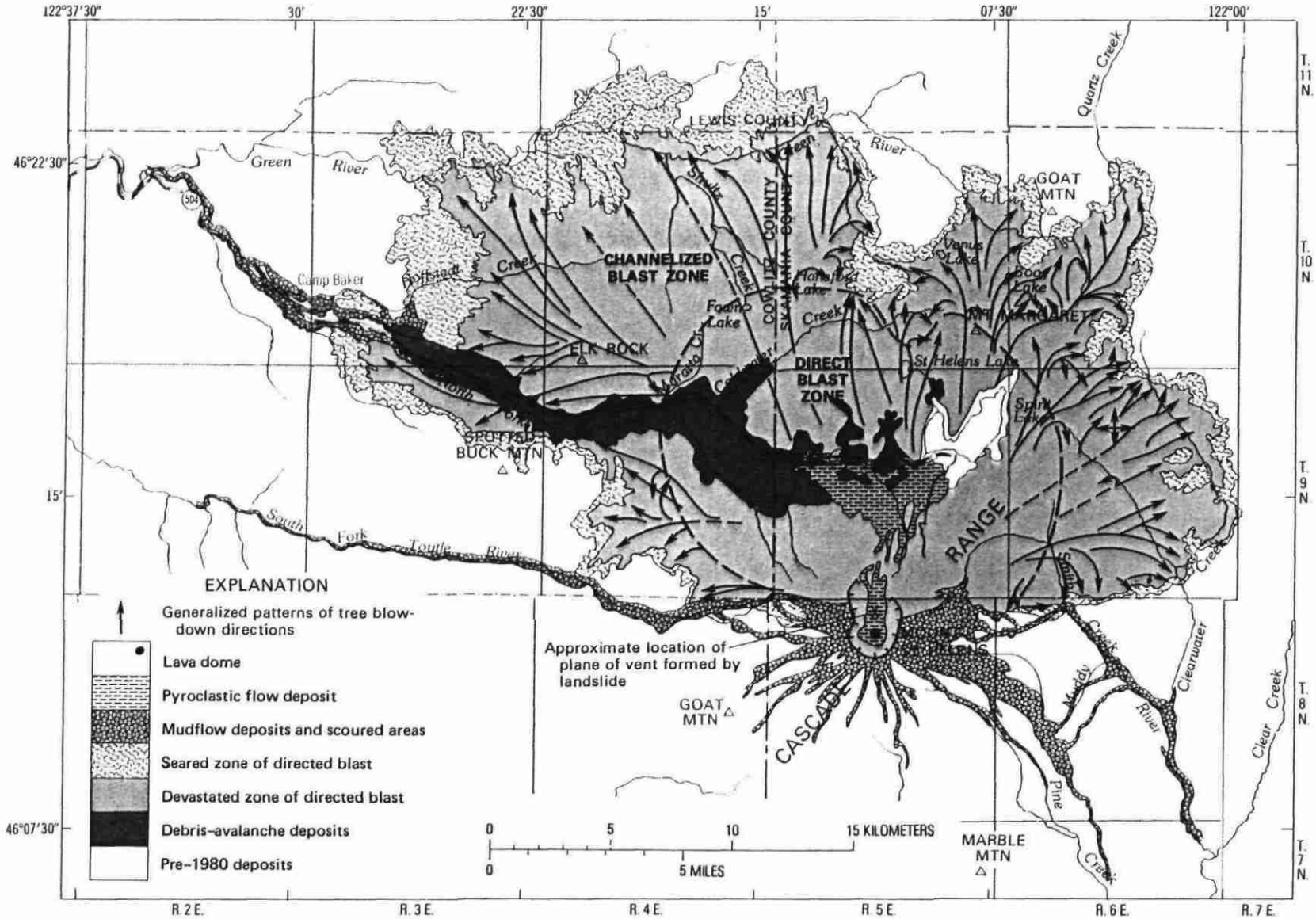
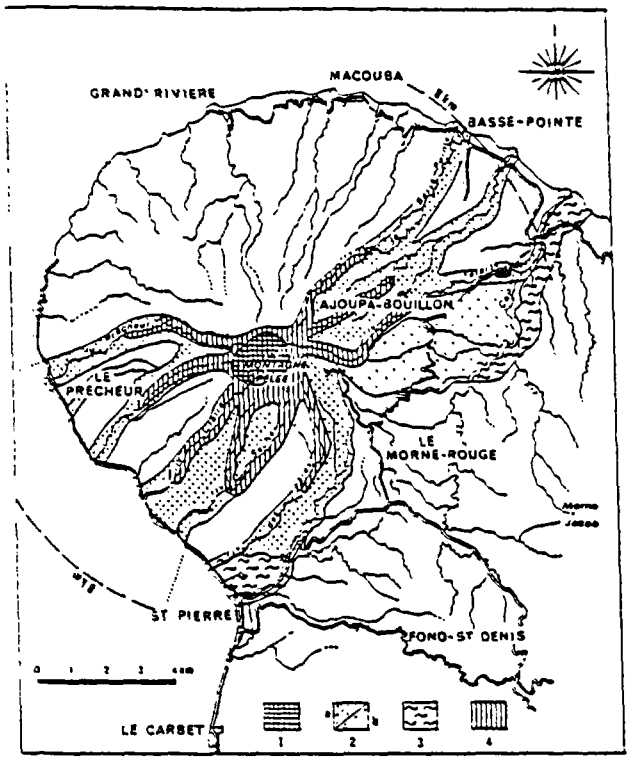
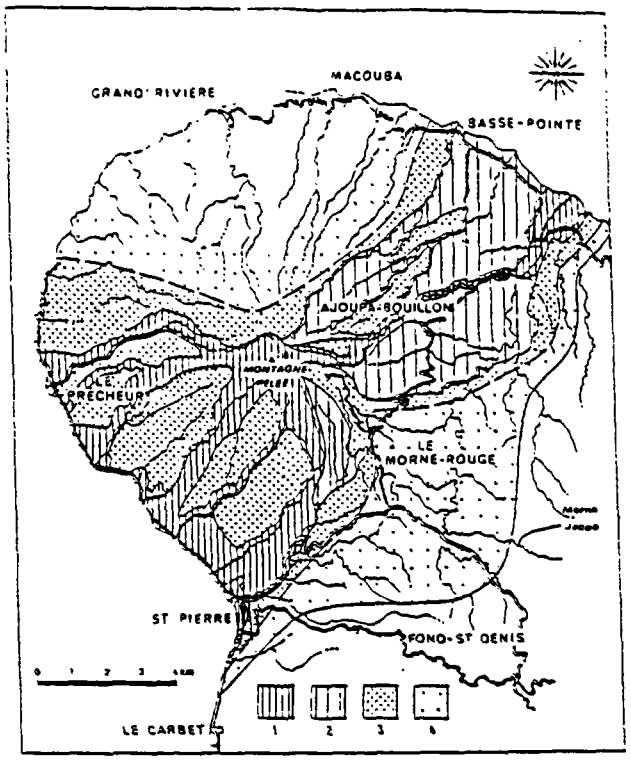


Fig. 4 - Cartographie des différents écoulements provoqués par l'éruption du 10 mai 1980 au Mont St Helens, USA (d'après Kieffer, 1981)

(Avalanche de débris, souffle, coulées de pyroclastes, coulées de boue)



5a - Risques liés aux nuées ardentes (1, 2) et aux phénomènes associés : souffles et lahars (3), avalanches incandescentes (4)



5b - Risques liés aux coulées de ponces (1, 2) et aux phénomènes associés : déferlantes (3), chute de cendres (4)

Fig. 5 - Cartographie des risques liés aux nuées ardentes et coulées de ponces à la Montagne Pelée, Martinique (d'après Westercamp, 1985)

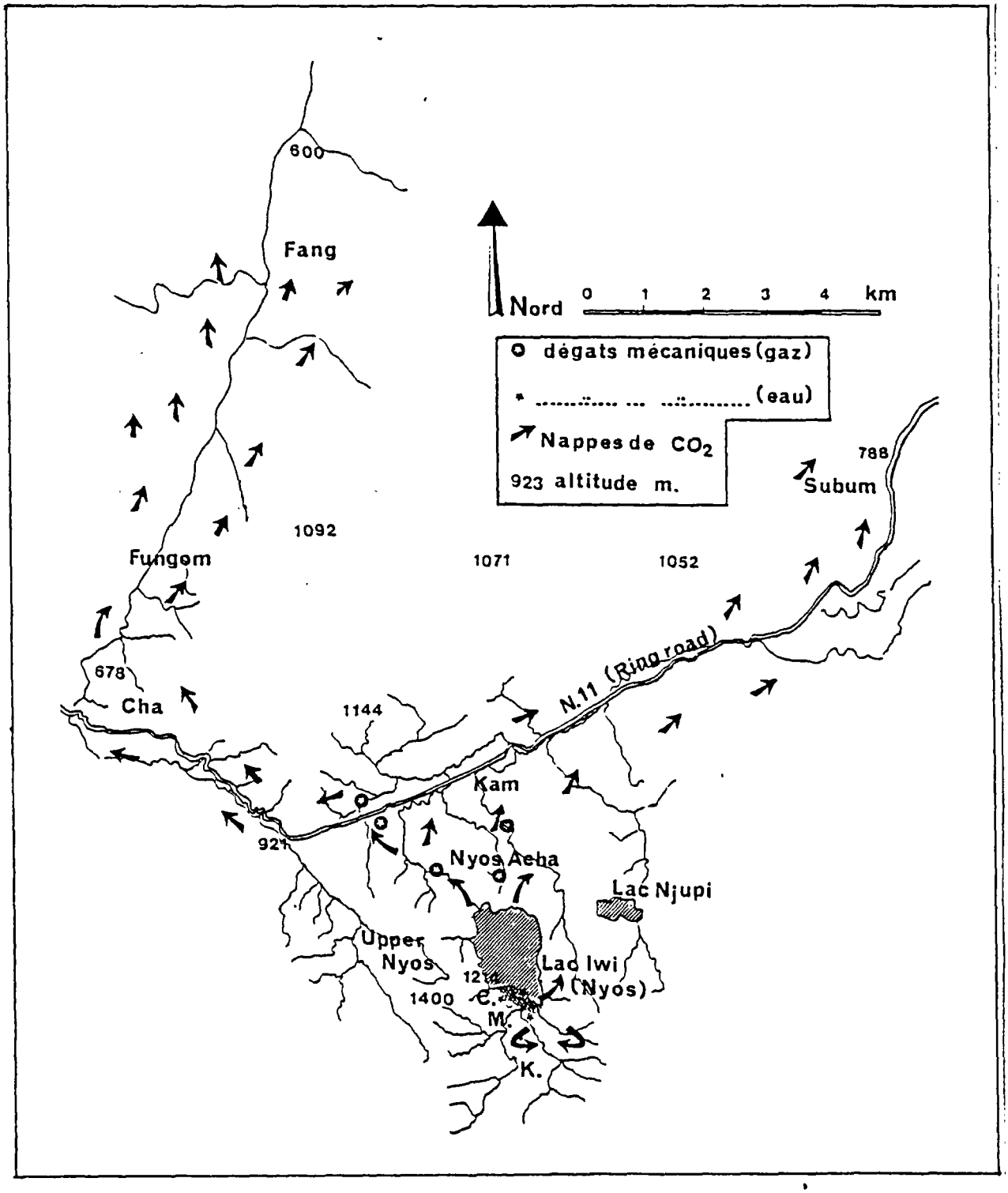


Fig. 6 - Répartition des gaz issus du lac Nyos, Cameroun, le 21 août 1986 (rapport du Ministère de la Coopération)

L'écoulement s'est propagé sous la forme d'une vague de 10 à 50 m d'épaisseur.

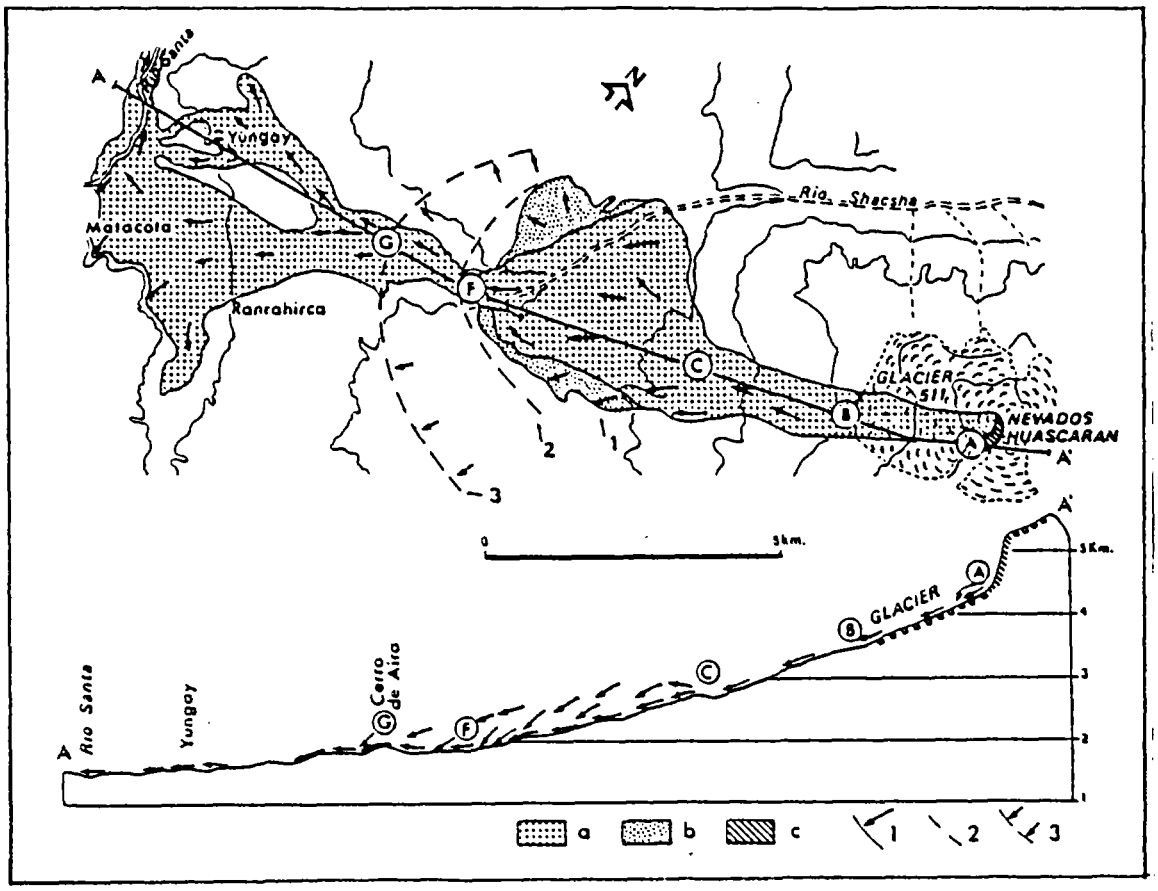
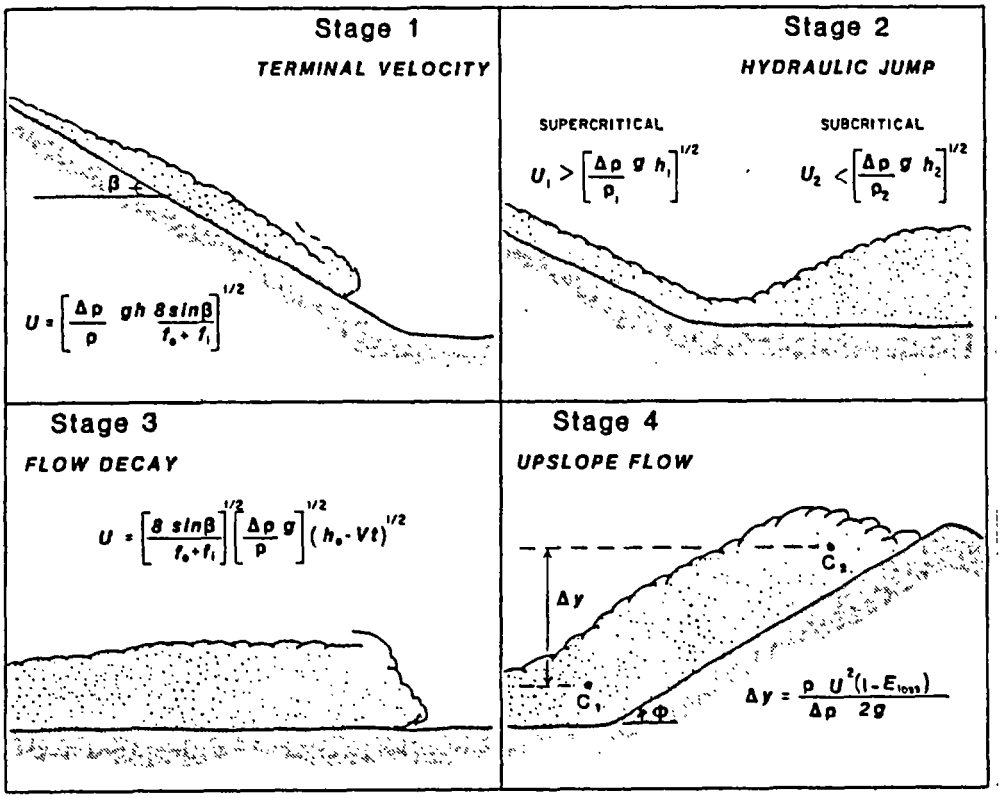
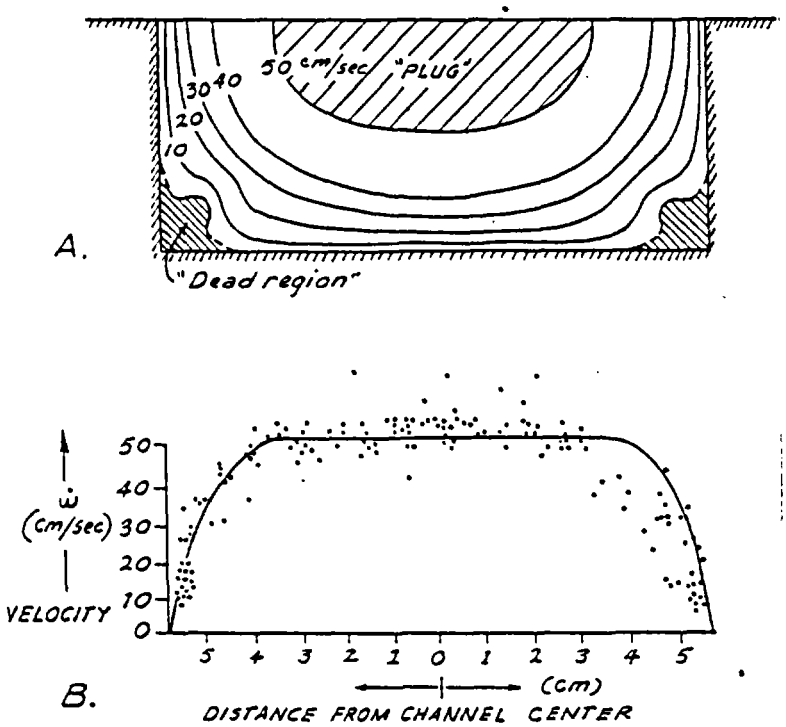


Fig. 7 - Plan et profil de l'avalanche du Huascaran, Pérou, en 1970 (d'après Plafker, 1978 in Flageollet, 1989)

a : aire de l'avalanche de débris ; b : aire de projection de boue et blocs ; c : écroulement ; 1 : limite des impacts de blocs projetés ; 2 : limite des arbres abattus ; 3 : limite du souffle de boue.

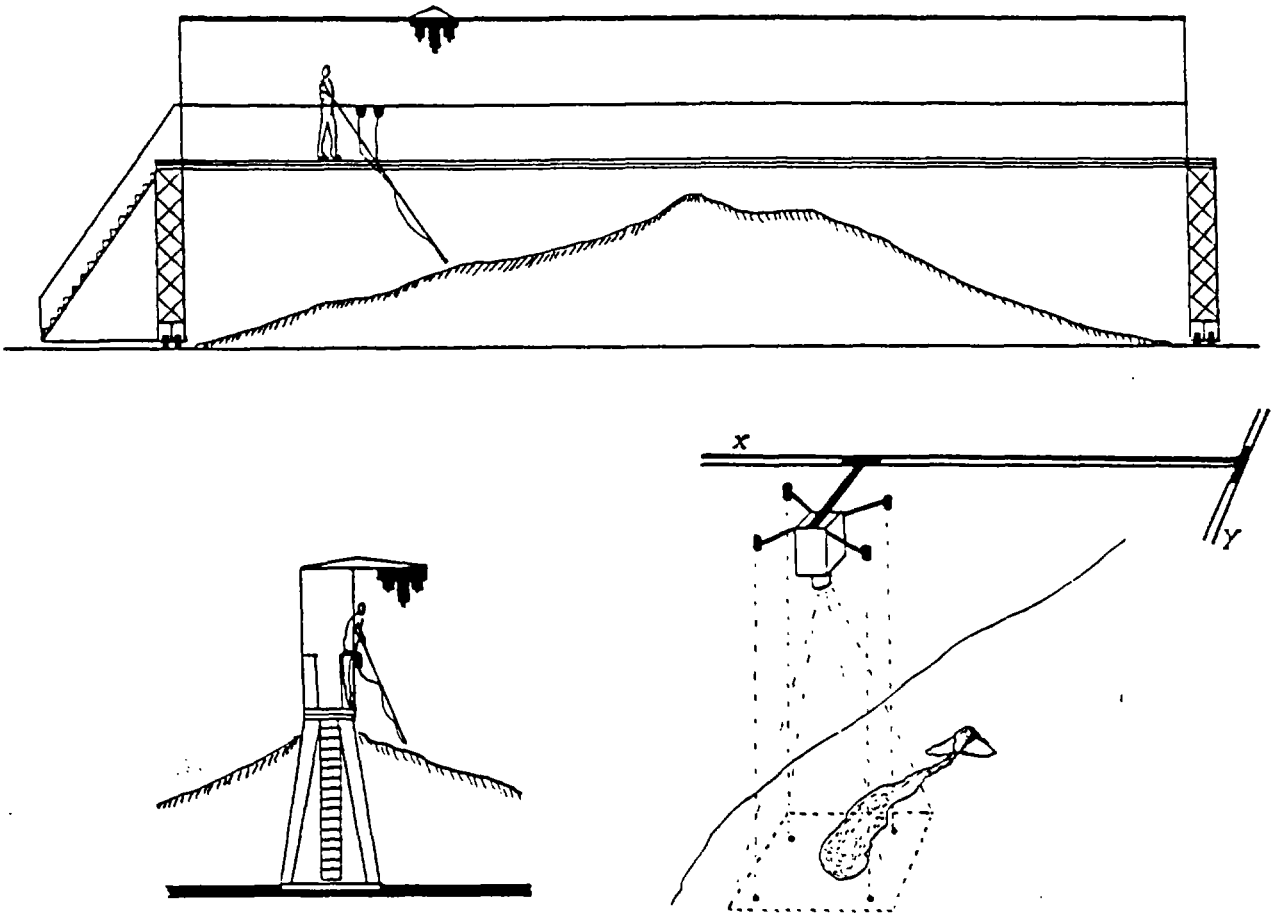


8a - Courant de turbidité (in Muck et Underwood, 1990)



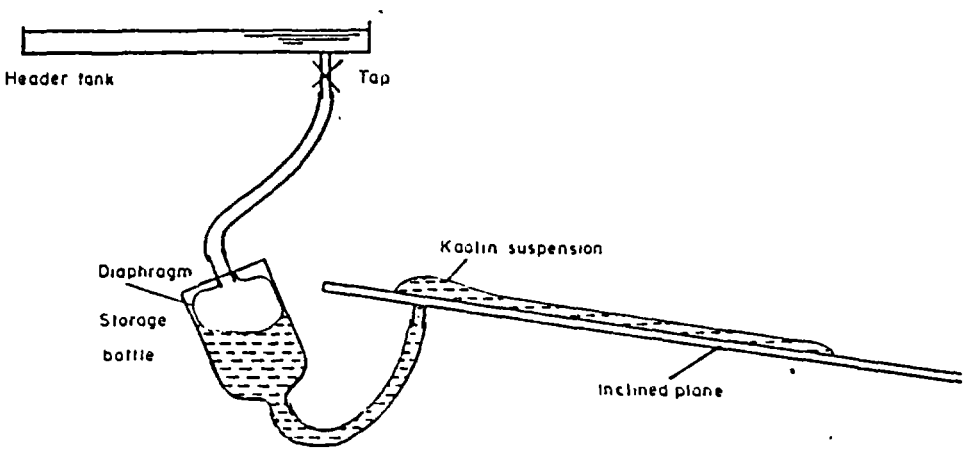
8b - Coulée de boue (in Johnson, 1970)
Diagramme inférieur : trait plein - courbe théorique (éq. Navier-Stokes)
points - mesures sur modèle analogique

Fig. 8 - Approche analytique de la dynamique d'un écoulement



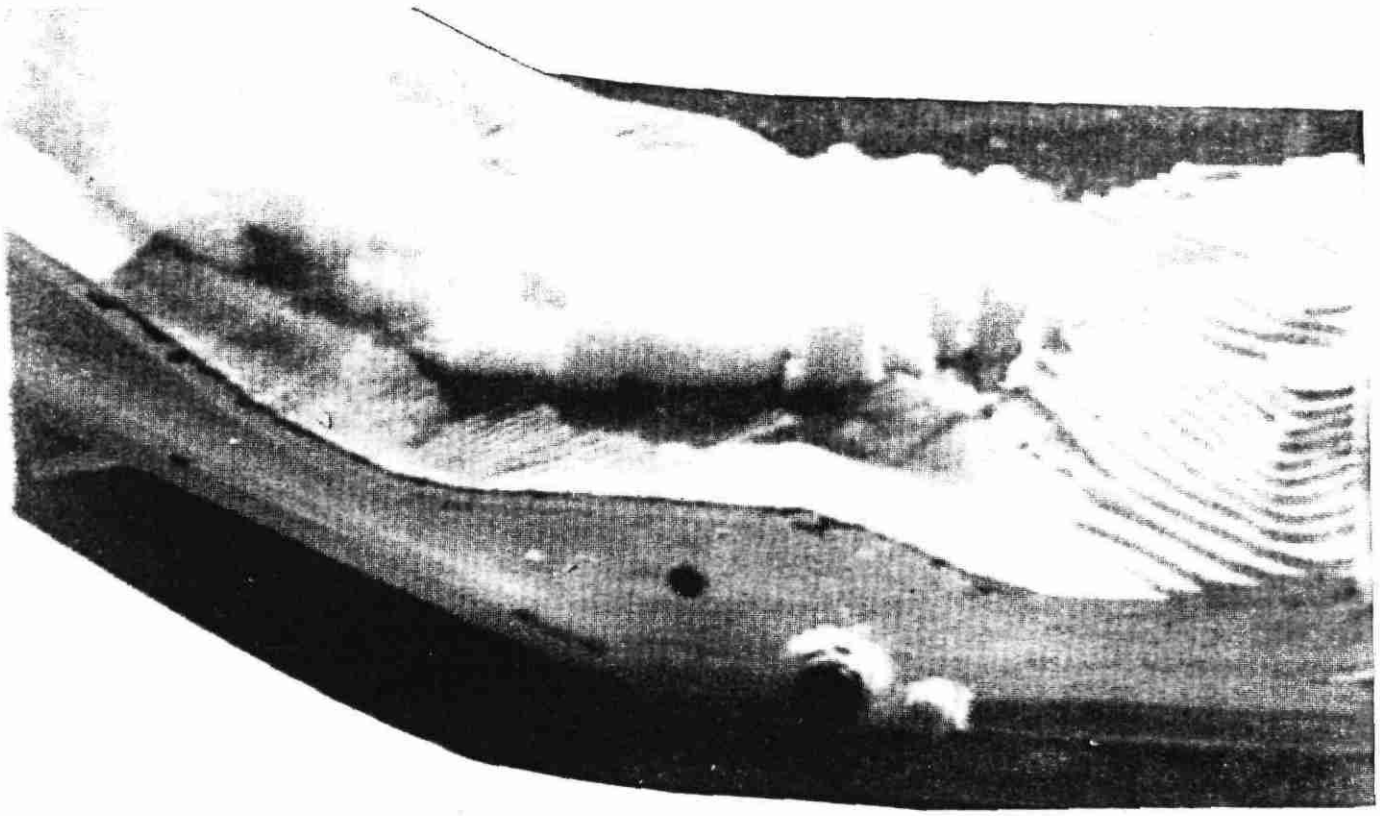
9a - Modélisation de coulées de lave sur maquette (Etna, Italie, au 1/2 000) (in Condarelli et al., 1975)

Le fluide thermostaté est introduit grâce à une canne. Une caméra et 4 colimateurs permettent de suivre sa progression.

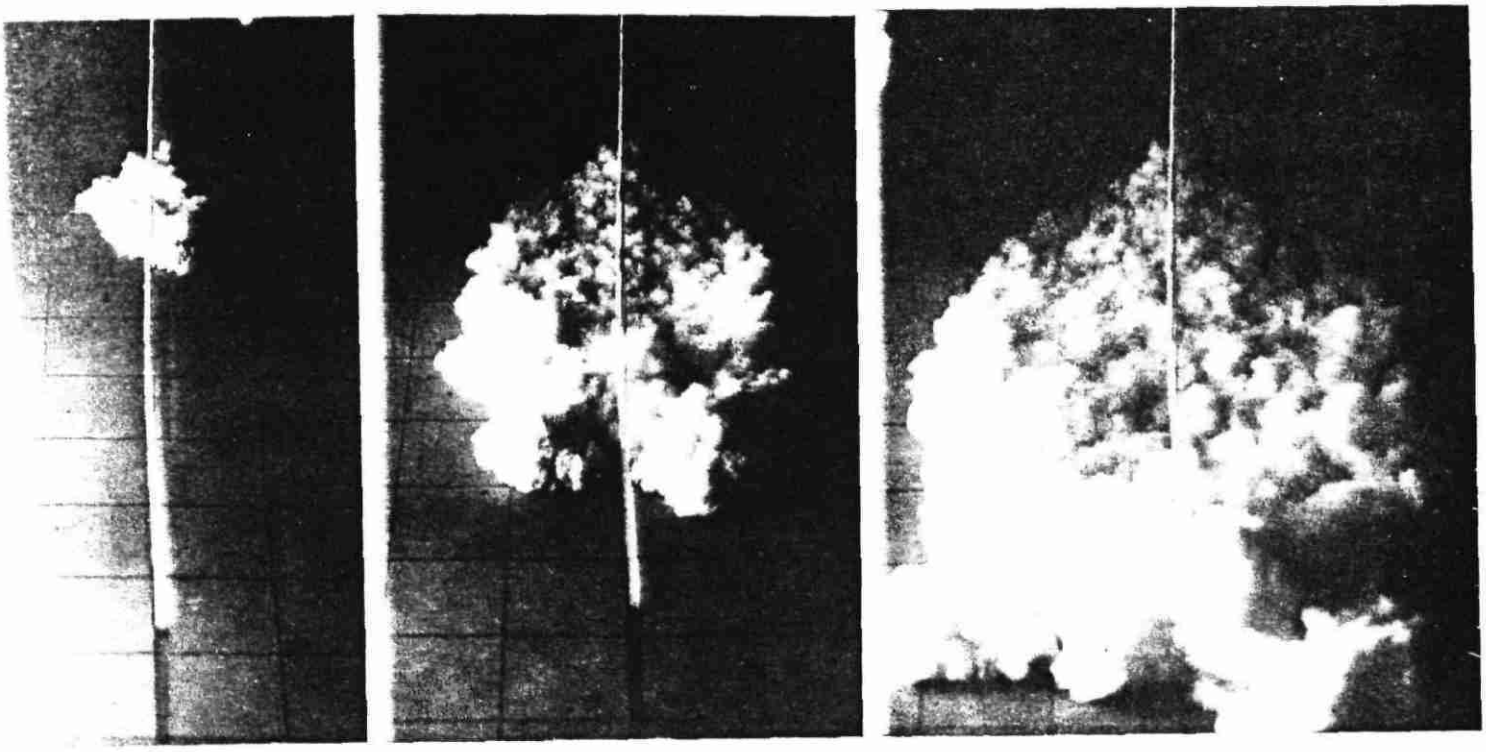


9b - Modélisation de coulée de boue (Hulme, 1974)

Fig. 9 - Modèles analogiques d'écoulements binghamiens



10a - Modélisation d'une avalanche de neige pulvérulente sur la maquette du site de "la Pendant", Chamonix



10b - 3 phases successives d'une avalanche de neige pulvérulente modélisée sur plan incliné

Fig. 10 - Modélisations analogiques d'écoulements turbulents (Rapport CEMAGREF, 1983)

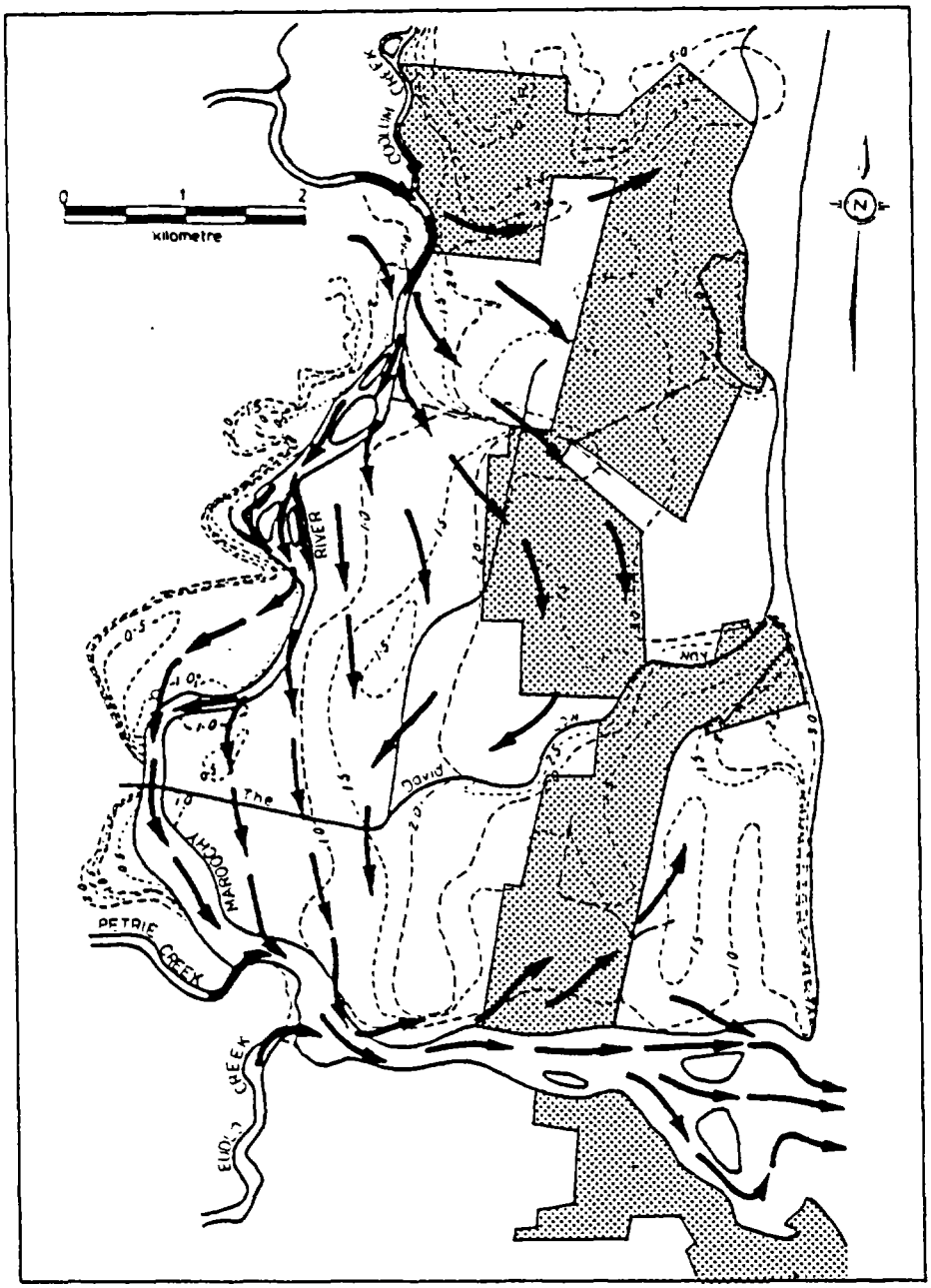


Fig. 11 - Modélisation numérique d'inondation en zone urbanisée, près de Brisbane, Australie (Morrizon et Smith in Noye, 1978)

En grisé : projet initial d'urbanisation. Le modèle a permis d'optimiser les travaux d'aménagement du fleuve.

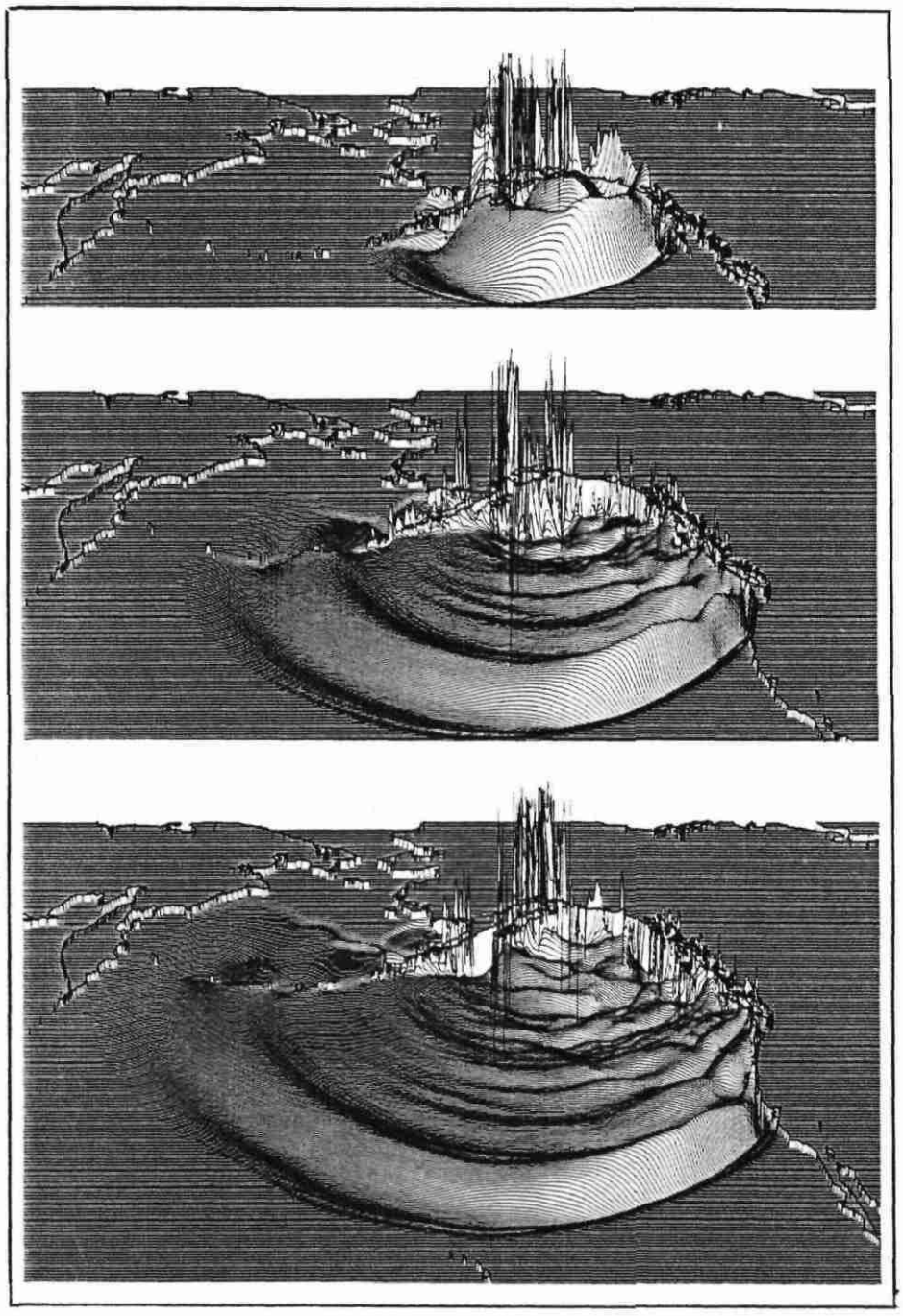


Fig. 12 - Modélisation numérique du tsunami de Valdez Harbor, Alaska (d'après Satake, 1989)

Propagation du tsunami après 1 h, 3 h et 4 h respectivement. L'exagération verticale est d'environ 2.10^6, l'épaisseur du continent correspond à 5 cm. La vague a 30 m de hauteur à Valdez Harbor. Lorsqu'elle rejoint les côtes d'Hawaii, la déferlante se dresse à 5 m de haut (en mer, la vague n'a que quelques cm).

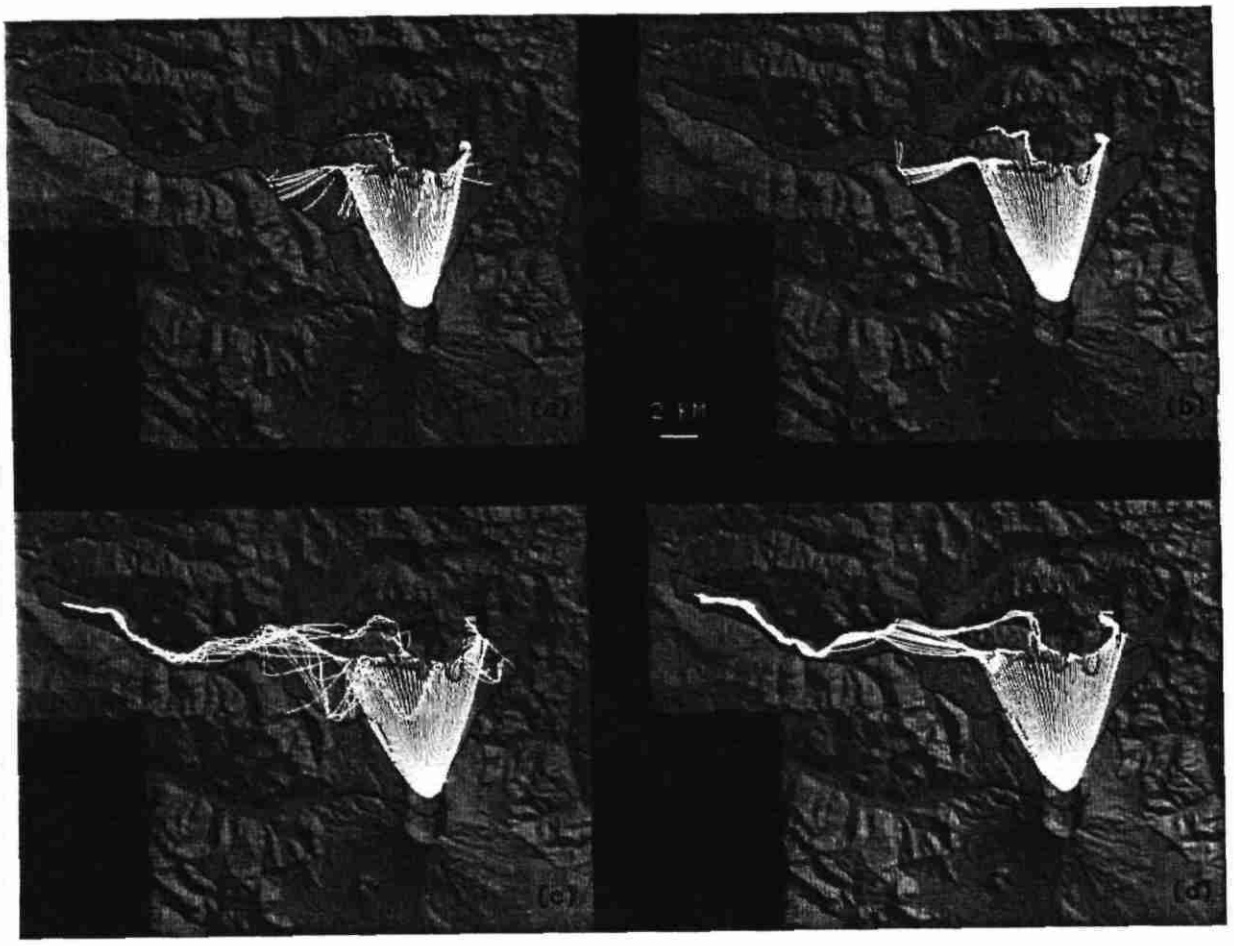


Fig. 13 - Modélisation numérique de l'avalanche de débris libérée lors de l'éruption du 10 mai 1980 au Mont St Helens, USA (d'après McEwen et al., 1989)

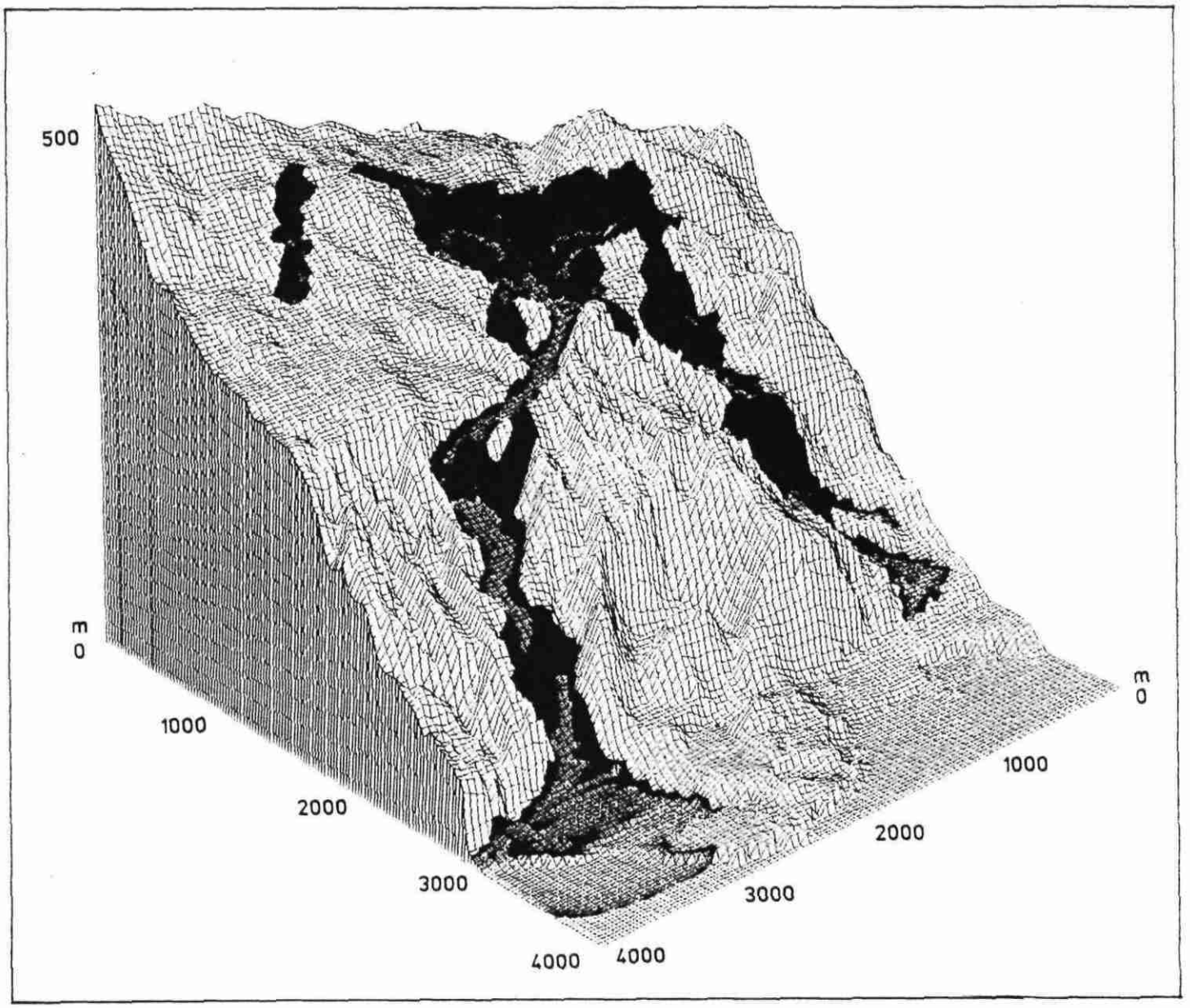


Fig. 14 - Modélisation numérique de la coulée de lave du 3 octobre 1983 au Miyakejima, Japon (Lafforgue, 1990)

L'aval de la coulée recouvre la ville d'Ako.