

Cartographie morphodynamique des petits systèmes torrentiels

David Theler¹
Emmanuel Reynard¹
Valentina Garavaglia²

¹ Institut de Géographie
Université de Lausanne
Anthropole
CH - 1015 Lausanne

E-mails :
dtheler@hotmail.com
emmanuel.reynard@unil.ch

² Dipartimento di Scienze della Terra
"Ardito Desio"
Università degli Studi di Milano

E-mail :
valentina.garavaglia@unimi.it

In Lambiel C., Reynard E. et Scapozza C. (Eds) (2011). *La géomorphologie alpine: entre patrimoine et contrainte. Actes du colloque de la Société Suisse de Géomorphologie*, 3-5 septembre 2009, Olivone (Géovisions n° 36). Institut de géographie, Université de Lausanne.

Résumé

L'estimation des volumes de matériaux mobilisables par les laves torrentielles est à la base du diagnostic préliminaire menant à une analyse des dangers dans les systèmes torrentiels. En milieu alpin, la cartographie géomorphologique des petits systèmes torrentiels aide à comprendre les processus en jeu et se révèle utile dans la prévention et la protection des dangers. Une méthode originale de cartographie géomorphologique, focalisée sur les processus de transferts sédimentaires à l'échelle du système torrentiel et combinant des analyses réalisées sur des modèles numériques de terrain à haute résolution et des investigations de terrain, est proposée, appliquée et discutée sur deux systèmes torrentiels.

1. Introduction

La définition des zones de danger est un processus en constante évolution, chaque nouvel événement fournissant des informations utiles dont découle une meilleure compréhension du phénomène. Si l'élaboration des cartes des dangers liés aux avalanches – débutée il y a plus d'un demi-siècle après l'hiver 1950-1951 – a démontré depuis une fiabilité certaine, les zones de dangers hydrologiques cartographiées se sont révélées exactes dans environ 80 % des cas durant les intempéries du mois d'août 2005 (Loat, 2007) qui ont frappé le versant nord des Alpes suisses. L'estimation des volumes sédimentaires et l'identification des processus générant leur transfert sont nécessaires pour comprendre le comportement hydro-géomorphologique des petits systèmes torrentiels et aboutir à un diagnostic préliminaire menant à une analyse plus fine des dangers liés à l'eau. Si les paramètres et facteurs agissant sur le déclenchement des laves torrentielles sont nombreux et complexes (Fig. 1), il a cependant été démontré que l'occurrence de laves torrentielles était souvent étroitement liée à la quantité de matériaux disponibles dans le chenal principal. Les géomorphologues distinguent ainsi deux types de systèmes (Sterling et Slaymaker, 2007; Brayshaw et Hassan, 2009) :

- *supply unlimited* ou *transport-limited* systems, où l'occurrence de laves torrentielles ou coulées de débris est directement liée aux événements hydrométéorologiques les plus importants puisque le stock de sédiment est « illimité ». On constate dans ce genre de système une bonne corrélation entre les transports solides torrentiels et les événements hydrométéorologiques d'une part, et, d'autre part, un transport de matériaux plus fréquent mais de moindre intensité;
- *supply limited systems*, où une coïncidence entre le degré de remplissage et un événement météorologique d'une certaine importance est nécessaire pour qu'une lave torrentielle se déclenche.

Nous présentons ici une méthode originale de cartographie géomorphologique focalisée sur les processus de transferts sédimentaires à l'échelle du système torrentiel et utilisant le concept de cascade sédimentaire. L'approche globale du versant par l'établissement de cascades sédimentaires consiste à conceptualiser le versant avec des boîtes en cascade reliées par des tuyaux ou des évier dont le diamètre peut varier en

fonction de la capacité et des apports des différentes branches du réseau hydrographique ou gravitaire (Reid et Dunne, 1996; Bravard et Petit, 2000; Warburton, 2007). Il s'agit de l'une des orientations les plus récentes et courantes de la recherche en géomorphologie, qui permet l'établissement de bilans sédimentaires à l'échelle d'une vallée (p. ex. Schrott et Adams 2002; Otto, 2006), d'un versant, d'un bassin versant ou d'un système torrentiel.

La méthode combine des analyses réalisées sur des modèles numériques de terrain à haute résolution et des investigations de terrain. Dans cette contribution, elle est appliquée sur deux torrents valaisans puis discutée.



Fig. 1 : Aperçu de quelques contextes géomorphologiques (A, C et D) et de formes de dépôt associées aux laves torrentielles (B) A- Lave torrentielle du Ritzibach (versant sud du col du Simplon) dont l'occurrence est à lier à la percolation des eaux d'un lac proglaciaire au travers d'un bastion morainique (en médaillon, niche d'arrachement); B- lave torrentielle du Durnand (juillet 2006); C- Niche d'arrachement de la lave torrentielle du Dolent de juin 1990 dans le bastion morainique du glacier du même nom (août 2006); D- Lave torrentielle du Torrent du Marais (Grimentz, mai 1999) résultant de la fluidification d'un glissement de terrain (© www.immoblog.ch).

2. Méthode de cartographie morphodynamique

Notre méthode s'applique à la cartographie des processus prédisposant un bassin versant à produire des laves torrentielles sous l'angle des stocks de matériaux disponibles

dans le bassin de réception ou la(es) zone(s) considérée(s) comme fournissant l'essentiel de la charge sédimentaire du torrent. La méthodologie proposée est divisée en 6 ou 7 étapes (Fig. 2) et se base sur des données directement dérivées d'analyses spatiales sur SIG à l'aide de MNT à haute résolution, de mesures de terrain et de photographies aériennes. L'identification précise et correcte des zones sources est l'*étape préliminaire (1)* à l'exercice cartographique. Cette approche peut être classiquement réalisée sur la base de différents documents tels que les photographies aériennes, les cartes topographiques et/ou géologiques ou des documents d'archives. Toutes les aires potentielles d'un bassin versant ne sont pas soumises à l'érosion. L'analyse des processus passés et présents permet de délimiter les aires contribuant réellement à l'injection de la charge solide dans le système fluvial (Bravard et Petit, 2000).

La deuxième étape consiste à simuler le réseau hydrographique à l'aide d'outils hydrologiques disponibles sous forme d'extension dans le logiciel ArcGIS (Theler et Reynard, 2008; Theler et al. 2010) et à déterminer ensuite les (sous-) bassins versants correspondant aux différents exutoires confluant avec le cours d'eau principal. La connectivité des zones sources sédimentaires avec le chenal principal est d'une importance particulière dans l'évaluation des volumes de sédiments potentiellement mobilisables durant un événement de lave torrentielle (Zimmermann et al. 1997) et elle est souvent corrélée à la connectivité hydrologique (Croke et al. 2005). L'analyse de la connectivité permet d'identifier et de sélectionner des unités géomorphologiques contribuant directement à la recharge sédimentaire du chenal. Nous distinguons ici la connectivité des zones sources avec le chenal principal et la connectivité des différents stocks sédimentaires au sein d'une même unité d'approvisionnement sédimentaire, laquelle est présentée ultérieurement.

A partir de la sélection des différentes zones sources, une délimitation automatique des sous-bassins versants correspondant à leur exutoire est réalisée (3). Ces sous-bassins versants correspondent aux unités qui seront cartographiées d'un point de vue géomorphologique. Seules les zones connectées au chenal principal, permettant un approvisionnement direct de ce dernier, sont cartographiées.

La quatrième étape consiste en une cartographie morphogénétique des stocks sédimentaires à l'intérieur de ces différentes unités géomorphologiques (sous-bassins versants). Notre typologie, calquée sur les principes de la légende de cartographie géomorphologique de l'IGUL (Schoeneich, 1992; Schoeneich et al., 1998), est avant tout destinée à comprendre l'agencement des grands types de formes dans les zones sources du système torrentiel et à visualiser sur la carte géomorphologique finale les types de processus responsables des différentes formations et du transfert de sédiments dans le chenal principal. Le caractère morphogénétique des stocks sédimentaires est représenté à l'aide d'une trame de couleurs classiquement utilisée et préconisée par Joly (1962), soit : le rouge pour les processus et formes de type structural, le vert pour le fluvial, le beige pour le gravitaire, le rose pour le périglaciaire et le violet pour le glaciaire. Cette manière de procéder permet de mettre en évidence le rôle du stock dans la dynamique sédimentaire du torrent en trois classes : faible, moyenne et élevée.

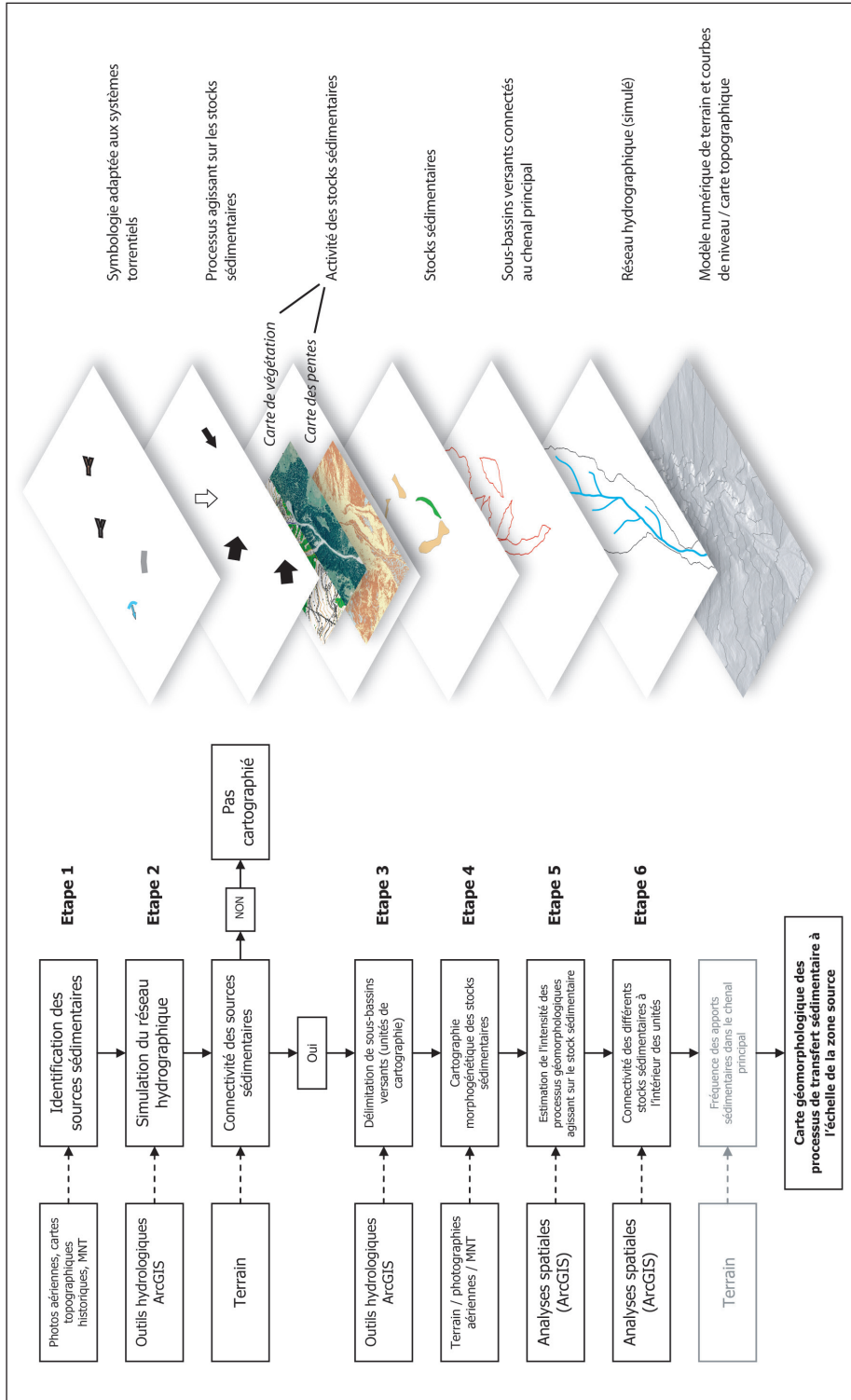


Fig. 2 : Flow-chart de la méthode proposée (à gauche) et produit cartographique final (à droite).

Puis, des analyses spatiales réalisées au sein de chaque sous-bassin versant croisent des informations de pente, de couverture végétale et le degré de connexion entre les différentes zones. La prise en compte des pentes est centrale pour évaluer l'activité des processus géomorphologiques dans un bassin torrentiel. Selon Bonnet-Staub (2001), la pente minimale d'initiation d'une lave torrentielle est de 20° pour des processus se déclenchant dans des pentes et de 11 à 12° pour des processus de remobilisation de sédiments accumulés dans des chenaux. Dans les dépôts morainiques – plus cohésifs que des sédiments poreux – la *pente* d'initiation est comprise entre 27 et 38° pour des événements déclenchés par ruissellement concentré agissant en pied de paroi ou de versant. Sur la base de ces valeurs, nous avons défini trois classes de pente (<15°, 15-30°, >30°). Ces valeurs correspondent à la pente générale d'un cône (<15°), à l'angle de friction interne (>30°) et peuvent dès lors être appliquées de manière générale en environnement alpin. La pente est calculée par analyse spatiale effectuée sur le modèle numérique d'altitude. La végétation stabilise les matériaux meubles par le biais du système racinaire et favorise la sédimentation en retenant les sédiments érodés plus à l'amont (Rey et al. 2004). Par conséquent, la végétation contribue parfois à déconnecter les parties supérieures et inférieures d'un bassin versant (Borselli et al. 2008) au niveau de leur dynamique sédimentaire. Trois classes de couverture végétale ont été retenues (>70%, 30-70%, <30%), basées en partie sur des valeurs recueillies et synthétisées par Veyrat-Charvillon (2005) et Veyrat-Charvillon et Mémier (2006). Ionesco (1964) montre par exemple que l'eau ruisselle en grande partie jusqu'à une densité de couverture végétale de 70%. En-dessous de cette valeur et pour une même densité, une répartition homogène de la végétation permet de maintenir un ruissellement diffus, alors qu'une répartition « par plaques » peut favoriser la concentration du ruissellement. Il n'existe cependant pas de relation linéaire entre la production sédimentaire et la couverture végétale, un taux de couverture végétale de 15% apparaissant comme une valeur seuil minimale pour que la végétation joue un rôle significatif contre l'érosion. Le type de végétation et sa physiologie, bien qu'étant des paramètres importants, ne sont pas pris en compte dans ces classes de couverture de la végétation.

Si la connectivité des zones sources au chenal principal est d'une importance capitale pour l'évaluation des volumes sédimentaires alimentant ce dernier et l'établissement provisoire d'un budget sédimentaire, la connexion des différents compartiments au sein des unités de cartographie (6) décrits précédemment l'est également. Nous avons défini quatre classes de connexions entre les différents stocks situés au sein d'une unité d'approvisionnement sédimentaire : a) élevée ou directe, b) partielle, c) potentielle et d) nulle. Une connectivité élevée signifie que le stock sédimentaire est directement connecté au chenal principal. La connectivité est considérée comme partielle lorsque le stock est connecté en partie au chenal, par exemple en raison de certaines caractéristiques topographiques (forme concave d'un éboulis dont seule une partie pourrait atteindre le chenal). La connectivité est potentielle lorsqu'elle est susceptible d'être effective par l'intermédiaire d'un phénomène géomorphologique modifiant la topographie actuelle (glissement, éboulement ou phénomènes d'érosion). La connectivité est évaluée de manière qualitative sur le terrain, sur la base d'indices géomorphologiques et des pentes notamment.

Des symboles spécifiques adaptés aux petits bassins versants torrentiels ont été créés, pour certains issus des réflexions de Bardou (2000). Ces symboles intègrent des éléments hydrographiques génériques (lacs, sources), des objets artificiels ou anthropiques pouvant obstruer l'écoulement des eaux tels que des ponts ou des infrastructures hydroélectriques, ainsi que des débris ligneux pouvant être présents dans le chenal. L'intensité et la fréquence du ou des processus agissant sur un stock sédimentaire est représentée par une flèche, dont la taille est proportionnelle à l'intensité/fréquence du processus. N'est représenté sur la carte géomorphologique que le processus dominant ou majeur.

3. Application de la méthode sur deux systèmes torrentiels

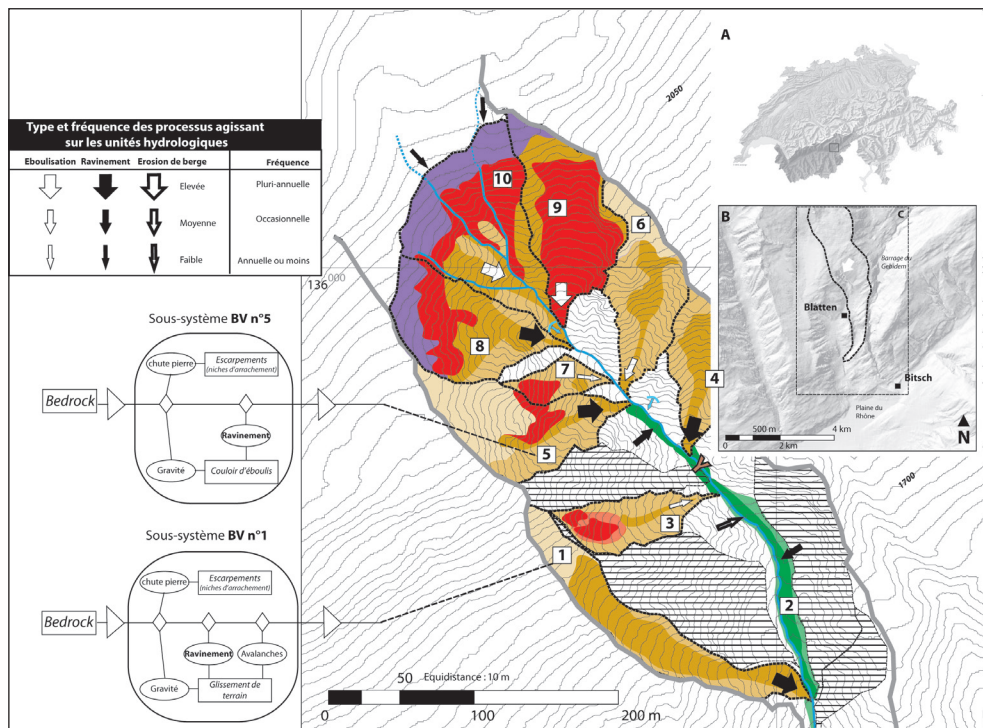
Le choix des sites analysés a été effectué sur la base a) des attentes en matière de gestion et prévention des dangers naturels de l'Etat du Valais; b) du fonctionnement géomorphologique complexe des systèmes torrentiels étudiés et c) de l'absence de données précises sur leur fonctionnement. En outre, les sites devaient se différencier du point de vue des attributs morphométriques des bassins versants (distribution altimétrique, orientations, surface, accessibilité) et de l'évolution morphogénétique récente du bassin versant et de son fonctionnement géomorphologique (fréquence et intensité des laves torrentielles et facteurs de déclenchement). Sur la base de cette double série de critères, deux sites situés en Valais ont été sélectionnés : le Bruchi (Blatten bei Naters) et le Meretschibach (Agarn).

3.1. Application au Bruchi

Le Bruchi est un cours d'eau à écoulement pérenne qui conflue avec le Kelchbach à la hauteur du hameau de Geimen. Le cours d'eau prend sa source à près de 2'800 m d'altitude dans une combe située sous la pointe du Hohstock (3'226 m), avant de méandrer dans des pâturages parsemés sur des affleurements de granites et gneiss moutonnés. A la différence d'un système torrentiel typique, le bassin de réception correspond à une zone ravinée à mi-longueur du torrent, s'inscrivant dans un versant caractérisé par un important tassement. C'est à partir de cette zone instable située entre 1'600 et 2'000 m d'altitude que se déclenchent les laves torrentielles.

La carte des phénomènes levée sur le Bruchi (Teyssiere et Candolfi, 2006) n'illustre que partiellement les processus mis en jeu dans ce système torrentiel ainsi que les zones contribuant directement aux apports en matériaux du chenal. Les deux glissements de terrain (1 et 4, Fig. 3) connectés au torrent, érodés périodiquement par des coulées boueuses ne figurent pas comme tels sur la carte alors que leur rôle dans l'approvisionnement sédimentaire du Bruchi est majeur. Les deux glissements de terrain y sont en effet représentés comme deux escarpements rocheux actifs prolongés respectivement par deux couloirs d'éboulis. Dans le cas 1 (Fig. 3), notre travail a montré que seule la « branche » sud était connectée au Bruchi et correspondait en réalité à une rigole où transitent des coulées boueuses dont l'approvisionnement sédimen-

taire dans le chenal est bien plus important que la cartographie des phénomènes le laisse supposer. Par ailleurs, le couloir d'éboulis cartographié de manière semblable plus au nord (4) ne revêt aucune importance en termes d'apports en matériaux dans le chenal, comme l'ont montré les différents traçages de peinture réalisés sur ce site.



3.2. Application au Meretschibach

Délimité grossièrement à l'ouest par le cirque d'érosion de l'Iligraben et à l'est par l'Emsbach, le bassin versant torrentiel drainé par le Meretschibach est difficile à définir autant d'un point de vue hydrologique que géomorphologique (Fig. 4). Du point de vue hydrologique, les écoulements superficiels du torrent, dont la source est située à l'altitude 1'880 m, apparaissent déconnectés de la partie supérieure du bassin versant en raison de la présence de captages hydroélectriques aux émissaires des deux principaux lacs d'ombilic sis dans le vallon glaciaire suspendu. Le bassin de réception, dans lequel se prépare la charge sédimentaire, correspond à une zone d'érosion nommée « Bochtür ». D'une superficie d'environ 240'000 m², cette zone

s'étend entre 1'600 et 2'100 m et l'augmentation annuelle de sa surface est de l'ordre de 2'000 m² depuis 1945. Cette zone correspond à la partie sommitale et aux niches d'arrachement d'un glissement de terrain très ancien et peu actif au front duquel se prolonge jusqu'en pied de versant un cône de débris coalescent avec celui de l'Illgraben. En amont, ce glissement revêt plutôt les apparences d'un tassement avec dislocation dont les vitesses de déplacement moyennes annuelles atteignent une vingtaine de centimètres environ et où dominent les processus d'ébouilisation sur des assises lithologiques calcaires et quartzitiques. La surface de cette zone d'érosion est entaillée par des rigoles d'érosion fluviales et nivales qui se prolongent dans la zone forestière du site. Périodiquement, des coulées de débris atteignent le chenal du Meretschibach, dont les débordements, en octobre 2000, ont provoqué des dégâts à la localité d'Agarn.

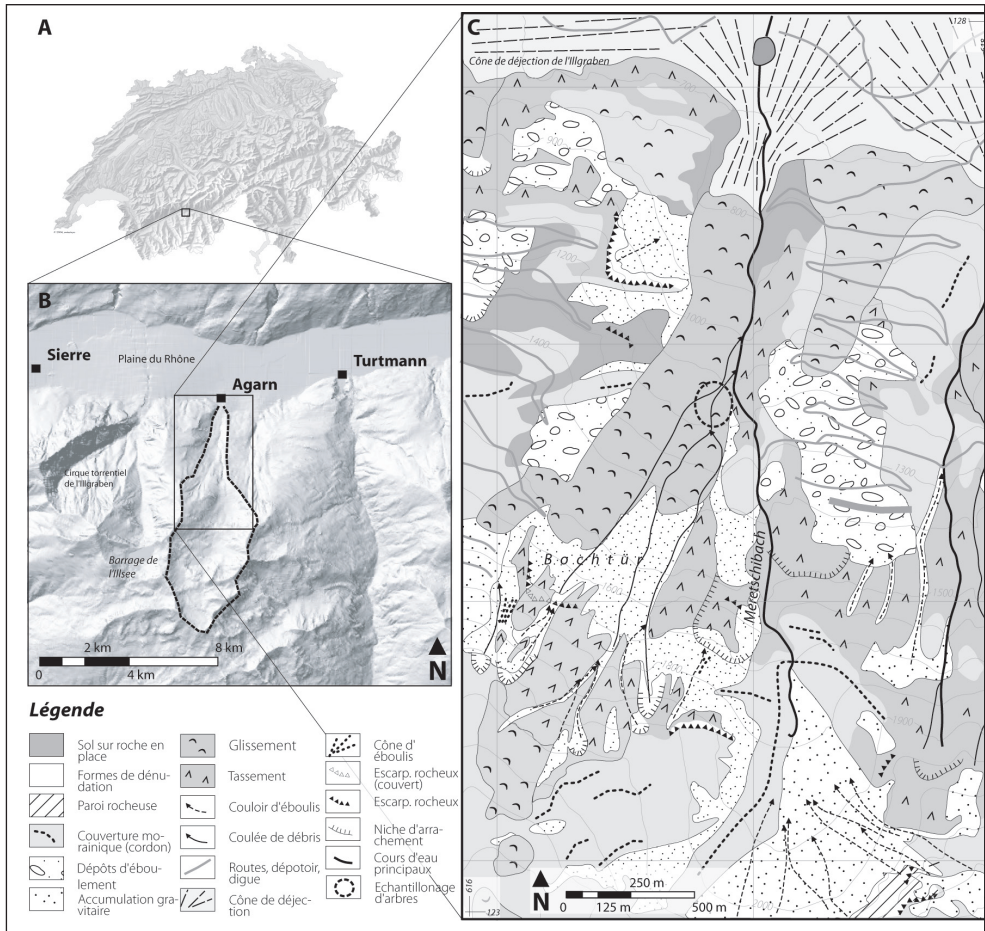


Fig. 4 : Localisation (A et B) et extrait de la carte géomorphologique (C) du Meretschibach. Reproduit avec l'autorisation de swisstopo (BA110019).

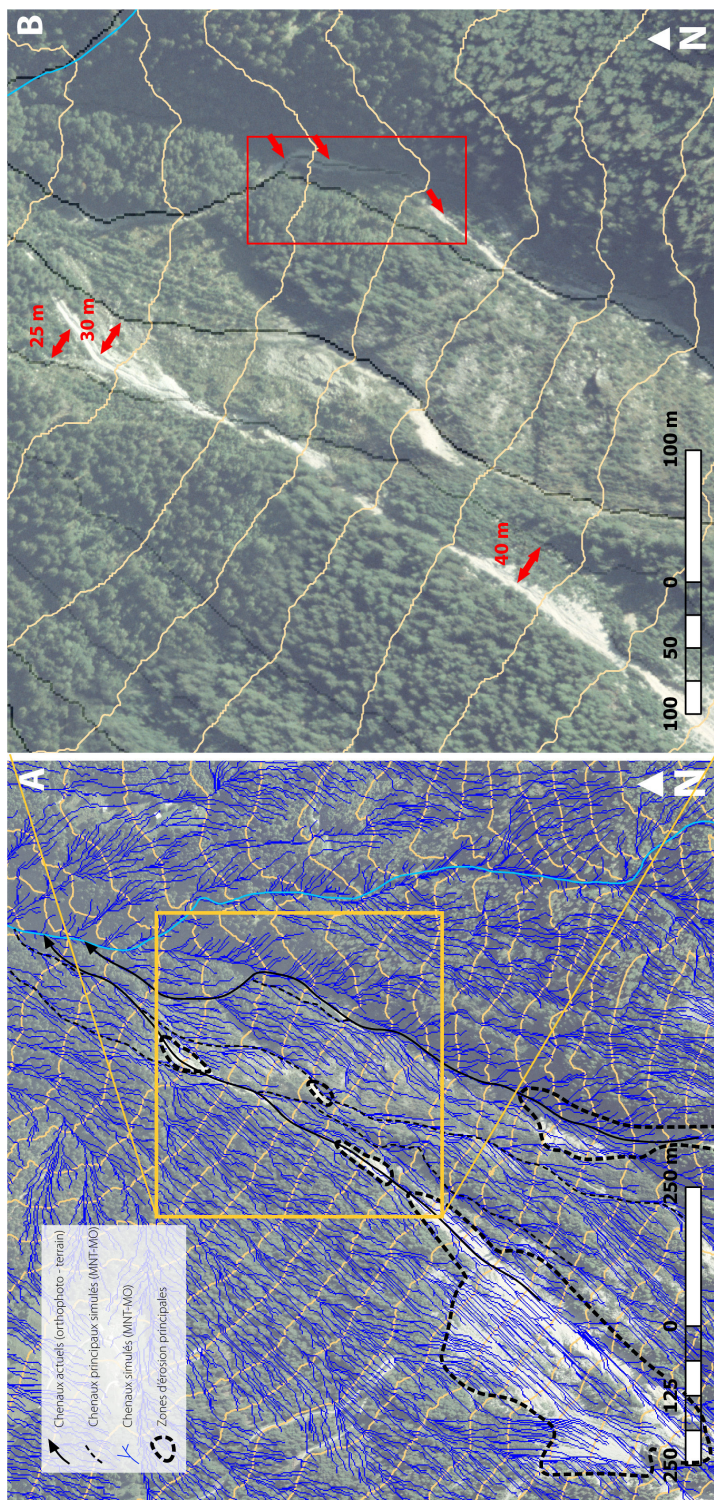


Fig. 5 : Simulation du réseau hydrographique et cartographie des chenaux torrentiels. Reproduit avec l'autorisation de swisstopo (BA110019).

Le comportement hydrogéomorphologique du Meretschibach, à classer dans le type *supply-unlimited*, a compliqué l'application de la méthode et mis en évidence certaines de ses limites. Ceci s'explique d'abord par le fait qu'un seul secteur principal – Bochtür – est à l'origine de la charge solide véhiculée à fréquence régulière par le torrent. Il est de plus difficile d'individualiser différents stocks de matériaux et de délimiter différents chenaux de transport et leurs bassins versants sur la base de la génération du réseau hydrographique. La morphologie parallèle de ce dernier a pour conséquence de délimiter des sous-bassins versants de taille très réduite et longiligne. La délimitation-même des sous-bassins versants peut se révéler aléatoire en raison de la dynamique géomorphologique très active des ravines, affichant une importante variabilité spatio-temporelle. Cette variabilité peut entraîner des décalages entre les données du modèle numérique de terrain, les chenaux observables sur les photographies aériennes et les relevés de terrain (Fig. 5).

4. Discussion

Une cartographie de ce type est quelque peu novatrice, la tendance générale étant de cartographier la totalité d'un secteur choisi ou la totalité de la carte, à l'image de la légende des phénomènes utilisée en Suisse (Kienholz et Kruppenacher, 1995). La méthodologie développée et son produit final fournissent une bonne vision de la distribution spatiale des stocks de sédiments, de leur activité dans la zone source de sédiments, de leur comportement géomorphologique et du type de dépôts qui pourraient potentiellement atteindre le *chenal* principal puis être transportés plus à l'aval par une lave torrentielle. Cette carte est plus compréhensible d'un point morphodynamique qu'une carte réalisée de manière classique, à l'aide de la légende de l'IGUL par exemple, où toutes la surface du bassin versant sont cartographiées. En ce sens, le produit final réalisé permet d'obtenir une évaluation des volumes sédimentaires en transposant cette carte au concept de cascade sédimentaire, tout en liant une carte géomorphologique classique avec des processus dynamiques et en allant plus loin qu'une simple représentation de formes héritées et de processus passés. Notre démarche se distingue également de l'approche généralement adoptée dans le cadre d'un diagnostic du danger lié aux laves torrentielles, où un potentiel d'érosion linéaire d'un chenal est estimé sur la base des formations géologiques affleurantes ou des volumes de dépôts stockés temporairement dans le chenal. Si, dans le cas du Meretschibach, les valeurs indiquées par Geotest et Teyssere et Candolfi (1998) semblent cohérentes (Fig. 6), il faut relever que ce procédé peut conduire à une sous-estimation (importante) des volumes potentiellement mobilisables, puisque la connectivité avec des zones alimentant le chenal en matériaux n'est pas forcément prise en compte ou sous-estimée. Ces travaux antérieurs révèlent ainsi quelques imprécisions. Premièrement, la délimitation même des sous-bassins versants drainés par des rigoles d'érosion est à prendre avec précaution. En 1998, l'emploi de MNT à résolution inférieure à ceux employés actuellement a conduit à une approximation de ces limites. Les investigations de terrain ont montré que le sous-bassin versant drainant la zone d'érosion de Bochtür pouvait fournir des apports en matériaux beaucoup plus élevés que ceux estimés lors de l'élaboration de la carte des dangers.

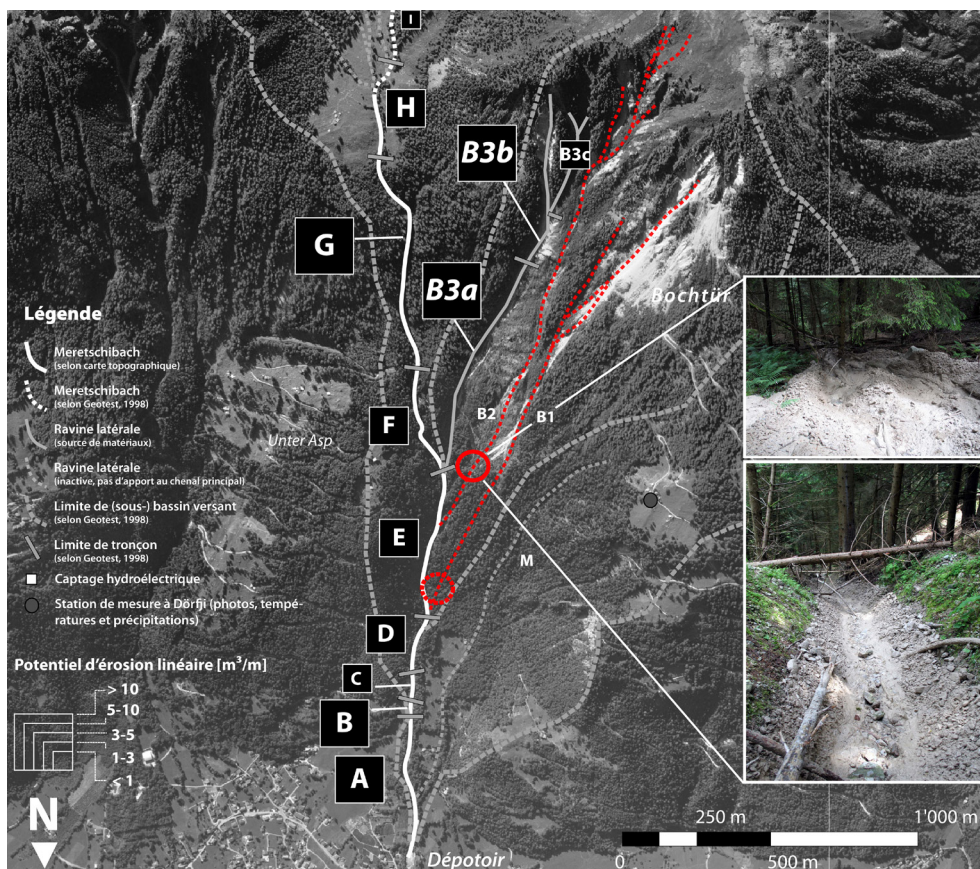


Fig. 6 : Extrait de la carte du potentiel de productivité en matériaux déterminé le long du chenal du Meretschibach et du sous-bassin versant drainant la zone d'érosion de Bochtür (d'après Geotest et T&C, 1998). Les ronds mettent en évidence la différence d'interprétation entre ce document de 1998 (absence de connectivité entre les différentes ravines drainant la zone de Bochtür et le Meretschibach, représentées par des traitillés) et les observations de terrain (deux photos de droite (juin 2008, © V. Garavaglia)). Reproduit avec l'autorisation de swisstopo (BA110019).

5. Conclusion

Les recherches menées jusqu'à ce jour sur les systèmes torrentiels se sont surtout focalisées sur les caractéristiques hydrologiques des laves torrentielles en termes de magnitude et de fréquence ou de mesure du charriage, alors que le fonctionnement géomorphologique du système torrentiel demeure encore en partie méconnu. Une attention particulière devrait être portée sur certains processus géomorphologiques dont le rôle dans la dynamique sédimentaire torrentielle est encore méconnu aujourd'hui, tels que :

- l'importance de l'activité des glissements de terrain en termes de volumes de matériaux apportés dans un chenal : dans le cas du Bruchi par exemple,

les mesures réalisées sur le front d'un glissement d'apparence active ont révélé des vitesses annuelles quasiment nulles;

- la mobilité des stocks de matériaux (transitoires) dans le chenal principal mais également dans les ravines, dont la variabilité saisonnière, en termes de charge sédimentaire, est complexe;
- l'ébouilisation de certains escarpements rocheux sous l'effet de la cryoclasticité, dans différents contextes lithologiques.

Bibliographie

- Bardou, E. (2000). *Cartographie diagnostique des laves torrentielles*. Travail de diplôme de certificat en risques hydrologiques, Lausanne : EPFL, 24 pp. (non publié).
- Bonnet-Staub, I. (2001). Une méthodologie d'analyse et de cartographie de l'aléa « initiation de laves torrentielles » - Application au torrent du Bragousse (France). *Bull. Eng. Geol. Env.*, 59 : 319-327.
- Borselli, L., Cassi, P. et Torri, D. (2008). Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *Catena*, 75 : 268-277.
- Bravard, J.-P. et Petit, F. (2000). *Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial*. Paris: Armand Colin, 221 pp.
- Brayshaw, D. et Hassan, M. A. (2009). Debris flow initiation and sediment recharge in gullies. *Geomorphology*, 109 : 122-131
- Croke, J., Mockler, S., Fogarty, P. et Takken, I. (2005). Sediment concentration changes in runoff pathways from a forest road network and the resultant spatial pattern of catchment connectivity. *Geomorphology*, 68 : 257-268.
- GEOTEST et Teysseire & Candolfi AG (1998). *Agarn, Meretschibach Gefahrenanalyse*. Bericht v9210.2, 27 pp. (non publié).
- Ionesco, T. (1964). Considérations générales concernant les relations entre l'érosion et la végétation au Maroc. *Rev. Géogr. Maroc*, 6 : 17-28.
- Joly, F.M. (1962). Principes pour une méthode de cartographie géomorphologique. *Bull. Ass. Géogr. Franç.*, 309/310 : 271-277.
- Kienholz, H. et Kruppenacher, B. (1995). *Légende modulable pour la cartographie des phénomènes. Recommandations*. Berne : OFEFP et OFEE, 19 pp.
- Loat, R. (2007). Le recensement des régions vulnérables. *Environnement*, 2 : 14-17.
- Otto, J.-C. (2006). *Paraglacial sediment storage quantification in the Turtmann Valley, Swiss Alps*. PhD Thesis, Bonn : Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, 195 pp.
- Reid, L.M. et Dunne, T. (1996). *Rapid evaluation of sediment budgets*. Reiskirchen: Catena Verlag, 164 pp.
- Rey, F., Ballais, J.-L., Marre, A. et Rovéra, G. (2004). Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *Comptes Rendus Géoscience*, 336 (1) : 991-998.
- Schoeneich, P. (1992). Comparaison des systèmes de légendes français, allemand et suisse – principes de la légende IGUL. In P. Schoeneich et E. Reynard (eds), *Cartographie géomorphologique – Cartographie des risques* (pp. 15-24). Lausanne : Institut de Géographie, Travaux et Recherches 9.
- Schoeneich, P., Reynard, E. et Pierrhumbert, G. (1998). Geomorphological mapping in the Swiss Alps and Prealps. *Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie*, 11 : 145–153.

- Schrott, L. et Adams, T. (2002). Quantifying sediment storage and Holocene denudation. *Z. Geomorph. N.F.*, 128 : 129-145.
- Sterling, S. et Slaymaker, O. (2007). Lithologic control of debris torrent occurrence. *Geomorphology*, 86 : 307-319.
- Teyssseire & Candolfi (2006). *Auflageprojekt Schutzkonzept Bruchji*. Technischer Bericht Nr. 1762a - 8b. Kanton Wallis, Gemeinde Naters, 27 pp. (non publié).
- Theler, D. et Reynard, E. (2008). Assessing sediment dynamics from geomorphological maps: Bruchi torrential system, Swiss Alps. *Journal of maps*, v2008 : 277-289.
- Theler, D., Reynard, E., Lambiel, C. et Bardou, E. (2010). The contribution of geomorphological mapping to sediment transfer evaluation in small alpine catchments. *Geomorphology*, 124 : 113-123.
- Veyrat-Charvillon, S. (2005). *Elaboration d'une méthode de prédiction du volume maximal d'une lave torrentielle, topographie de terrain et stéréophotogrammétrie sur photographies aériennes d'archives. Torrents du Manival, du Merdarêt et des Arches (Alpes-du-Nord, Isère, France)*. Thèse, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand 2.
- Veyrat-Charvillon, S. et Mémier, M. (2006). Stereophotogrammetry of archive data and topographic approaches to debris-flow torrent measurements: calculation of channel-sediment states and a partial sediment budget for Manival torrent (Isère, France). *Earth Surf. Process. Landforms*, 31 : 201-219.
- Warburton, J. (2007). Sediment budgets and rates of sediment transfer across cold environments in Europe: a commentary. *Geogr. Ann.*, 89 A (1) : 95-100.
- Zimmermann, M., Mani, P. et Romang, H. (1997). Magnitude-frequency aspects of alpine debris flows. *Eclogae geol. Helv.*, 90 : 415-420.