

LE BASSIN-VERSANT DU TORRENT DE L'EGLISE (LES ARCS) : ZONAGE DES RISQUES ET SCENARIOS DE CRISE EROSIVE

J.-C. Thouret et H. Vivian

A la limite de la zone périphérique du Parc National de la Vanoise, le système de versants de la Montagne des Arcs est parcouru par un réseau de torrents subparallèles (La Ravoire, L'Eglise, le Saint-Pantaléon, le Villard). Le bassin-versant du Torrent de l'Eglise (5 km²), en forme d'entonnoir de 2 500 m à 750 m d'altitude, a été choisi pour sa similitude et sa proximité de celui de La Ravoire. Comme la coulée boueuse de La Ravoire (1981) s'est avérée exceptionnelle et les facteurs de sa genèse sont mal élucidés, notre étude s'est fixé trois objectifs appliqués : détecter des indices d'instabilité similaires sur le bassin voisin, corrélérer les paramètres susceptibles d'expliquer les ruptures d'équilibre et élaborer des scénarios de déclenchement de coulées boueuses.

Succédant à l'analyse de la structure, des flux et de la dynamique du bassin-versant (cf. références), notre recherche a abouti à un document de zonage des aléas morphodynamiques et hydrologiques, à partir du classement des formes d'érosion actuelles et des zones instables. Les conditions d'un déclenchement potentiel d'une crue torrentielle et d'une crise érosive ont ensuite été posées. Enfin, quelques scénarios de catastrophe sont envisagés en termes de calcul de volumes de matériaux mobilisables à partir du chenal et des versants proches, dans un bassin-versant supposé en rupture d'équilibre temporaire.

ZONAGE DES ALEAS D'APRES LES TYPES D'INSTABILITES

A partir d'une carte géomorphologique, d'une carte des types d'instabilités et des sondages géotechniques et géophysiques, un nouveau zonage des aléas est proposé. Il repose sur le croisement de 6 classes de processus engendrant l'instabilité morphodynamique et de 6 variables définissant les formes dynamiques, les mouvements de terrain et les indices d'instabilité (Tableau I). Les formes dynamiques sont classées par origine, gravité, solifluxion, glissement, torrentialité, hydrogéologie, et facteur anthropique. Les variables prises en compte pour chaque type de forme incluent la superficie de la forme ou du mouvement de terrain, la nature et la profondeur supposée du matériau mobilisé, l'âge supposé de la forme, la vitesse et la fréquence du processus ou du déplacement. La somme des coefficients accordés aux variables permet de déterminer un **indice d'activité morphodynamique** et autorise une **estimation des aléas dans le bassin-versant**.

La carte 1/5 000 des aléas morphodynamiques, hydrologiques et anthropiques délimite environ 50 zones, classées en 3 groupes principaux et 18 sous-groupes. Les principaux groupes de processus, morphodynamiques, hydrologiques et anthropiques, sont subdivisés en 2 classes : déclarés et potentiels. Une gamme de trois instabilités déclarées et de deux instabilités potentielles est ensuite établie. Cette carte constitue un document technique préparant un plan d'exposition aux risques. Le zonage effectué met en évidence une forte instabilité dans le bassin moyen par rapport aux autres segments, quoique des zones potentiellement instables caractérisent aussi le bassin supérieur et inférieur. Les versants du bassin moyen compris entre 1 900 et 1 500 m sont dominés par des processus de solifluxion et de glissement, accentués par deux facteurs : (1) la présence de dépôts morainiques isérois, sablo-argileux, riches en gneiss altérés, qui favorise le démarrage de phénomènes de fluage et de coulées boueuses ; (2) la position des systèmes de pentes au pied de l'escarpement majeur, qui coïncide avec la majorité des exurgences du bassin supérieur (1 900-1 700 m).

Trois zones s'avèrent très instables et recouvrent plusieurs systèmes de versants du bassin moyen, entre 1 900 et 1 500 m : (1) les croupes des interfluvies morainiques au-dessous et au-dessus d'Arc 1800, surtout en rive gauche, à la fois déformée, glissée et hydromorphe ; (2) les versants intermédiaires très déclives et déformés, reliant l'escarpement (2 000 m) au chenal dans la zone du Fevet (1 600 m) ; (3) les rives du chenal principal dans le bassin moyen, entre 1 700 et 1 400 m (Le Fevet), caractérisé par des pentes très raides, un substrat schisteux argileux et des formations superficielles altérées.

**CLASSEMENT DES INDICES D'ACTIVITE MORPHODYNAMIQUE ET
ESTIMATION DES ALEAS INDUITS DANS LE BASSIN-VERSANT**

Types et zones d'instabilités morphodynamiques	Superficie de la forme dynamique	Texture du matériau mobilisé	Profondeur supposée du matériau mobilisé	Age supposé de la forme	Vitesse du processus	Fréquence du processus	TOTAL	ALEAS DECLARES			ALEAS PRESUMES	
								élevé	moyen	faible	probable	possible
1 - GRAVITAIRES Processus secondaires, rapide Ecoulement rocheux et chaos de blocs	2	5	1	4-5	1	5	17-19	X			X	
Paquet rocheux tassé, disloqué panneau désorganisé	3	5	1-2	4-5	1	5	19-21		X			X
Eboulement, amas et tablier de blocs	2	5	1	4	1	5	18		X		X	
Ebouillement a - gravitaire talus d'éboulis actif	2	4-5	1-2	1	1	1	10-12	X			X	
peu actif ou inactif	1	4-5	1-2	4-5	1	5	16-19			X		X
b- périglaciaire talus d'éboulis, gélifracés	2	5	2	3	2	2	16			X	X	
bandes, coulées de pierres	4	4	4	3	4	3	22					X
moraine fluée ou éboulis fluant	3	4	3	5	4	4-5	23-24			X		X
glacier rocheux bériné	1	5	2	5	5	5	23					X
2 - SOLIFLUXION a - superficielle rotation : arrachement de la végétation, terrasses niche d'arrachement-décollement et cône éboulé	4-5	1-2	4	1-2	5	4-3	19-21			X		X
b - profonde champs de loupes, versant boursouflé	1-2	1-2	3	1-2	4	2-3	12-16	X			X	
coup de cuiller et loupe	5	1-2	3	2-3	2	3-4	16-19		X		X	
coulée de terre	5	1-2	3-4	3-4	2-3	3-4	17-22			X		X
3 - EROSION HYDRIQUE, ACTION DES BAUX COURANTS ruissellement diffus	4-5	4-3	4	1	3	2	18			X		X
rigoles de ruissellement concentré	4	3-4	4	1-2	3	3	18-20		X		X	
ravinement, incision du chenal torrentiel	4-3	3-4	3	1-2	3	3-2	17	X			X	
sapement, affouillement des berges	4-5	3-4	3	1-2	4-5	3-4	18-23	X			X	
section d'atterrissement	4	3-4	3-4	3-4	4-5	4-5	21-26			X		X
cône de déjection	2	3-4	3	3-4	4-5	5-4	20-22		X		X	
4 - COMPOSEES, HYDROGRAVITAIRES glissement de terrain lent : niche d'arrachement et bourellets	2-1	2-1	1	1-2	4	1	10-11	X			X	
glissement de terrain très lent ou inactif	1-2	2-3	1	3-4	5	4-5	16-20			X	X	
5 - D'ORIGINE ANTHROPIQUE talus de déblai (route)	3-4	4-5	3-4	2-3	2-3	3-4	17-23			X		X
remblai à blocs dispersés	3	5	3-4	1-2	2-3	4-5	16-22			X		X
ruissellement diffus sur zone recouverte ou réseau de drainage abandonné	3	2	3-4	1-2	2	2	13-15		X		X	
6 - HYDRIQUES ET HYDROLOGIQUES zones hydromorphes	2-3	1-2	3-2	1-2	5	1-2	13-16	X			X	
zone humide et source	3-4	1-2	3-4	1-2	5	2	15-19		X		X	
zone inondable, cône de déjection	2-3	2-3	3-4	4-5	3-4	4-5	18-24		X		X	
zone de débordement torrentiel	4	1-2	4	3-4	1-2	4-5	17-21			X		X
zone d'infiltration et de circulation souterraine	5	1	2-3	3-5	2	2-3	15-19			X		X

* Les aléas déclarés et présumés ont été pondérés: le total issu des variables a été croisé avec les indices d'instabilité observés sur le terrain et délimités sur la carte géomorphologique détaillée (couleur).

Quatre zones relativement instables présentent au moins deux types d'instabilités :

(1) les flancs éboulés ou glissés des interfluves morainiques entre 1 900 et 1 600 m ; (2) les rives du chenal principal au sommet et à la base du bassin moyen: entre 1 800 et 1 600 m, en-dessous de 1 400 m, entre 1300 et 1 000 m au-dessus et à l'aval du Bérard ; (3) la crête sommitale rocheuse fracturée, aux talus ravinés là où de nouvelles pistes de ski sont créées ; (4) les pistes de ski non reverdiées, sensibles au ruissellement à cause de la compaction des terrains et de l'élimination des horizons humifères.

Deux catégories de zones d'instabilité potentielle sont décelées. L'instabilité potentielle est plus difficile à cerner, car nous manquons d'informations précises sur les épaisseurs de matériau impliqué dans les déformations profondes et sur les volumes mobilisables en cas de crue, de coulée de débris ou de glissement de terrain. *Les zones d'instabilité probable* entourent logiquement celles dont l'instabilité déclarée s'avère la plus forte. *Les zones d'instabilité possible* regroupent les pentes dont les indices d'instabilité déclarée sont modérés ou difficilement décelables à l'échelle de nos moyens d'investigation.

Le zonage des aléas opéré dans le bassin-versant est poursuivi par la prévision d'une rupture du système instable. Cette prévision s'appuie sur l'analyse de la crise de la Ravoire en 1981 et suppose l'examen du problème complexe du transfert des flux des versants au chenal principal. En l'absence de moyens d'investigation concernant les aquifères et les écoulements profonds, nous avons choisi d'étudier les écoulements concentrés sous forme de crue torrentielle et de coulée de débris éventuelle, en deux temps : les conditions de déclenchement, puis les calculs de volumes mobilisables une fois le déclenchement opéré.

SCENARIOS DE DECLENCHEMENT D'UNE EVENTUELLE CRISE

Une hypothèse plausible consiste à prévoir un écoulement concentré "anormal" et l'incorporation de matériaux arrachés aux rives du torrent ou issus d'un arrachement-glissement brutal. Le volume des matériaux incorporés serait alors suffisant pour transformer la crue en coulée de boue ou de débris. Il convient de souligner le caractère exceptionnel de ce scénario dans le contexte actuel du bassin-versant, dont les écoulements amont sont écrêtés. Cependant, l'impact anthropique croissant, la catastrophe de La Ravoire en 1981 et le volume du cône de déjection de l'Eglise plus considérable que celui de La Ravoire suggèrent que ce type de crise n'est pas impossible.

Les conditions de déclenchement d'une crise et d'une coulée de débris

Le déclenchement d'une coulée de débris du type de la Ravoire dépend d'une convergence de facteurs d'instabilité, *rarement réalisée* (1 à 2 fois par siècle en moyenne Tarentaise ?). En dehors des facteurs anthropiques déjà connus, on distinguera des conditions nécessaires, des facteurs aggravants et des facteurs permanents d'entraînement, ainsi que leur interactions.

Cinq facteurs climatiques aggravants sont des **conditions nécessaires**, caractérisées par une fréquence d'occurrence dans le temps.

1) Une *séquence pluviométrique de quelques jours*, dont le total dépasse largement le seuil d'intensité maximum observé en période estivale (70 mm/jour, récurrence séculaire probable) et dont au moins deux subtotaux quotidiens atteignent ou dépassent le seuil d'intensité moyen observé (33-35 mm/jour). La séquence des 29, 30 et 31 mars 1981 (total 98,7 mm), s'ajoutant à la fonte nivale, en constitue un exemple.

2) Un *manteau neigeux épais*, soit précoce, avec une chute de 40-50 cm/jour en octobre-novembre, soit prolongé en mars-avril à moyenne altitude (100 à 180 cm d'épaisseur entre 1 600 et 1 800 m d'altitude). Ce manteau neigeux est instable s'il est tombé en abondance en début d'hiver, ou s'il est profondément transformé en fin d'hiver sur un sol dégelé.

3) Des *températures moyennes plus élevées* que les normales saisonnières à moyenne et haute altitude, par exemple par type de temps doux du SSW avec vent chaud et foehn, ce qui était le cas des

29-31 mars 1981. Elles accentuent ou accélèrent la fusion de la neige, modifient la texture du manteau neigeux, à l'instar des précipitations plus tièdes, ou peuvent conduire à son ressuyage brutal.

4) Une *recrudescence pluviométrique* en fin de séquence de précipitations élevées, comme ce fut le cas du 31 mars 1981. La récurrence d'une forte intensité pluviométrique de saison chaude (60 mm/jour) serait de 3 fois par siècle et celle d'une très forte intensité (70 mm/jour) d'une fois par siècle. Plus déterminante encore serait la durée de plusieurs heures de la forte intensité horaire (> 10 mm/h) pendant la journée de forte précipitation qui clôt la séquence pluviométrique exceptionnelle.

5) Un *abat d'eau extraordinaire sur le bassin moyen* à l'aval de la dérivation EDF des Espagnols. La concentration des eaux vers le chenal de l'Eglise au niveau d'Arc Chantel peut être accrue par la présence des lacets de routes asphaltées et des remblais étagés, susceptibles de jouer un rôle semblable à celui démontré dans le cas du carrefour du Gollet (Arc 1600) en 1981. Les entonnements d'eau pluviale et les buses ne sont pas dimensionnés pour évacuer un débit supérieur à 1,5 m³/s (débit quinquennal).

Chacun de ces facteurs nécessaires et aggravants n'est pas suffisant à lui seul pour déclencher une crise érosive, parce que les débits sont écrêtés et l'impluvium amont diffère les écoulements souterrains et hypodermiques. Une coulée de boue ou de débris ne se produirait donc que si **une exceptionnelle combinaison** se réalisait entre la séquence pluviométrique et la fonte nivale qui sature les terrains, la recrudescence pluviométrique et l'accélération de la fusion nivale qui sature les nappes. S'y ajoutent encore la circulation souterraine différée et celle provenant du bassin d'Arc 2000, qui peuvent augmenter rapidement la pression interstitielle d'une épaisse tranche de terrains décomprimés.

Les facteurs aggravants exercent un effet d'entraînement sur au moins **quatre facteurs géologiques et hydrologiques**.

1) Un *substrat déjà imbibé, puis saturé, qui n'est ni sain ni en place*. Dans toute la partie moyenne du bassin-versant, le matériau superficiel est épais (10-40 m), meuble, sans cohésion et de texture sablo-argileuse. La zone la plus défavorable correspond aux dépôts *morainiques* isérois *altérés*, sablo-argileux, et/ou des schistes noirs argileux et altérés, à cohésion nulle, angle de frottement moyen, indice de plasticité faible et argiles moyennement actives.

2) Une *saturation quasi-complète de l'impluvium constitué par le bassin-versant supérieur*. Son rôle-tampon est efficace car l'averse du 12 juillet 1991 (29,2 mm) n'a pas eu de conséquence dans le torrent de l'Eglise, alors qu'elle a entraîné des crues dommageables dans ceux du St Pantaléon et du Villard. Mais s'il était saturé, on pourrait s'attendre à une crue supérieure à 1,5 m³/s aux Espagnols (capacité de dérivation de la conduite), qui pourrait se transformer vers l'aval en coulée boueuse.

3) Le *facteur hydrogéologique*, permanent mais mal cerné, réside dans les circulations dans un système de fissures en charge, les écoulements hypodermiques dans les dépôts morainiques, ainsi que dans les circulations souterraines différées dans les massifs fissurés, en provenance du gradin supérieur et du bassin d'Arc 2000 vers le bassin moyen. L'examen des conditions de la rupture à l'amont de la cicatrice de la Ravoire en 1981 suggère que ces circulations constituent le facteur hydrogéologique déterminant.

4) Un arrachement-glisement ou un éboulement du matériau et son *déplacement brutal vers le chenal du torrent*. L'incorporation de matériau est le facteur principal du déclenchement de la coulée de débris et de l'accroissement de son pouvoir érosif sur le lit et les berges du torrent. Les matériaux glissés et instables des rives du torrent dans la zone du Fevet (1 700-1 500 m) et ceux issus du dépavage du lit du Fevet et de l'Eglise constituent la charge solide incorporable, dans un scénario de grosse coulée de débris.

Il s'agit alors d'évaluer quel serait le volume de matériaux susceptibles d'être arrachés et incorporés, à partir de prévisions fondées sur des calculs et des modèles, eux-mêmes confortés par des mesures d'épaisseurs dans les chenaux de la Ravoire et de l'Eglise. Nous avons donc élaboré trois scénarios géomorphologiques à partir de deux Modèles Numériques de Terrain (M.N.T.).

Calcul des volumes de matériaux mobilisables à partir de M.N.T.

Les calculs de prévision sont fondés sur trois opérations.

La topographie du chenal et des versants proches, de 2 000 m d'altitude jusqu'à l'apex du cône de déjection, a été digitalisée à l'échelle 1/ 25 000, avec une précision et une équidistance des courbes de niveau de 10 m (fig. 1). Trois zones érodables grosso modo parallèles au chenal ont été également délimitées (fig. 2), en fonction des segments hydro-morphologiques repérés le long du Torrent de l'Eglise : (1) une zone très étroite (20-30 m) le long du chenal, où la profondeur d'incision prévue dépend de la morphologie de chaque segment du torrent ; (2) une seconde zone entourant la précédente, également étroite mais plus profonde en fonction de l'incision linéaire et du type de segment du torrent ; (3) une troisième zone plus large, de 50 à 100 m au maximum mais aussi profonde que la précédente. La figure 2 montre également deux zones supplémentaires, où les déformations seraient indirectement engendrées par l'érosion des zones précédentes.

Des courbes d'iso-profondeur ont été tracées, d'après la comparaison entre le chenal de l'Eglise et le chenal mesuré dans la Ravoire, pour évaluer l'incision torrentielle dans les 3 premières zones délimitées. Les profondeurs retenues varient d'1 à 23 m au maximum, valeurs plausibles inférieures à celles mesurées dans le bassin moyen et supérieur de la Ravoire (20 à 41 m), pourtant conservatrices, compte-tenu des modifications du profil induites par les barrages construits dans le chenal. Les profondeurs et largeurs retenues pour la zone du Fevet réputée la plus érodable, entre 1 750 et 1 450 m, sont *inférieures*, dans tous les cas de figure, à celles mesurées dans le segment correspondant du bassin moyen de la Ravoire.

L'ensemble du chenal érodé consiste en une succession de triangles dont les points sont reliés par des lignes brisées, dont la pente est connue pour chaque segment par digitalisation de la carte topographique et des trois zones érodables, parallèles au chenal (fig. 2). Ainsi, les calculs de volumes de matériaux reposent sur la comparaison entre le premier M.N.T. issu de la topographie actuelle (fig. 1) et le second M.N.T., représentant les zones érodables délimitées par des courbes de profondeur discrètes pour chacun des segments du torrent (fig. 3,3b). Les résultats des calculs sont consignés dans le tableau suivant. Les zones correspondantes sont délimitées sur les fig. 2 et 3.

	Chenal			Volume des matériaux mobilisables $\times 10^6 \text{ m}^3$	Taux d'ablation et d'incorporation des matériaux $\text{m}^3/\text{mètre linéaire}$
	Longueur km	Largeur m	Profondeur m		
Scénario 1 (MNT1)	2.5	20-25	1-15	1.7	850
Scénario 2 (MNT1)	2.5	25-40	1-23	2.1	1 000
Scénario 3 (MNT2)	2.5	40-60	1-23	2.5	1 200

En outre, la crise exceptionnelle prévue dans le cadre du 3e scénario entraînerait la perte de stabilité des versants déformés et glissés dans la quatrième zone délimitée (fig. 2), dans le bassin-versant moyen et inférieur, profonde de 3 à 5 m minimum et large de 60 à 120 m minimum de part et d'autre du chenal, notamment entre 1 800 et 1 400 m d'altitude. Ces versants seraient susceptibles de déformations rétrogrades, mais les matériaux ne seraient pas déplacés vers le chenal. Ce scénario exceptionnel et hypothétique implique un mouvement de terrain d'environ 5,2 millions de m^3 sans déplacement brutal. Il s'agit d'un ordre de grandeur pour l'évaluation du *volume minimum* de matériaux *actuellement déformés* dans le bassin-versant moyen et inférieur.

Portée et limites de la prévision

Les trois scénarios prévoient des volumes *théoriquement* mobilisables, dans l'hypothèse du déclenchement d'une coulée de débris de récurrence exceptionnelle, comme celle de la Ravoire en 1981. Puisque ces volumes chiffrés excèdent largement les rares estimations publiées à propos de la

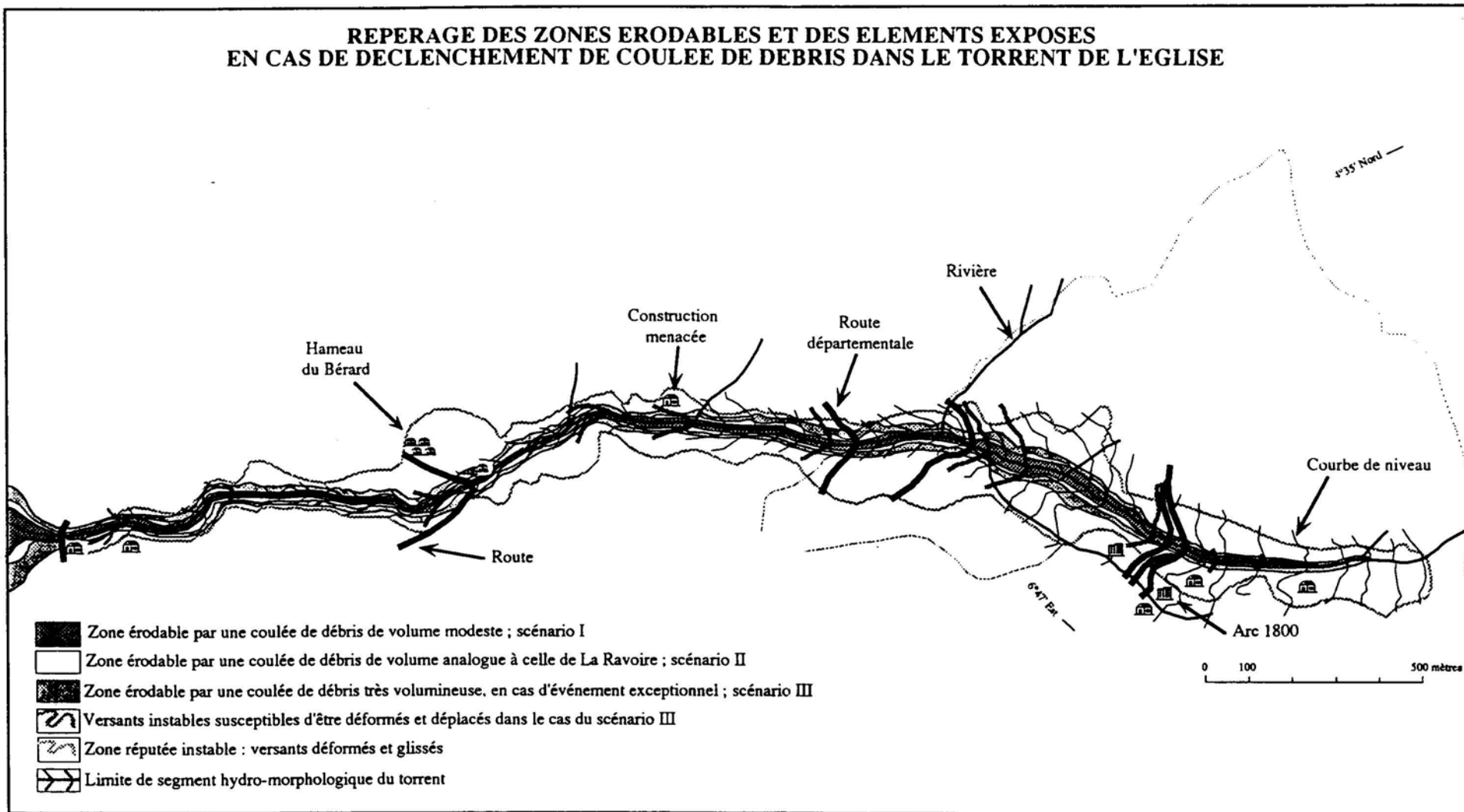


Fig. 2

Ravoire, il convient d'énoncer les critères qui fondent ces prévisions et les réserves qui en limitent la portée.

Le volume de la coulée boueuse de La Ravoire (1981) a été jadis estimée d'une façon très approximative ($300\ 000\text{ m}^3$). Le cône de déjection de la Ravoire est assimilable à un triangle d'au moins $300 \times 300 \times 10\text{ m}$, soit $450\ 000\text{ m}^3$ au minimum. Ce chiffre est probablement sous-estimé, parce que le dépôt ne représente pas la moitié des matériaux arrachés et exportés par les coulées de débris de 1981. Le volume de matériaux arrachés tout le long du chenal de la Ravoire, assimilé à un triangle de $60 \times 20\text{ m}$, sur une longueur de $2\ 000\text{ m}$, s'élève au moins à $1\ 200\ 000\text{ m}^3$. Ce chiffre reste conservateur, car tout le bassin moyen et supérieur de la Ravoire a été incisé sur 20 à 40 m et la largeur du chenal est en moyenne de 60 m et au maximum de 120 m .

L'écrêtement des crues (dérivation EDF) réduit la possibilité de déclenchement d'une coulée. On sait qu'une grosse crue serait exceptionnelle dans le torrent de l'Eglise, car les débits sont écrêtés par dérivation aux Espagnols et les écoulements du bassin supérieur sont différés et perturbés. Les conditions climatiques d'occurrence d'une crue auraient un temps de retour de l'ordre du siècle. Toutefois, dans l'hypothèse d'une crue modérée ($1,5\text{ m}^3/\text{s}$), il suffirait d'un arrachement-glisement brutal du pied de la rive gauche ou droite entre $1\ 800$ et $1\ 400\text{ m}$ pour déclencher une coulée de boue ou de débris.

L'intérêt des scénarios élaborés est de rappeler qu'une coulée de débris peut être déclenchée avec un volume solide initial faible, car elle dépend surtout du taux d'incorporation de matériaux mobilisables au cours du trajet de la coulée. Les chenaux de la Ravoire et de l'Eglise, quoique courts (2 et $2,5\text{ km}$) et peu alimentés (quelques centaines de litres/seconde), sont caractérisés par des matériaux fragiles et propices à l'alimentation d'une coulée de boue ou de débris : matériaux meubles épais, décomprimés et à cohésion nulle ou faible, à angle de frottement interne faible à moyen, parfois argileux et à indice de plasticité faible. Enfin, le rôle des circulations profondes et des écoulements hypodermiques dans cette tranche décomprimée et non saturée est mal connu. Pourtant, il est probablement responsable de l'accroissement brutal de la pression interstitielle et par conséquent, du glissement des matériaux déstabilisés et incorporables à l'écoulement du chenal.

Références

LAMA, 1991 (Vivian H., Bocquet G., Dedieu J.-P., Fabre D., Thomas A., Thouret J.-C.). Le bassin-versant expérimental du Torrent de l'Eglise, Les Arcs, Savoie. 2 vol., 163 p., Atlas 11 cartes 1/5 000.

Thouret J.-C., Fabre D., Feyt G., Vivian H., 1992. Diagnostic de l'instabilité morphodynamique d'un bassin-versant alpin : méthodes, critères, scénarios. Torrent de l'Eglise (Les Arcs, Tarentaise), 3, 283-287.

Vivian H., Bocquet G., Dedieu J.-P., Fabre D., Thomas A., Thouret J.-C., 1991. Le bassin-versant expérimental du Torrent de l'Eglise (Les Arcs, Savoie). Structure, flux, dynamique. La Houille Blanche, 6, 457-462.