

3. La dynamique torrentielle actuelle

3.1. Introduction de la troisième partie

Comme nous l'avons démontré dans les deux premières parties, les liens qui unissent caractéristiques du bassin-versant et fonctionnement du torrent sont très étroits au sein des systèmes torrentiels. Toutefois, si ces résultats permettent de mieux comprendre l'état actuel des torrents, ils ne suffisent pas à cerner le comportement réel des différents systèmes torrentiels de la vallée.

Cette troisième partie se focalise sur l'analyse de la dynamique actuelle de différents systèmes torrentiels de la vallée de la Clarée dans le but d'en souligner les principales caractéristiques. Nous avons tout d'abord cherché, à travers une analyse croisée des données météorologiques et du recensement des crues torrentielles, à cerner les facteurs hydrométéorologiques conduisant au déclenchement des crues torrentielles dans le secteur étudié. Avant d'appliquer différentes méthodes visant à estimer le volume de matériaux susceptible d'être mobilisé lors d'une crue majeure. Enfin, une large partie de notre analyse de la dynamique torrentielle se base sur une approche *in situ* à échelle fine de l'évolution des lits torrentiels. Le suivi topométrique de plusieurs chenaux torrentiels de la vallée nous a permis d'étudier le fonctionnement normal de ces torrents mais aussi de déterminer les modalités de transport de la charge grossière et les conséquences morphogènes de plusieurs épisodes de crue HF-BM.

3.2. Caractéristiques de l'aléa torrentiel dans la vallée de la Clarée

3.2.1. Les principales sources sédimentaires

Les matériaux solides transportés lors d'une crue torrentielle peuvent avoir trois origines distinctes : des matériaux provenant de l'érosion des versants et déposés dans le lit, des matériaux issus de l'érosion des versants pendant la crue, ou des matériaux provenant de l'érosion du lit (Meunier, 1991 ; Coussot, 1996). Il faut noter que l'apport de l'érosion des versants dépend en grande partie des caractéristiques des matériaux qui s'y trouvent. En effet, les matériaux non cohérents seront plus facilement érodés et mobilisés par la crue torrentielle. C'est pourquoi des versants constitués de matériaux meubles ou peu cohérents (tels que des dépôts morainiques, des éboulis ou des terrains glissés), seront susceptibles de fournir d'importantes quantités de matériaux capables d'influencer la magnitude d'une crue torrentielle.

In fine, compte tenu de sa complexité, la dynamique sédimentaire dans les bassins-versants torrentiels –de la production à l'alimentation du chenal torrentiel– n'apparaît pas homogène ni spatialement ni temporellement (tableau 7).

	éboulis	dépôts morainiques	glissements de terrain
Acles	X	X	
Buffère		X	
Chardonnet		X	
Combal	X	X	
Creuzet		X	
Cristol		X	
Enrouye	X		
Fournéous	X		
Gamattes			X
Granon		X	X
Malefosse	X		
Pinatelle	X		
Rivet			X
Roubion		X	
Ruine	X		X
Ruines	X		
Sables	X		
Vallon (Név)	X	X	
Vallon (VdP)	X	X	X

Tableau 7 : principales sources sédimentaires des torrents de la basse vallée de la Clarée

3.2.1.1. Les dépôts morainiques

Les héritages des périodes froides sont visibles sous la forme de dépôts de matériaux morainiques dans une grande partie de la vallée de la Clarée. Ces formations sont anciennes puisqu'elles sont les reliques du glacier qui occupait la vallée durant le Würm (Barféty *et al.* 1995). Ces dépôts se concentrent dans quelques secteurs de la vallée où les conditions topographiques ont permis leur maintien jusqu'à nos jours : sur les replats des grands bassins-versants torrentiels comme le Granon et les Acles, ou au niveau des cols de diffluence comme dans le bassin du Roubion (photo. 21 et fig. 13). Des matériaux morainiques se retrouvent aussi sous forme de placages sur la plupart des versants de la vallée. Ces héritages glaciaires sont parfois ravinés par le ruissellement et sont donc susceptibles de fournir des matériaux aisément mobilisables par les torrents d'autant qu'ils contiennent le plus souvent une fraction fine importante. Cependant, si les dépôts morainiques constituent d'importantes réserves de matériaux mobilisables dans certains bassins-versants torrentiels, ils n'en demeurent pas moins des héritages et sont donc non renouvelables.

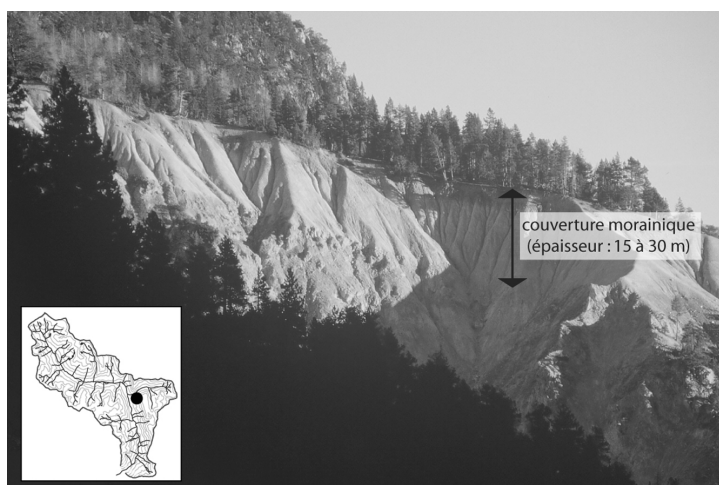


Photo. 21 : exemple de couverture morainique dans le bassin-versant du torrent de Roubion

3.2.1.2. Les glissements de terrain

Certains versants des torrents de la vallée de la Clarée sont occupés par de vastes glissements de terrain. Ces versants déstabilisés sont surtout présents en haute vallée, en rive gauche de la Clarée (Blais, 1978) ; alors qu'en basse vallée on les retrouve principalement en rive droite de la rivière principale (fig. 13). Ces mouvements de terrain qui touchent souvent la couverture (formation de versants composites) et son substrat (Barféty *et al.*, 1995), sont en règle générale peu ou pas actifs (photo. 22). Toutefois, lorsqu'ils atteignent le talweg d'un chenal torrentiel, ces versants déstabilisés peuvent être sensibles à une reprise d'érosion. Si le pied du glissement est affouillé lors d'une crue torrentielle, il peut y avoir une réactivation locale ; ces versants déstabilisés sont alors susceptibles de fournir de façon régulière d'importantes quantités de matériaux aux torrents (Barféty *et al.*, 1995).

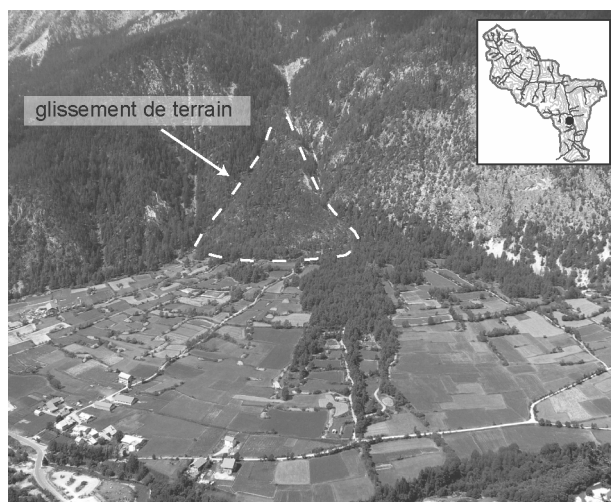


Photo. 22 : exemple de glissement de terrain dans le bassin-versant du torrent des Gamattes

3.2.1.3. Les éboulis

Les vastes corniches rocheuses taillées dans les calcaires et dolomies triasiques qui dominent par endroits la vallée de la Clarée, sont sensibles à la cryoclastie d'autant qu'elles sont parfois l'objet d'une fracturation préalable d'origine tectonique (Blais, 1978). Les éboulis se situent principalement sous des corniches calcaréo-dolomitico-quartzitiques, car les reliefs du Permo-houillier ne présentent pas d'abrupts sub-verticaux susceptibles d'alimenter une accumulation de blocs (Blais, 1978). Il est important de souligner le rôle majeur de la pression interstitielle et de la gélifraction dans le fonctionnement et la production des éboulis actuels qui sont donc particulièrement sensibles aux fluctuations climatiques (Francou, 1988 ; Bertran *et al.*, 2004 ; Jomelli *et al.*, 2004). On comptabilise près de 145 jours de gel par an en moyenne à Briançon⁴² dont une quinzaine sans dégel. La gélifraction très active fournit une grande quantité de matériaux, même si le phénomène de détente consécutive au retrait post-glaciaire peut aussi jouer un rôle dans la fracturation des corniches rocheuses (Vivian, 1997 ; Cossart, 2002), au même titre que l'activité tectonique (Blais, 1978).

Ces éboulis fournissent directement des matériaux à certains organismes torrentiels. En effet, grâce aux différents agents morphogéniques qui interviennent dans le déplacement des matériaux éboulés (*i.e.* gélifluxion, avalanche, coulée de débris élémentaire), les éboulis peuvent alimenter le chenal torrentiel. Le Ravin de Combal offre un bel exemple de ces organismes torrentiels dont la partie supérieure du bassin-versant est partiellement constituée d'éboulis vifs (photo. 23).

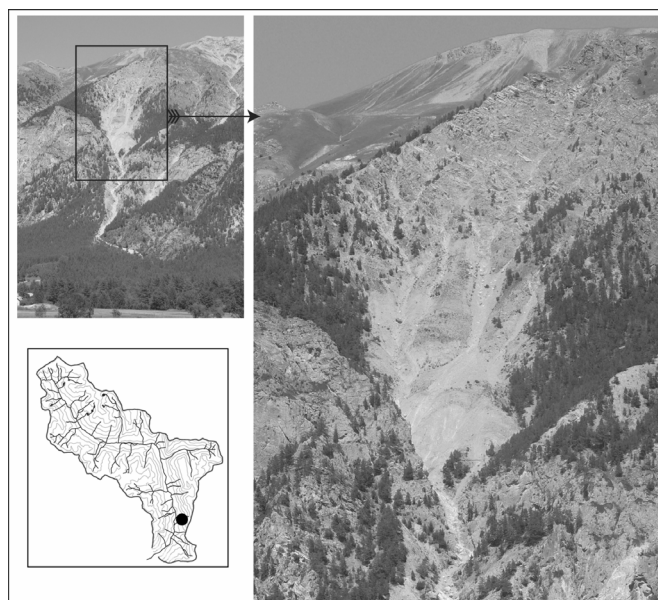


Photo. 23 : exemple d'éboulis susceptibles d'alimenter un torrent, bassin-versant du Ravin de Combal

⁴² Source : CEMBREU 1961-2003

3.2.1.4. *Le lit torrentiel*

Les lits torrentiels comportent quantité de matériaux susceptibles d'être mobilisés par une crue torrentielle. Ces matériaux peuvent provenir de l'affouillement des berges, de l'incision du chenal. Si les apports latéraux (glissement de terrain, couverture morainique...) sont souvent déterminants dans la composition des crues torrentielles (Bonnet-Staub, 2001), le volume provenant de l'incision du lit et des berges peut parfois constituer la principale source de matériaux (Lahousse et Salvador, 1998b). Les matériaux qui constituent les lits torrentiels sont le plus souvent peu cohérents. Pourtant, certains lits torrentiels, notamment dans le cas des systèmes torrentiels les plus vastes, sont constitués d'un pavage de blocs qui limite l'incision et la mobilisation des matériaux qui forme le lit torrentiel (cf. 1.5.2.).

Les analyses topométriques menées dans les chenaux torrentiels de la vallée de la Clarée, ont permis de mettre en évidence l'importance des matériaux provenant du lit dans le fonctionnement courant des torrents.

3.2.2. Les facteurs déclencheurs des crues torrentielles dans la vallée de la Clarée

3.2.2.1. *L'apport du recensement des crues torrentielles*

Les données historiques sont régulièrement utilisées dans l'étude des risques naturels et en particulier dans les zones montagneuses (Dollfus et d'Ercole, 1996 ; Warner, 2000 ; Carrara *et al.*, 2003 ; Meschinet de Richemond, 2003 ; Petrucci et Polemio, 2003 ; Barnikel et Becht, 2003 ; Barnikel, 2004). Leur utilisation a pour but d'appréhender la localisation et la fréquence des différents types d'aléas.

L'inventaire historique des crues torrentielles, qui consiste à relever dans l'ensemble des sources historiques disponibles les épisodes de crues torrentielles, permet, *a priori*, de déterminer l'évolution de la dynamique torrentielle (Tropéano et Turconi, 2004), pourtant de nombreux biais en limitent la portée.

Encadré 6 : le recensement historique des crues torrentielles

La base de données la plus complète sur les risques naturels en vallée de la Clarée est celle du service R.T.M. des Hautes-Alpes. Cette base

de données s'est largement développée à partir de l'Atlas départemental des risques naturels et technologiques des Hautes Alpes, (Fanthou et al., 1991) résultat des recherches de T. Fanthou (1994). Elle s'est enrichie des observations du personnel et des stagiaires du RTM ainsi que des travaux universitaires comme celui de S. Baraille (2003). Une étude récente (Blanchard et al., 2006) et nos propres recherches en archives complétées par notre suivi régulier des torrents de la Clarée ont encore permis d'accroître le nombre d'événements répertoriés. En ce qui concerne les crues torrentielles, cet inventaire débute en 1437 avec le débordement du torrent des Acles et regroupe plus d'une centaine de crues torrentielles sur l'ensemble du bassin-versant de la Clarée. Pourtant, de nombreux éléments limitent la portée de tels recensements et leurs utilisations nécessitent certaines précautions mises en évidence par différents auteurs (Ibsen et Brunsden, 1996 ; Lahousse, 1997 ; Petrucci et Polemio, 2003).

Comme ailleurs, l'Histoire du Briançonnais ne s'est pas déroulée sans de nombreux tumultes (guerres, incendies, inondations...) qui peuvent être à l'origine d'autant de hiatus dans la chronologie des sources historiques.

En fait, la qualité de cet inventaire des crues torrentielles est biaisée par une forte surreprésentation des événements depuis le milieu du 20^{ème} siècle ; la période 1950-2005 regroupe plus de 72% des crues torrentielles recensées depuis 1437 (fig. 59). C'est pourquoi, dans la présente étude, l'utilisation du recensement historique des crues torrentielles se limite le plus souvent à la période la plus récente qui, sans forcément être exhaustive, semble néanmoins plus représentative de la dynamique torrentielle. La création, en 1874, de trois périmètres par le service RTM sur les torrents de Malefosse, de la Pinatelle et de Roubion et la mutation socio-économique de la vallée à partir de la fin des années 1960, peuvent en effet expliquer que de plus en plus de crues sont recensées depuis le milieu du 20^{ème} siècle.

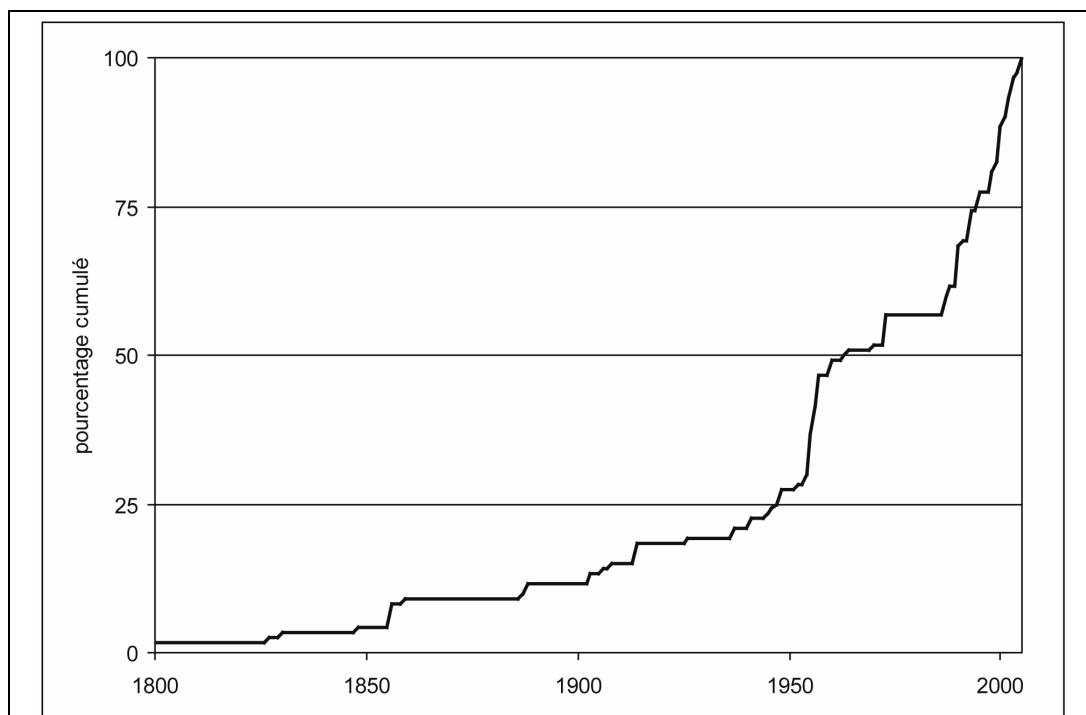
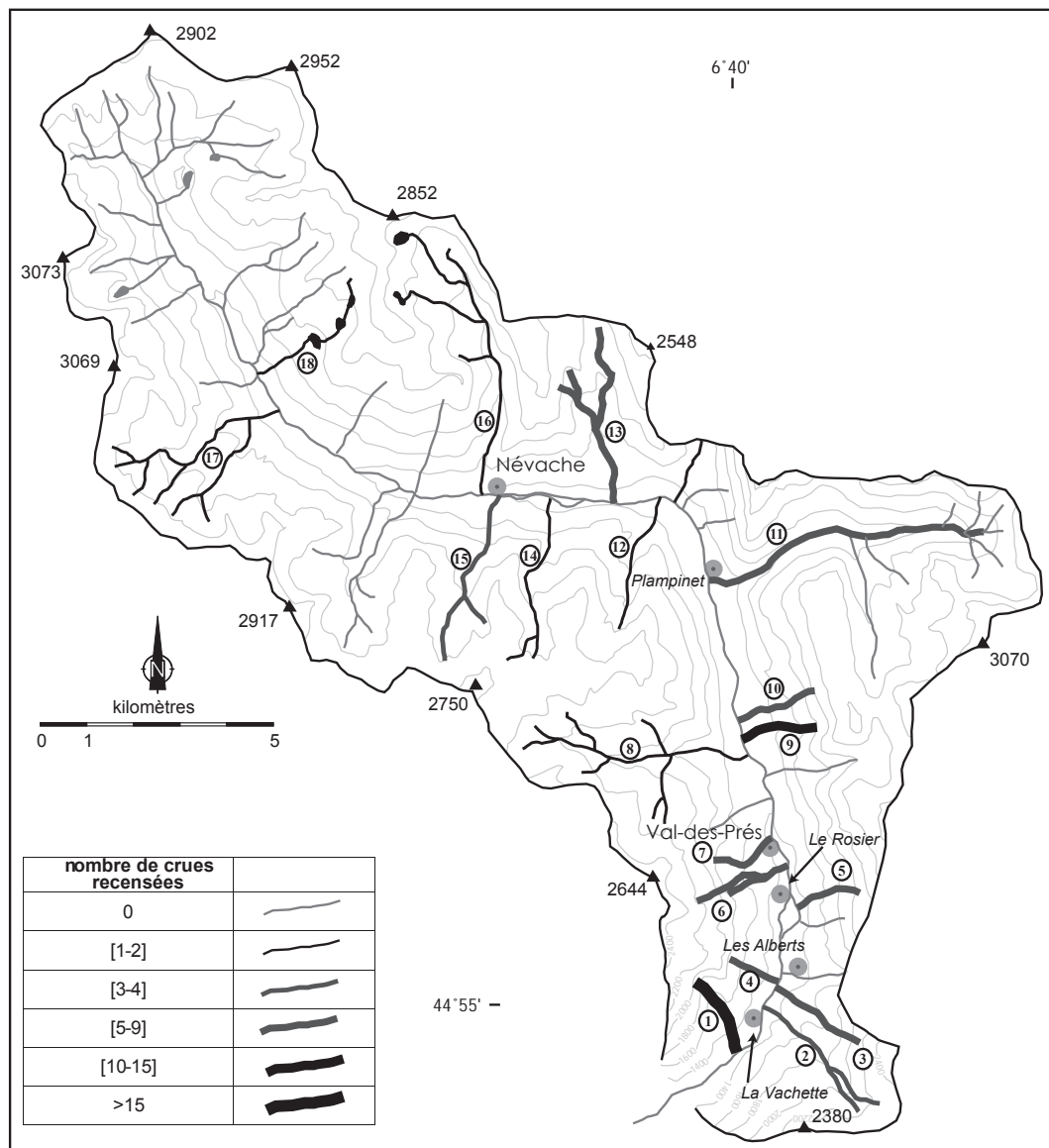


Figure 59 : pourcentage cumulé des crues torrentielles recensées dans la vallée de la Clarée

Par ailleurs, la répartition géographique des crues torrentielles répertoriées montre l'importance primordiale de la présence d'enjeux dans le recensement des crues. En fait la qualité de l'information tirée de l'inventaire historique des crues est subordonnée à l'importance des dégâts causés aux aménagements présents sur les cônes de déjection torrentiels ou en fond de vallée (fig. 60). Ainsi, il n'y a quasiment pas de crues recensées en amont de Névache Ville-Haute, alors que la basse vallée de la Clarée –en aval du hameau de Plampinet– compte plus de 74% des crues torrentielles recensées. De plus, deux torrents de la basse vallée, le Ravin de la Pinatelle et le torrent de Malefosse, regroupent à eux seuls plus de 27% des crues torrentielles recensées sur l'ensemble de la vallée. La présence d'enjeux stratégiques à l'exutoire de ces torrents –la route menant à Névache et la route reliant Briançon au col de Montgenèvre– et surtout le fait que ces deux torrents aient été anciennement périmétrés et corrigés par le service RTM, peut expliquer que la moindre de leurs crues ait été répertoriée contrairement aux autres organismes torrentiels.

Pourtant, si l'inventaire des crues torrentielles comporte de nombreux biais qui en limitent l'intérêt en ce qui concerne la détermination précise de l'évolution de l'activité torrentielle, il reste néanmoins possible d'en tirer de nombreux enseignements quant à la

dynamique des torrents, tout au moins en ce qui concerne la période la plus récente.



1. Le Malefosse	7. Le Rivet	13. Le Roubion
2. Le Vallon	8. Le Granon	14. Le Longuet
3. Les Ruines	9. La Pinatelle	15. Le Cristol
4. L'Enrouye	10. Les Sables	16. Le Vallon
5. Le Cratourié	11. Les Acles	17. Le Chardonnet
6. La Ruine	12. Le Creuzet	18. Le Laramon

Figure 60 : localisation des crues torrentielles recensées (période 1437-2005)

Au-delà des quelques limites détaillées plus haut, l'analyse du recensement des crues torrentielles apporte des précisions sur la dynamique actuelle des organismes torrentiels. L'étude de l'inventaire historique montre que la répartition mensuelle des épisodes de crues torrentielles est marquée par une forte représentation des mois d'été, puisque les mois de juin, juillet et août regroupent 75,6% des jours de crue. Les mois de juin et juillet regroupant à eux seuls plus de 62% des épisodes de crues torrentielles pour la période 1950-2005.

Or, dans son étude sur les crues dommageables en Haute-Durance, S. Baraille propose une typologie des situations météorologiques à l'origine des crues (Baraille, 2001 et 2003). Elles sont au nombre de quatre :

- les retours d'est, appelé parfois "coup de Lombarde" (saisons prédominantes : printemps, automne)
- les remontées du sud, qui est une advection méridienne d'air méditerranéen, (saisons prédominantes : automne, printemps)
- les perturbations venant d'ouest à sud-ouest, (saisons prédominantes : printemps, automne)
- les orages ponctuels, (saison prédominante : été)

Cela signifie que, compte tenu de la répartition majoritairement estivale des crues torrentielles, celles-ci sont donc principalement déclenchées par des précipitations orageuses.

Lorsque l'on examine la répartition mensuelle des crues torrentielles depuis le milieu du 20^{ème} siècle, il apparaît que plusieurs crues peuvent avoir lieu le même jour (fig. 61 et 62). Il est donc possible de faire une distinction entre les crues recensées (85 sur la période 1950-2005) et les jours de crue torrentielle (45 dont 41 précisément datés sur la période 1950-2005). Cela signifie que dans près de la moitié des cas (52,9% sur la période 1950-2005), lors d'un même épisode de crue torrentielle plusieurs organismes connaissent une crue simultanément. La fréquence élevée de ces crues multiples simultanées n'est pas sans conséquences en terme de gestion de risque torrentiel.

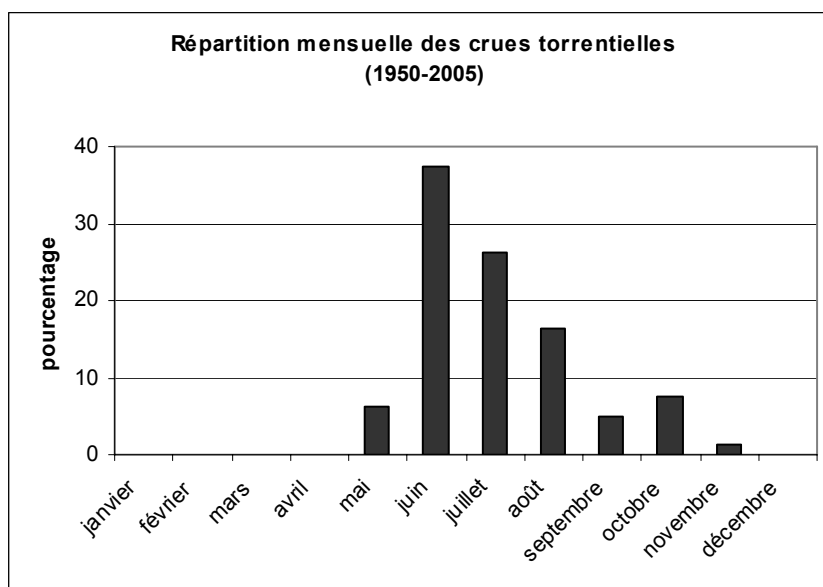


Figure 61 : répartition mensuelle des crues torrentielles recensées

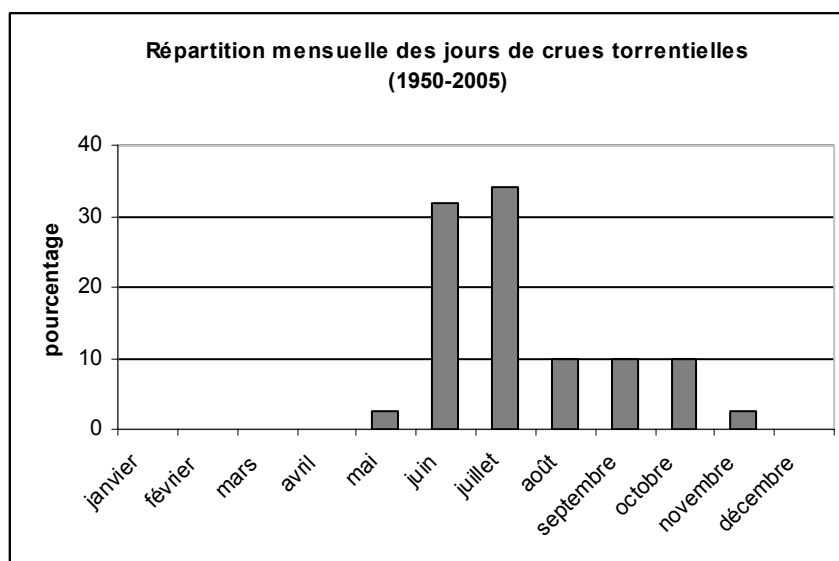


Figure 62 : répartition mensuelle des jours de crue torrentielle recensée

3.2.2.2. *L'importance relative des précipitations orageuses dans le déclenchement des crues torrentielles*

S'il est démontré que les précipitations orageuses jouent un rôle déterminant dans le déclenchement des crues torrentielles (Baraille, 2001), il devrait être possible d'observer une relation entre l'évolution de la fréquence des orages et le nombre

de crues torrentielles. En effet, dans le recensement des crues torrentielles, les témoignages font souvent référence aux orages comme événement météorologique déclencheur. Dans le Briançonnais, la base de donnée la plus complète concernant les orages est celle du CEMBREU (Centre Européen Médical Bioclimatique de Recherches et d'Enseignement Universitaire). Situé à proximité de Briançon, le CEMBREU effectue de nombreux relevés météorologiques dont un recensement des jours d'orages (défini par l'occurrence du tonnerre). Lorsque l'on compare la répartition mensuelle respective des jours d'orage, des jours de crue torrentielle recensée et des jours où l'on enregistre des précipitations journalières supérieures à 30 mm ; on constate que la répartition mensuelle des jours de crue torrentielle est effectivement plus liée aux orages qu'aux précipitations journalières supérieures à 30 mm (fig. 63).

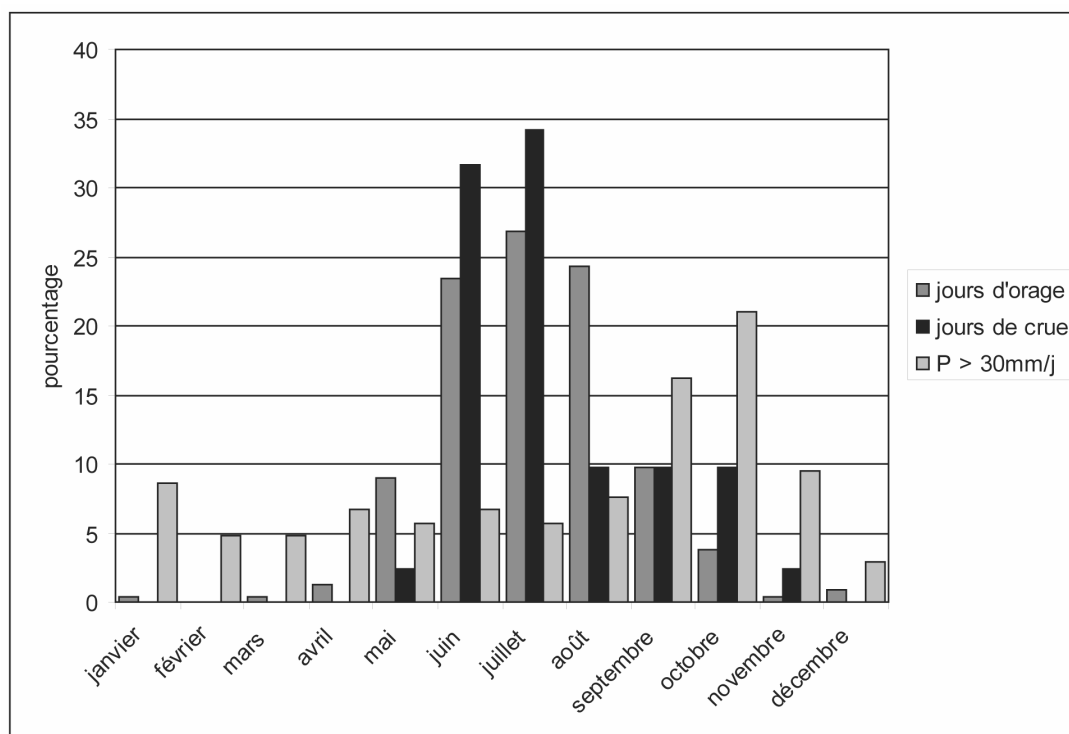


Figure 63 : répartition mensuelle des jours d'orage, des jours de crue torrentielle recensée et des jours avec des précipitations supérieures à 30 mm
 orages à Briançon : CEMBREU, 1970-2004
 jours de crue torrentielle : recensement des crues, 1950-2005
 P > 30 mm/j à Névache : Météo France, 1974-2003

On constate aussi que le lien entre jours d'orage et jours de crue torrentielle est vérifié pour les mois de juin et de juillet, mais pas pour le mois d'août durant lequel on observe environ 24% des jours d'orage mais moins de 10% des jours de crue torrentielle. Ce résultat pourrait tout d'abord être dû au manque de représentativité spatiale des données portant sur les orages. En effet, des données relevées à Briançon sont comparées avec l'inventaire des crues torrentielles dans l'ensemble

de la vallée de la Clarée. Pourtant, si l'on tient compte de la proximité de Briançon avec les torrents de la basse vallée, qui sont les plus présents dans le recensement des crues (cf. 3.2.2.1.), on peut penser que s'il y avait un lien significatif entre ces deux paramètres, il eût été détecté.

La fréquence des jours de crue torrentielle en septembre et octobre (de l'ordre de 10% de l'ensemble des jours de crue), ne semble pas liée à l'occurrence des précipitations orageuses mais plutôt à un accroissement sensible de l'intensité des précipitations journalières durant l'automne (Péguy, 1978).

Comme on le voit, la simple analyse de la fréquence des orages ou des jours de précipitations supérieures à 30mm, ne permet pas d'expliquer la répartition des crues torrentielles au cours de l'année. Plusieurs autres facteurs pourraient expliquer ce manque de relation entre fréquence des orages et fréquence des crues torrentielles :

1. les relations entre durée et intensité des précipitations dans le déclenchement des crues torrentielles

De très nombreux auteurs ont étudié les relations entre les caractéristiques des précipitations et le déclenchement des mouvements de terrain et des *debris flows* en particulier (Caine, 1980 ; Wieczoreck ; 1987 ; Ceriani *et al.*, 1992 ; Wilson et Wieczoreck, 1995 ; Crosta et Frattini, 2000 ; Montgomery *et al.*, 2000). Ils ont mis en évidence les liens qui existent entre l'intensité des précipitations et leur durée dans le déclenchement des laves torrentielles (fig. 64).

Ces travaux soulignent le fait que seules les précipitations les plus intenses et/ou les plus longues se traduiront par le déclenchement d'une crue torrentielle. Ce constat permet d'expliquer la faible corrélation observée les jours de précipitations supérieures à 30 mm et les jours de crue torrentielle. En effet, ces événements pluvieux relevés sur 24 heures ne sont pas forcément associés à des précipitations d'une intensité suffisante au déclenchement d'une crue torrentielle. De même, les orages recensés n'ont parfois engendré que des précipitations de faible intensité ou correspondent à des cellules orageuses localisées n'ayant qu'un effet ponctuel.

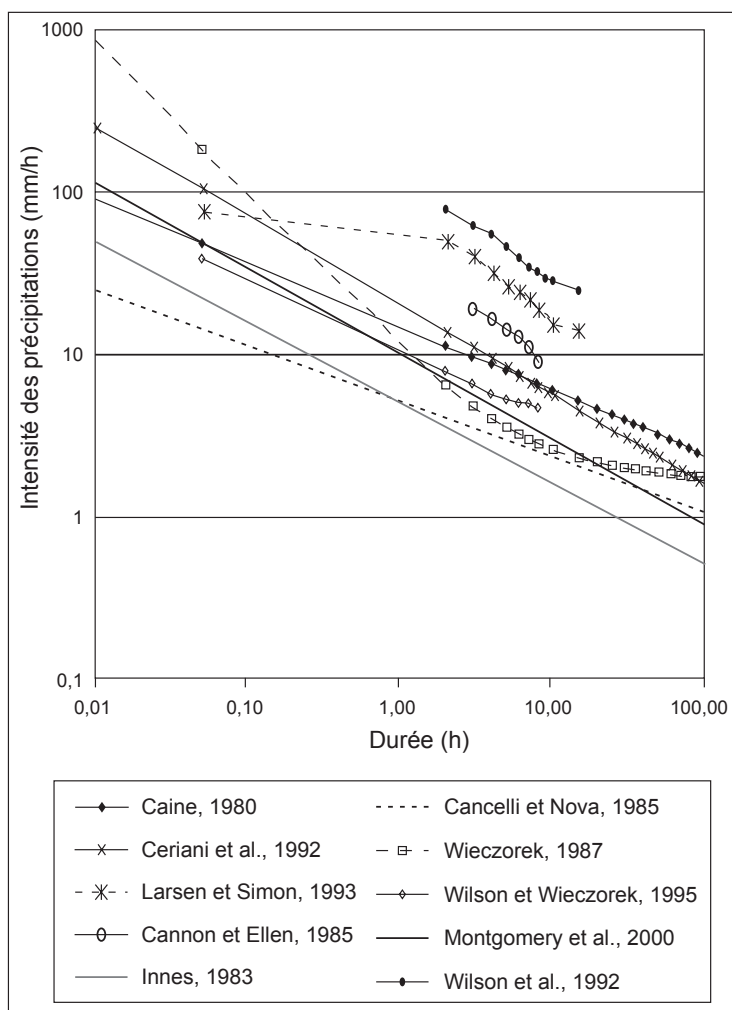


Figure 64 : seuils de déclenchement des laves torrentielles selon les caractéristiques de durée et d'intensité des précipitations (d'après Crosta et Frattini, 2000)

L'analyse croisée du recensement des crues torrentielles et des données pluviométriques journalières relevées à Briançon et à Névache ne permet pas de déterminer un seuil pluviométrique dans le déclenchement des crues torrentielles. D'une part, les données disponibles ne correspondent qu'à un pas de temps journalier qui n'est pas adapté aux précipitations orageuses ; d'autre part, la distance qui sépare les stations météorologiques de Névache et Briançon des bassins versant torrentiels limite la représentativité des données pluviométriques disponibles. Par exemple, les 19 et 20 juillet 1987, alors que les torrents des Ruines et de la Pinatelle ont connu des crues ayant coupé respectivement la RN 94 et la RD 994g, les stations pluviométriques de Briançon et Névache n'ont relevé aucune précipitation. Au total, sur les 20 jours de crues torrentielles répertoriées entre 1974 et 2003, des précipitations inférieures à 10 mm ont été relevées à 12 reprises à Névache et 9 fois à Briançon (fig. 65).

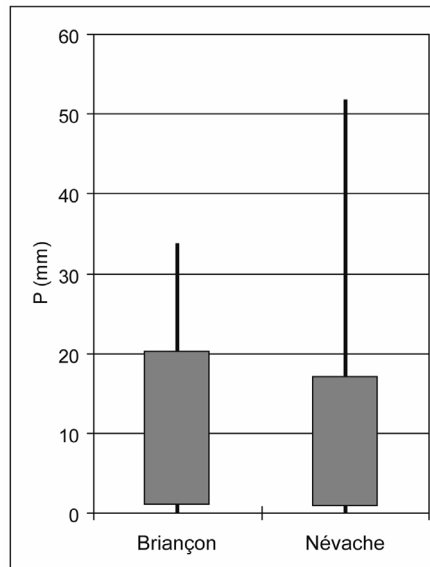


Figure 65 : précipitations journalières (mm) relevées aux stations de Briançon et Névache lors des jours de crues torrentielles recensées dans la vallée de la Clarée
Névache : *minimum* = 0 mm, *moyenne* = 15,3 mm, *maximum* = 82 mm
Briançon : *minimum* = 0 mm, *moyenne* = 14,7 mm, *maximum* = 57,8 mm
(1974-2003, n=20)

2. l'importance du contexte pluviométrique précédent le déclenchement des crues

Les précipitations des jours précédents les crues torrentielles peuvent avoir une influence non négligeable dans le déclenchement de ces crues. En effet, on peut s'attendre à ce que les sols saturés en eau par les précipitations ou la fonte des neiges, soient plus facilement mobilisables (Iverson, 1997 ; Bonnet-Staub, 1998 ; Wiczorek et Glade, 2005). Ainsi, P. Aléotti (2004), en se basant sur l'analyse des mouvements de terrain superficiels dans la région du Piémont italien, caractérise les précipitations en distinguant : les précipitations des jours précédents le mouvement de terrain et les précipitations critiques directement responsables du déclenchement du mouvement du terrain (fig. 66).

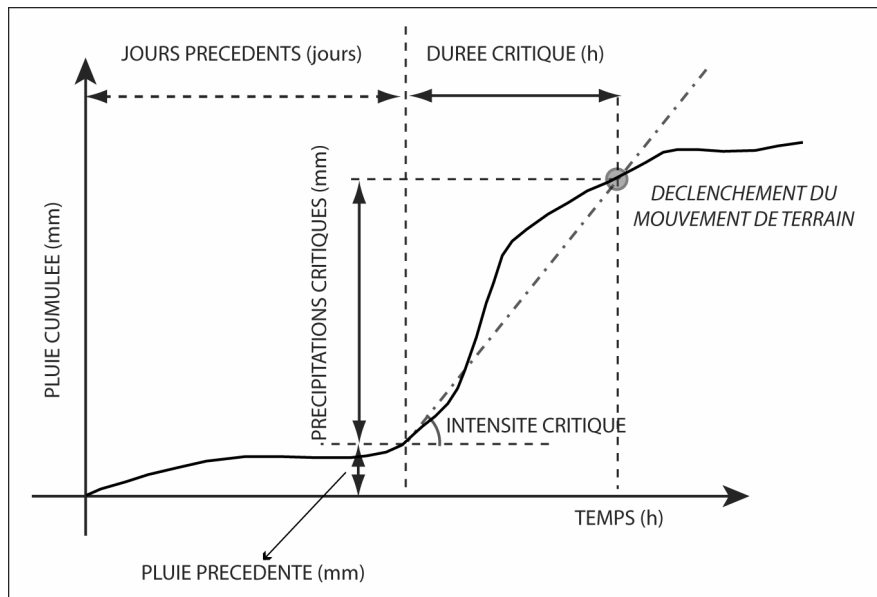


Figure 66 : les différents paramètres des précipitations dans le déclenchement des mouvements de terrain (d'après Aléotti, 2004)

Pourtant une étude menée dans les Alpes italiennes analysant la relation entre précipitations et occurrence des coulées de débris, n'a pas mis en évidence de relation statistique significative entre les pluies antécédentes et les événements orageux déclencheurs de coulées de débris (Deganutti *et al.*, 2000).

En ce qui concerne la vallée de la Clarée, le manque de significativité des données météorologiques ne permet pas de déterminer clairement l'importance du rôle joué par les précipitations antécédentes dans le déclenchement des crues torrentielles. En effet, l'analyse des précipitations journalières à Névache prouve la faible représentativité des relevés des précipitations en particulier lors des précipitations orageuses estivales. Ainsi, le 24 juillet 1995 et bien qu'il y eut une quinzaine de crues torrentielles dans le Briançonnais dont 5 en vallée de la Clarée (Lahousse et Romelé, 2000), on ne releva que 2,2 mm de précipitations à Névache – et 0,8 mm durant les 10 jours précédents – alors que les estimations s'élèvent à 100 mm en 2 heures dans certains bassins-versants touchés (Lahousse et Salvador, 1998a).

3. le rôle des matériaux mobilisables disponibles

Dans la vallée de la Clarée, la répartition des crues torrentielles au cours de l'année montre de façon nette le rôle très important joué par les précipitations d'été dans leur déclenchement (fig. 67). Pourtant, lorsque l'on compare la répartition annuelle des orages et des crues torrentielles, on observe une nette dissemblance

entre le régime des précipitations orageuses et la répartition annuelle des crues torrentielles. En effet, le mois de juin regroupe 23,3% des jours d'orage et 38% des crues torrentielles recensées alors que le mois d'août regroupe 24,2% des jours d'orage et 16,2% des crues torrentielles (fig. 67).

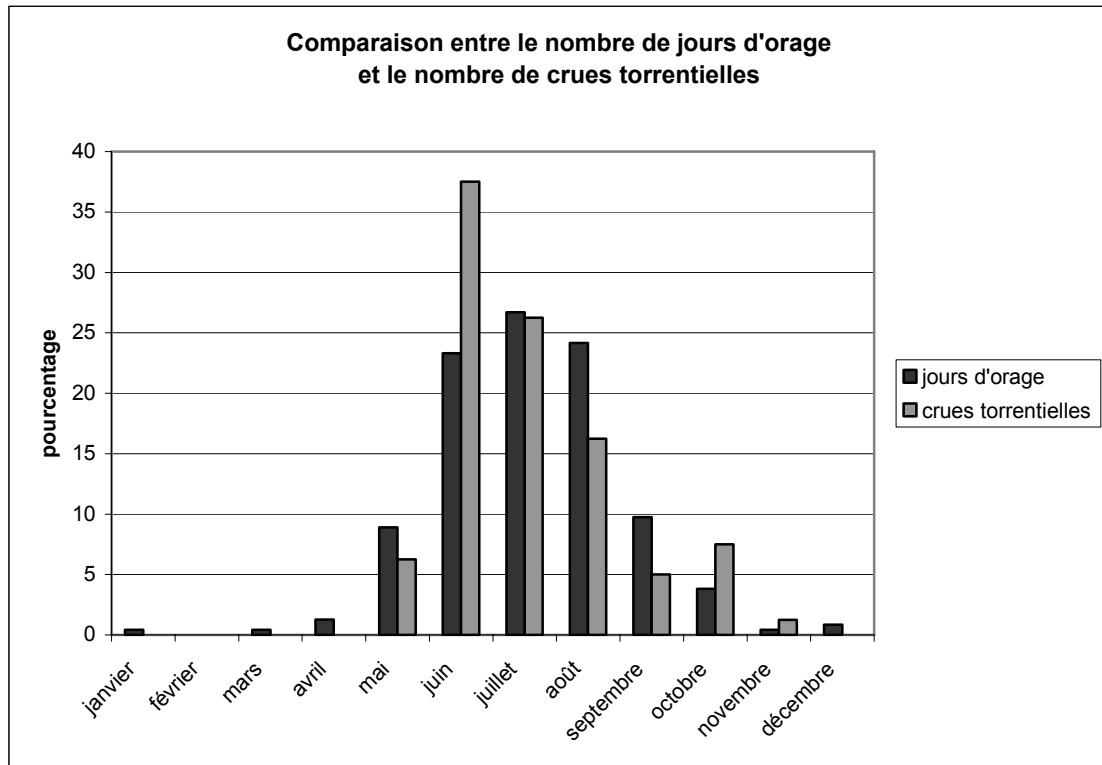


Figure 67 : comparaison entre la répartition annuelle des jours d'orage et des crues torrentielles

(sources : jours d'orage sur la période 1970-2003, CEMBREU
crues torrentielles : recensement des crues torrentielles 1950-2005)

Cette différence semble d'avantage liée au tarissement progressif des matériaux mobilisables par le torrent plutôt qu'à une baisse de l'extension ou de l'intensité des précipitations. En effet, pour qu'il y ait une crue torrentielle avec un transit sédimentaire élevé, il faut à la fois des matériaux disponibles et un événement déclencheur qui est le plus souvent une pluie intense de type orage de convection (Baraille, 2001). En fait, les précipitations intenses revêtent un caractère nécessaire mais non suffisant dans le déclenchement des laves torrentielles. Ce constat a été conceptualisé sous la forme d'un schéma (fig. 68) sur lesquels sont représentés :

- Les prédispositions de base qui correspondent aux environnements topographique et géologique. Elles sont relativement stables dans le temps mais peuvent brusquement changer à la faveur par exemple d'un glissement de terrain qui modifie l'alimentation du torrent en

matériaux mobilisables ; ceci est représenté dans le graphique par une forte augmentation de ces prédispositions de base.

- Les prédispositions variables qui décrivent principalement la quantité de matériaux mobilisables par le torrent. Elles vont évoluer au cours de l'année en fonction des apports provenant principalement des versants.
- Les facteurs dégradants qui représentent tous les éléments perturbateurs qui vont intervenir directement dans le déclenchement de la crue. Ils regroupent à la fois la température, l'humidité du sol et les précipitations.

L'équilibre est rompu et le déclenchement d'une lave torrentielle n'intervient que lorsque les facteurs dégradants atteignent une limite correspondant à la zone qui cumule les prédispositions de base et les prédispositions variables.

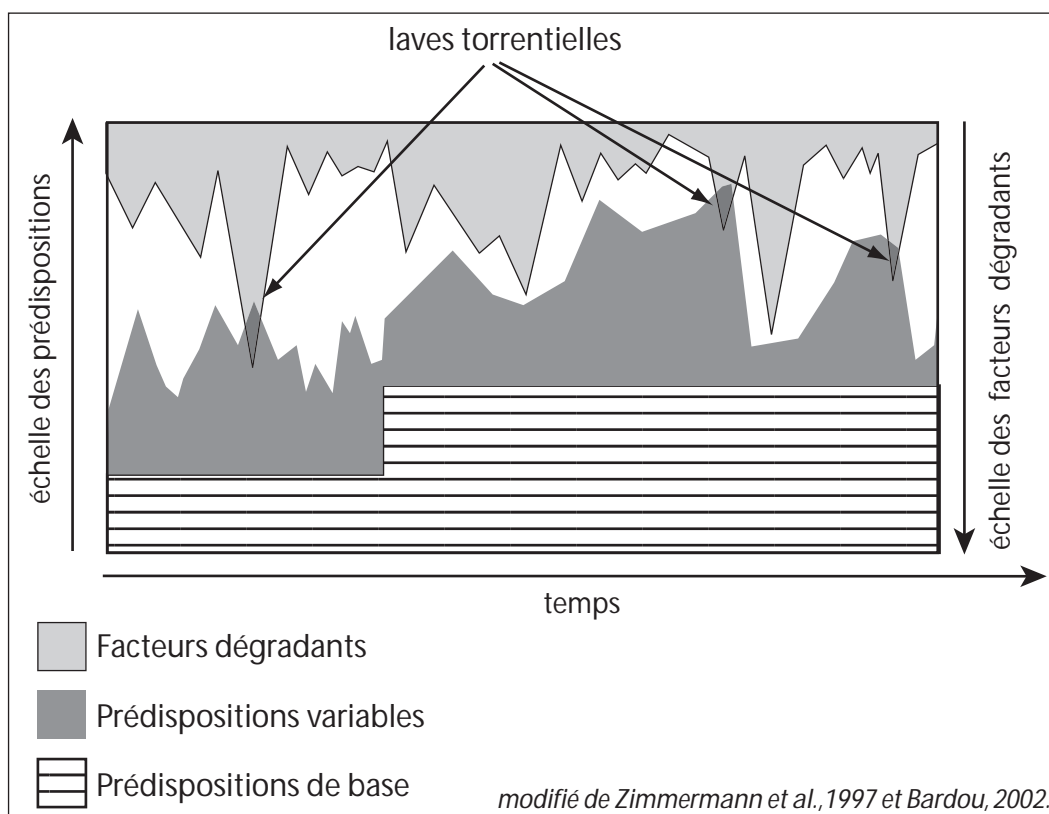


Figure 68 : représentation schématique des relations entre les prédispositions d'un système torrentiel et les facteurs dégradants dans le déclenchement des laves torrentielles

Le cas des torrents de la Clarée illustre bien ce constat. En effet, si durant les 3 mois d'été le facteur dégradant que représentent les précipitations orageuses est globalement constant (entre 23,3% et 26,7% des orages), le nombre de crues torrentielles tend à se réduire régulièrement de juin à août. Cela est

vraisemblablement le signe d'un amaigrissement de la charge sédimentaire disponible pour le torrent.

Lorsque l'on cherche à classer les torrents étudiés dans la classification partageant les bassins-versants torrentiels selon leur disponibilité en matériaux mobilisables établie par M. Bovis et M. Jakob⁴³ (1999), il apparaît que les torrents de la vallée de la Clarée appartiennent globalement aux torrents caractérisés par un taux de recharge sédimentaire limité, qualifiés de *weathering-limited*. En d'autres termes, cela signifie qu'après le déclenchement d'une crue torrentielle dans un bassin-versant, il est peu probable qu'un nouvel épisode ne se produise rapidement par la suite, et ce même à la faveur d'un événement hydrométéorologique intense. Il est en effet nécessaire que le stock sédimentaire se reconstitue (Jakob *et al.*, 2005). La durée de ce temps de recharge est très variable, elle dépend à la fois de facteurs lithologiques et climatiques qui interviennent dans les processus de météorisation et de recharge du chenal (gélifluxion, coulées de débris élémentaires).

Il n'existe pas de situation unique aboutissant à la crue torrentielle ; les précipitations orageuses ne sont qu'un des éléments nécessaires au déclenchement des crues torrentielles au même titre que la disponibilité en matériaux. Le nombre et la complexité des paramètres entrant en jeu dans le déclenchement des crues torrentielles sont autant d'éléments réduisant la possibilité de prévenir de façon fiable les épisodes de crues torrentielles.

Dans la vallée de la Clarée les crues torrentielles sont principalement déclenchées par des précipitations orageuses estivales. Cependant, il apparaît qu'il existe plusieurs facteurs qui déterminent le déclenchement des crues torrentielles. En effet, la survenue d'une crue et son intensité dépendent à la fois de facteurs météorologiques (par exemple le volume et l'intensité des précipitations le jour de la crue), de facteurs morphologiques (intervenant dans le temps de concentration des eaux), mais aussi du volume des matériaux disponibles dans le lit ou susceptibles de provenir d'apports latéraux. La diversité de ces facteurs tend à limiter la possibilité de prévoir de façon fiable la survenue d'une crue et qui plus est son intensité.

⁴³ Cette classification distingue les organismes torrentiels qui ont une fourniture sédimentaire quasi illimitée et continue (*transport-limited*), en opposition à des torrents caractérisés par un taux de recharge plus faible (*weathering-limited*). Dans le premier cas, le facteur déclenchant les laves torrentielles correspond uniquement à un événement hydrométéorologique (précipitations intenses, fonte rapide du manteau neigeux) alors que dans le deuxième cas il faut une concomitance entre un événement hydrométéorologique et un état de charge conséquent du chenal torrentiel pour qu'une crue torrentielle puisse se déclencher (Bovis et Jakob, 1999).

3.2.3. Apports et limites de la prédiction du volume des laves torrentielles

En l'absence de crue torrentielle importante durant la période d'observation, les campagnes de mesures menées dans certains des torrents renseignent sur le fonctionnement courant des torrents de la vallée mais ne permettent pas d'appréhender les conséquences d'une crue majeure. Grâce à l'observation de nombreuses crues torrentielles à travers le monde, différents auteurs proposent des formules permettant d'évaluer aisément le volume que pourrait mobiliser une crue BF-HM.

3.2.3.1. Les méthodes disponibles

L'estimation du volume de matériaux susceptibles d'être transportés et déposés par un torrent lors d'une crue peut permettre une meilleure appréciation de l'aléa torrentiel. De nombreux auteurs se sont penchés sur la question (Müller, 1960 ; Hampel, 1977 ; Hungr *et al.*, 1984 ; Takeï, 1984 ; Van Dine, 1985 ; Rickenmann, 1995 ; D'Agostino *et al.*, 1996 ; Marchi et Tecca, 1996 ; Bottino et Crivellari, 1998 ; Franzi et Bianco, 2001). Ainsi, depuis près de 50 ans, différentes formules ont été proposées. Pour l'ingénieur, une estimation du volume des matériaux que peut mobiliser une crue torrentielle est une donnée importante pour le dimensionnement des ouvrages de génie civil, comme les barrages de sédimentation, les digues ou les ponts. Et ce, d'autant plus qu'il existe un manque de description de crues torrentielles majeures dans la vallée de la Clarée. Les événements répertoriés dans les différentes bases de données existantes ne recensent que des événements de moyenne ampleur. En effet, si l'on se réfère à la classification développée par M. Jakob basée sur la taille des dépôts torrentiels (Jakob, 2005), les plus importantes crues torrentielles décrites dans la vallée de la Clarée atteignent au maximum la classe 3 sur les 5 applicables aux torrents des Alpes (surface submergée de l'ordre de 25 000 m² pour un volume d'environ 20 000 à 30 000 m³).

Encadré 7 : l'estimation du volume des crues torrentielles

Les méthodes empiriques

De nombreuses formules ont été élaborées à travers le monde dans le but d'estimer le volume de matériaux que pourrait transporter une lave torrentielle. Ces formules dites empiriques, tentent de relier le volume de matériaux mobilisable à certaines caractéristiques du torrent telles que la

surface du bassin-versant, la pente du chenal ou la surface végétalisée. Il s'agit en fait d'une approche basée sur l'analyse d'un nombre d'observations et de données historiques plus ou moins important selon les études. Les auteurs déterminent alors une relation statistique entre le volume de matériaux déposés lors des crues et certaines caractéristiques du bassin versant (Brochot et al., 2002).

Caractéristiques utilisées dans les formules suivantes :

S_{bv} : surface du bassin versant (km^2)

P_{cd} : pente moyenne du cône de déjection (%)

P_t : pente moyenne du torrent (%)

L_t : longueur du torrent (m)

Müller, 1960 : $40000 \times S_{bv}^{1,17}$

Formule développée à partir d'observations dans les Alpes suisses.

Hampel, 1977 : $150 \times S_{bv} \times (100 \times P_t - 3) \times 2,3$

Formule fondée sur des observations menées dans les Alpes autrichiennes

Takei, 1984 : $13,6 \times S_{bv}^{0,61}$

Méthode calée sur des valeurs moyennes d'un échantillon de 552 données, d'où des valeurs faibles par rapport aux autres méthodes qui estiment des volumes maximaux ou extrêmes de laves torrentielles.

Van Dine, 1985 : $10 \times S_{bv}$

Méthode d'évaluation basée sur une étude de torrents canadiens.

D'Agostino et al., 1996 : $29100 \times S_{bv}^{0,67}$

Méthode d'estimation basée sur l'étude de plusieurs torrents dans les Alpes italiennes.

Marchi et Tecca, 1996 : $70 \times S_{bv}$

Méthode développée dans les Alpes orientales italiennes

Rickenmann, 1995 : $L_t (6,4 \times P_{cd} - 23)$ pour $7\% < P_{cd} < 15\%$

Rickenmann, 1995 : $L_t (110 - 2,5 \times P_{cd})$ pour $15\% < P_{cd} < 40\%$

Méthode développée à partir de l'étude de torrents des Alpes suisses et qui prend en compte la pente du cône de déjection

Bottino et Crivellari, 1998 : $21,241 \times S_{bv}^{0,28}$

Formule basée sur l'analyse des crues torrentielles du 5-6 novembre 1994 dans le secteur d'Ivrea (Val d'Aoste)

Franzi et Bianco, 2001 : $8,959 \times S_{bv}^{0,765}$

Analyse statistique basée sur les données de 201 laves torrentielles dans les Alpes italiennes, suisses et françaises. Cette formule cherche à estimer

le volume de matériaux susceptible de se déposer sur le cône de déjection à l'occasion d'une lave torrentielle.

La méthode géomorphologique dérivée de Hungr et al. (1984)

Cette méthode d'estimation du volume maximal des laves torrentielles se fonde sur l'évaluation du volume de matériaux disponible à proximité du lit du torrent. Les auteurs proposent de déterminer des taux d'érodibilité en fonction des caractéristiques des matériaux constituant le lit et les versants adjacents (Hungr et al., 1984, tableau 8). Bien que cette méthode ait été développée à partir de l'étude de torrents de Colombie Britannique (Canada), cette approche peut être appliquée à des torrents du domaine alpin où les conditions environnementales sont proches (Brochot et al., 2002 ; Conversini et al., 2005). Dans la pratique, il s'agit tout d'abord de diviser le torrent en biefs ayant des caractéristiques semblables c'est-à-dire pour lesquels le taux unitaire d'apport de matériaux peut être considéré comme identique (tableau 8). Ensuite il convient de mesurer la longueur de chaque bief et de la multiplier par le taux d'apport de matériaux correspondant afin d'obtenir le volume total susceptible d'être mobilisé lors d'une crue torrentielle. Par ailleurs, cette méthode a été calibrée pour des systèmes torrentiels de taille réduite, c'est pourquoi pour les torrents les plus vastes de la vallée les estimations correspondent à la somme des résultats obtenus pour les différents sous bassins-versants. On obtient alors une estimation du volume de matériaux qui pourrait alimenter directement le lit torrentiel principal et susceptible d'être mobilisé par une crue majeure..

$$V = \sum_{i=1}^n L_i \times e_i$$

V : volume total de matériaux

L_i : longueur des biefs

e_i : taux unitaire d'apport de matériaux

type de lit	matériaux du lit	versants adjacents	facteurs de stabilité	apport unitaire de matériaux du lit (m ³ /m)
A	roche-mère en place	non érodable	stable, presque sans dépôt	0-5
B	dépôts meubles ou matériaux fins sur roche mère	non érodable	stable	5-10
C	éboulis profonds ou moraine	hauteur < 5 m	stable	10-15
D	éboulis profonds ou moraine	talus, hauteur > 5 m	versants adjacents stables	15-30
E	éboulis profonds ou moraine	talus, Hauteur > 20 m	versants adjacents potentiellement instables (zones en glissement)	jusqu'à 200 (à considérer comme un foyer local)

Tableau 8 : l'évaluation des taux unitaires d'apport sédimentaire des lits torrentiels (d'après Hungr et al., 1984)

3.2.3.2. Le résultat mitigé de l'estimation du volume des laves torrentielles

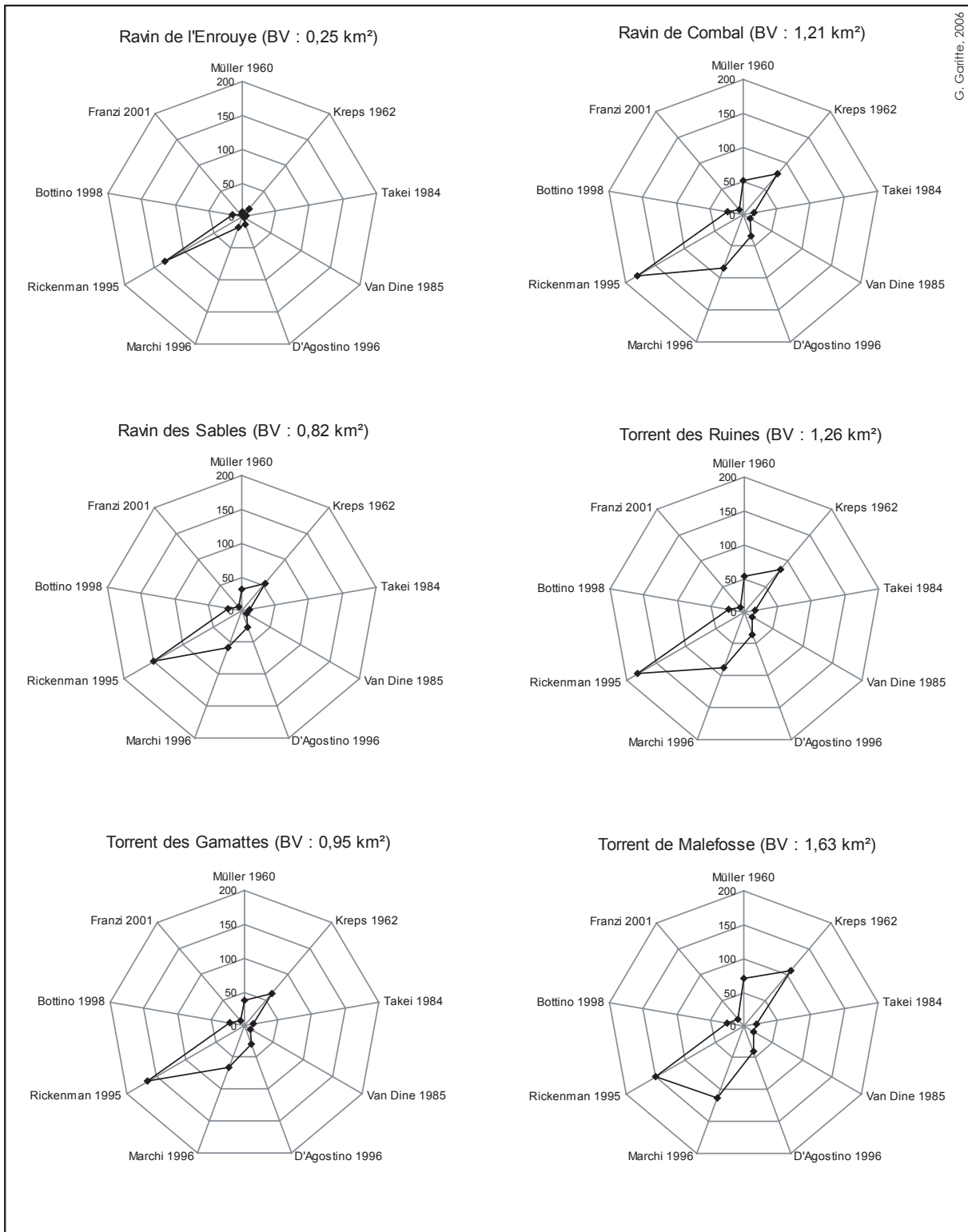
Il apparaît que les résultats des estimations empiriques du volume de matériaux susceptible d'être mobilisé par une crue torrentielle varient fortement d'une méthode à l'autre (fig. 69). En fait, ces méthodes ont une représentativité spatiale parfois limitée car elles sont le plus souvent calibrées pour des caractéristiques environnementales (géologie, taille des bassins versants, climat...) qui dépendent de la région pour laquelle elles ont été conçues. Par ailleurs, selon la taille du bassin-versant, les formules empiriques d'estimation du volume des crues torrentielles utilisées donnent des résultats très différents. Ainsi pour les bassins-versants les plus petits, c'est la méthode développée par Rickenmann (1995) qui donne les volumes les plus importants, alors que pour les torrents les plus vastes, c'est la méthode de Marchi et Tecca (1996) qui donne l'estimation la plus élevée. En fait, toutes les formules empiriques ne tentent pas d'estimer la même chose : certaines ont été élaborées pour estimer le volume des crues extrêmes (Rickenmann, 1995) alors que d'autres s'intéressent aux crues normales (Takeï, 1984). L'utilisation de ces méthodes d'estimation du volume de matériaux susceptibles d'être déposés par une crue torrentielle ne permet donc que d'avoir un ordre d'idée indicatif de la magnitude de l'aléa susceptible de générer un torrent.

Quelque soit la méthode utilisée, toutes les formules proposées ne fournissent qu'une approximation du volume maximal de matériaux susceptible de se déposer en cas de crue torrentielle. Les résultats de ces estimations empiriques sont très éparpillés et n'offrent pas une précision suffisante pour servir de seul outil d'appréciation de l'aléa torrentiel. Par exemple, pour le torrent de Malefosse, les

estimations s'échelonnent de 13 000 à 126 000 m³ ! De fait, D. Rickenmann (1999) affirme que certaines de ces formules empiriques aboutissent parfois à des surestimations du volume des *debris flows* qui atteindraient un facteur 100. En effet, pour beaucoup de méthodes empiriques la seule variable utilisée est la superficie du cône de déjection et même si d'autres méthodes, telles que l'approche géomorphologique (Hungar *et al.*, 1984 ; Brochet *et al.*, 2002 ; Conversini *et al.*, 2005) ou les méthodes dérivées des sciences de l'ingénieur (Spreafico *et al.*, 1999) prennent en compte un nombre plus important de variables, aucune n'offre une fiabilité totale : le fonctionnement intime des torrents et les mécanismes qui déterminent l'intensité des crues se révèlent très complexes.

Pour autant, en dépit de leurs limites, ces différentes méthodes qui décrivent le comportement paroxystique d'un grand nombre d'organismes torrentiels dans différents contextes (*i.e.* contexte géologique, contexte climatique, situation géographique), offrent néanmoins la possibilité d'obtenir aisément des approximations permettant de déterminer un faisceau de volumes probables en cas de crue torrentielle BF-HM (fig. 69).

Les torrents de la vallée de la Clarée – Gilles GARITTE



G. Garitte, 2006

[suite de la figure page suivante...]

Les torrents de la vallée de la Clarée – Gilles GARITTE

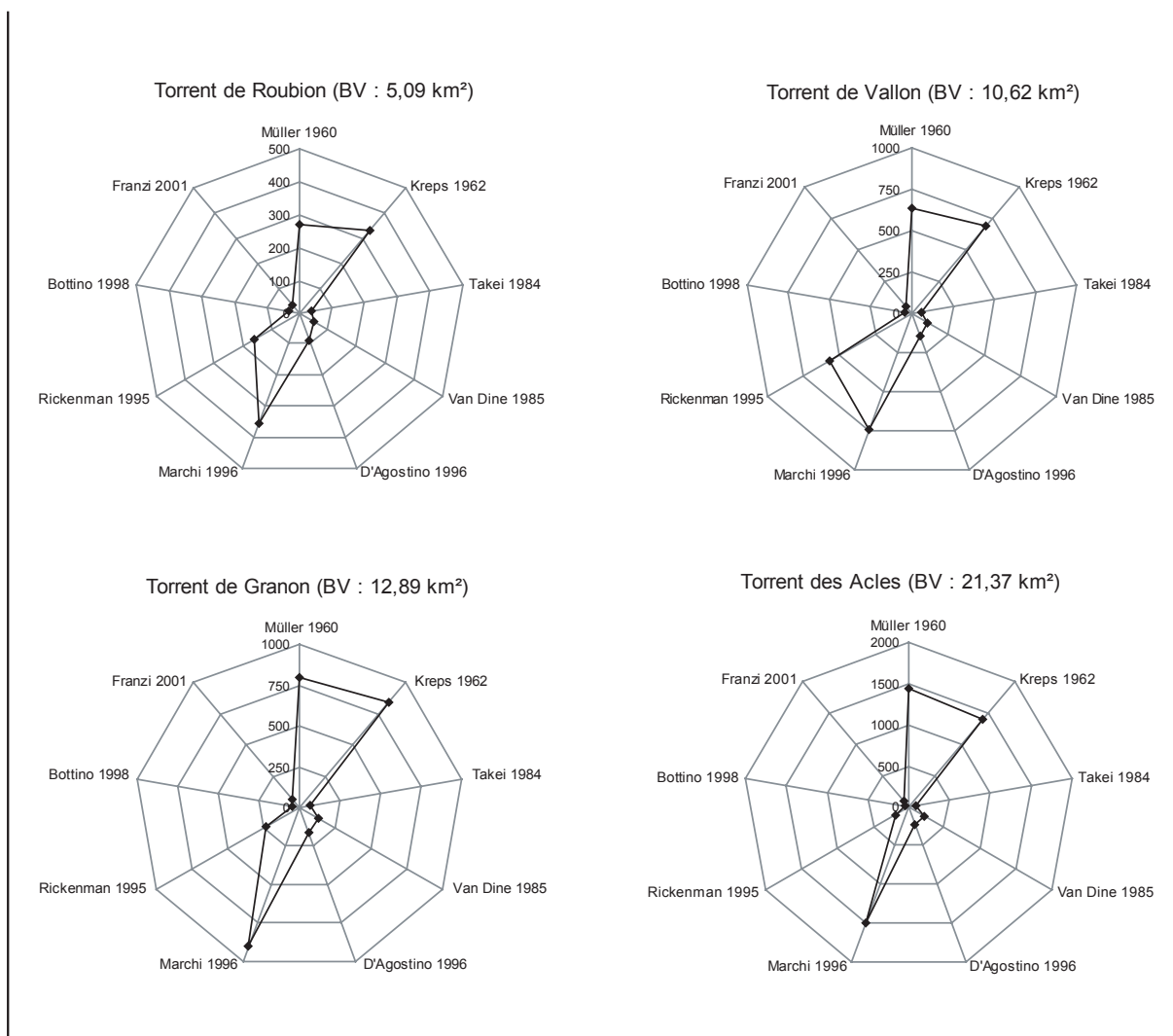
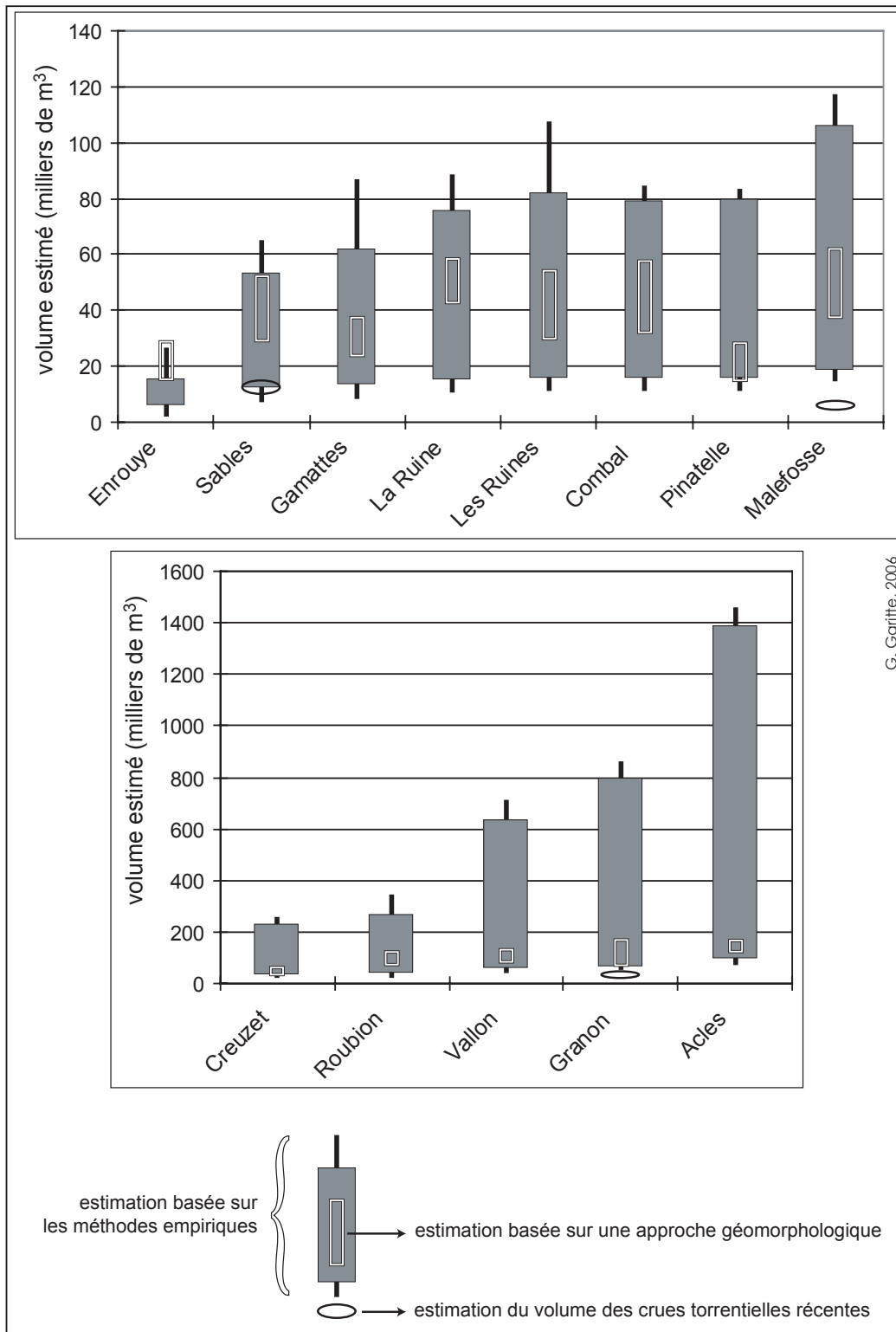


Figure 69 : application de différentes méthodes empiriques d'estimations du volume des laves torrentielles à quelques torrents de la vallée de la Clarée (milliers de m³)



G. Garitte, 2006

Figure 70 : l'estimation du volume de matériaux mobilisables : confrontation des méthodes empiriques et géomorphologique
-notez la différence d'échelle-

Si l'on compare les résultats des approches empiriques et géomorphologiques, on constate que pour les systèmes torrentiels les plus petits de la vallée, les évaluations basées sur l'approche géomorphologique donnent des résultats apparaissant relativement proches des estimations médianes obtenues avec les formules empiriques. Alors que dans le cas des torrents drainants de vastes bassins-versants ces estimations s'avèrent largement inférieures aux résultats des formules empiriques. En fait, Hungr *et al.* (1984) précisent que leur méthode d'évaluation du volume des laves torrentielles est plus fiable pour les bassins-versants les moins étendus. Quoiqu'il en soit, les résultats de toutes ces estimations s'avèrent largement supérieures aux volumes de matériaux déposés par les crues torrentielles récemment survenues dans la vallée de la Clarée (fig. 70 et tableau 9).

Torrent	Date	Volume déposé (estimations)
Malefosse	18/06/2002	6000 m ³
Granon	22/07/1988	20 000 – 30 000 m ³
Sables	24/07/1995	12 000 – 15 000 m ³

Tableau 9 : estimation du volume des crues torrentielles récentes dans la vallée de la Clarée

Certes, si certaines de ces crues récentes ont pu sembler exceptionnelles de part leurs conséquences morphogènes, celles-ci n'ont souvent mobilisé qu'une partie de la charge sédimentaire disponible dans le bassin-versant. Ainsi, dans le cas de la crue du Granon de juillet 1988, c'était essentiellement une des branches du torrent (le ravin de Bramafan) qui a fourni la majeure partie des matériaux alors que les méthodes empiriques ou géomorphologiques prennent en compte l'ensemble du bassin-versant. De même, les travaux de correction torrentielle menés dans le torrent de Malefosse, en limitant la possibilité d'incision du lit, peuvent expliquer la faiblesse relative du volume déposé lors des crues récentes. De plus, ces différentes approches rendent difficilement compte des possibilités de stockage de la charge sédimentaire dans le bassin-versant. En effet, comme nous l'avons démontré, certains chenaux torrentiels de la vallée de la Clarée ne sont pas directement connectés aux sources sédimentaires situées dans la partie amont de leur bassin-versant (cf. 2.5.2.). Dès lors, le volume de matériaux susceptible d'alimenter une crue torrentielle s'en trouve limité. Toutefois, l'importance relative des volumes estimés par rapport aux volumes des crues recensées signifie aussi qu'une crue torrentielle majeure serait vraisemblablement susceptible de mobiliser un volume de matériaux d'une ampleur insoupçonnée, ou tout au moins, largement supérieur aux événements décrits dans les archives.

La prévision de l'intensité maximale des crues torrentielles est un élément important pour juger de la dangerosité d'un torrent. Les différentes méthodes empiriques ou géomorphologiques d'estimation du volume des crues torrentielles élaborées à travers le monde ne permettent de prédire avec précision le volume des crues. Elles peuvent néanmoins aider à déterminer un faisceau de volume probable en cas de crue BF-HM qui peut servir d'hypothèse de travail en l'absence de données plus fiables concernant le volume des crues torrentielles majeures dans la vallée de la Clarée.

3.3. L'évolution des lits torrentiels : l'apport de l'approche topométrique

L'analyse topométrique s'est focalisée sur certains organismes de la vallée de la Clarée. Le choix des torrents ayant fait l'objet de levés au tachéomètre a été motivé par plusieurs critères. Tout d'abord, les torrents étudiés sont situés en aval du village de Névache Ville-Haute. En effet, c'est dans la basse vallée que se concentrent la plupart des enjeux. Par ailleurs, pour rendre compte de la diversité du fonctionnement des torrents de la vallée de la Clarée, il convenait aussi de choisir des torrents de différentes tailles. Enfin, le choix des torrents a aussi été basé sur une étude préliminaire du recensement des crues torrentielles afin de se focaliser sur des torrents actifs pour lesquels il aurait été possible d'observer les modifications du lit à la faveur d'une crue.

3.3.1. Les modalités du transport sédimentaire dans les torrents

Le transport de la charge sédimentaire par les torrents résulte de mécanismes complexes. Lors des écoulements habituels, seule une fraction de la charge sédimentaire est mobilisée et c'est durant les épisodes de crues qu'a lieu la majeure partie du transit sédimentaire. Ce transport s'effectue principalement selon deux modes distincts : le charriage et la lave torrentielle. La différence entre ces deux types de transport réside dans les caractéristiques physiques des mélanges fraction liquide/fraction solide (Cousot et Meunier, 1996) (fig. 71).

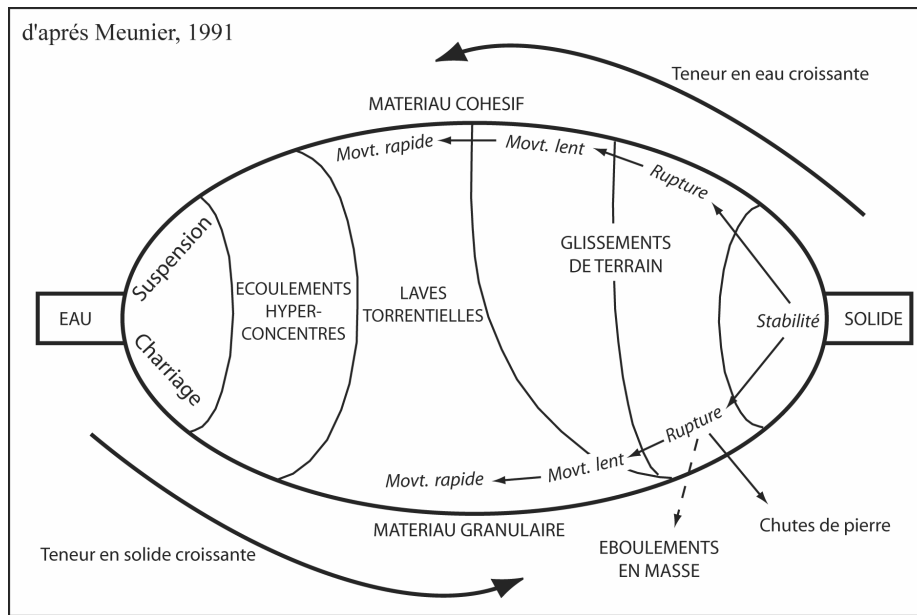


Figure 71 : classification des différents types de mouvements de terrain

Les laves torrentielles sont caractérisées par une concentration en fraction solide élevée : fraction solide 0,4 à 0,8 et fraction liquide 0,2 à 0,6 (Iverson, 1997), et par un écoulement de type monophasique dans lequel le mélange eau/fraction solide s'écoule de façon uniforme à vitesse élevée : de 1 m/s⁻¹ à 15 m/s⁻¹ avec des pointes à 20 m/s⁻¹ (Besson, 1996 ; Bardou, 2002).

La reconnaissance des laves torrentielles sur le terrain est basée sur différentes caractéristiques qui les distinguent des autres types de dépôts :

- Le dépôt est chaotique, c'est-à-dire sans classement ni stratification, et hétérométrique
- On observe la présence de bourrelets latéraux parallèles à l'écoulement
- Le cas échéant, il y a aussi un lobe frontal constitué d'un amas de blocs
- La matrice est hétérogène et englobe dans sa masse les blocs sans granoclassement ou orientation préférentielle.

Au sein même des laves torrentielles, certains auteurs font une distinction entre lave granulaire et lave cohésive (Bonnet-Staub, 1998). La différence entre ces deux types de laves torrentielles réside principalement dans la composition granulométrique de la matrice qui dépend elle-même des zones contributives d'où sont originaires les matériaux transportés par la crue. Mais le type de lave torrentielle n'est pas lié au bassin-versant car les zones contributives peuvent varier selon les crues (Bardou *et al.*, 2003). Cela signifie qu'au sein du même organisme torrentiel, certaines crues vont par exemple prélever leurs matériaux dans le lit torrentiel, alors que d'autres crues pourront être alimentées par des apports latéraux, ce qui aura des conséquences directes sur les caractéristiques de l'écoulement.

Le charriage correspond au transport par l'écoulement liquide (ou turbide) de blocs isolés. On distingue, par ailleurs, les écoulements (ou charriages) hyperconcentrés qui apparaissent comme un mode de transport hybride entre la lave torrentielle et le charriage ordinaire. Ils se différencient des laves torrentielles par une concentration en fraction solide plus faible et surtout par un écoulement multiphasique (vitesses différentes de l'eau et des matériaux), mais fonctionne eux aussi par bouffées successives (Kouliniski, 1994). C'est pourquoi les écoulements hyperconcentrés sont parfois qualifiés de « lave torrentielle immature » (*immature debris flow*) (Takahashi, 1987).

Les laves torrentielles possèdent un pouvoir destructeur potentiellement plus élevé que les écoulements hyperconcentrés. Cela tient à la densité plus élevée du mélange qui leurs confèrent une compétence d'autant plus importante, mais aussi au fonctionnement intrinsèque des laves torrentielles (front de lave constitué quasi exclusivement de blocs). Toutefois, comme les écoulements hyperconcentrés sont souvent très érosifs (Pierson, 2005), ils peuvent aussi se révéler dévastateurs en mobilisant et en déposant des quantités très importantes de matériaux sur les cônes de déjection et en fond de vallée (Batalla *et al.*, 1999). C'est pourquoi lorsqu'il s'agit d'analyser l'aléa torrentiel, c'est l'expression « crue torrentielle », qui englobe sans distinction les différents modes de transports, qui sera la plus souvent utilisée dans la présente étude.

Encadré 8 : le problème de la terminologie

Par ailleurs, il existe un problème dans les équivalences entre la terminologie anglo-saxonne et francophone : il y a de nombreux termes dans la littérature scientifique internationale pour définir des phénomènes parfois proches, ce qui peut être une source de confusions (Bardou, 2002).

L'expression debris flow correspond littéralement au terme général « coulée de débris » qui décrit un écoulement rapide à extrêmement rapide d'un matériau hétérométrique plus ou moins saturé en eau (Hungr, 2003).

*S'il n'existe pas réellement de terme anglo-saxon traduisant l'expression lave torrentielle, certains auteurs font une distinction entre valley confine debris flow ou channelized debris flow d'une part, et debris avalanche et hillslope debris flow (Hungr, 2005) ; les premiers correspondants à des écoulements chenalisés comme dans le cas des torrents, le deuxième décrivant des écoulements sur des versants. Hungr *et al.* (2001) proposent quant à eux une typologie des écoulements en fonction des matériaux mobilisés (tableau 10).*

matériau	eau contenu	condition spéciale	vitesse	nom
débris	saturé	chenal préexistant	extrêmement rapide	"coulée de débris" (<i>debris flow</i>)
boue	> ou = à la limite de liquidité	importance des matériaux fins	très rapide	"coulée de boue" (<i>mud blow</i>)
débris	présence d'eau libre	crue très liquide	extrêmement rapide	"inondation torrentielle" (<i>debris flood</i>)
débris	partiellement ou totalement saturé	pas de chenal préexistant	extrêmement rapide	"avalanche de débris" (<i>debris avalanche</i>)

*Tableau 10 : terminologie anglo-saxonne des écoulements torrentiels
(Traduit de Hungr et al., 2001)*

3.3.2. L'utilisation de la topométrie dans l'étude de l'évolution des lits torrentiels : l'exemple du torrent des Ruines

L'utilisation de la topométrie à l'échelle du torrent est l'occasion d'effectuer un état des lieux précis. En effet, en plus des levés au tachéomètre, les nombreuses photographies prises tout au long du profil, constituent une base de données précieuse pour déterminer l'état du lit torrentiel à un instant précis (De Jong, 1992). De plus, des marquages effectués dans le lit des torrents permettent de vérifier si les chenaux ont connu un écoulement entre deux campagnes de mesures. En cas de crue, il suffit de renouveler les mesures topométriques tout d'abord pour déterminer avec précision si le lit du torrent a évolué ou non, et surtout pour caractériser les secteurs d'incision, d'accumulation, de débordement.

Le torrent des Ruines offre un exemple des mesures et observations menées dans les organismes torrentiels de la Clarée.

Un profil en long a d'abord été levé à partir de la confluence avec la rivière principale jusqu'à un large affleurement de la roche en place dans la partie intermédiaire du torrent. Ce profil, calé longitudinalement grâce aux axes routiers qu'il traverse (piste et RN 94), permet d'apprécier la pente du chenal d'écoulement (de l'ordre de 20%) et sa régularité puisque l'on n'observe pas de nette rupture de pente au niveau du cône de déjection (fig. 72 A). Ensuite, une dizaine de profils en travers, précisément localisés sur le profil en long, ont été levés. Ceux-ci mettent en évidence la présence de plusieurs paléochenaux qui soulignent la mobilité latérale du lit torrentiel ainsi que le fait que le torrent s'écoule à la surface de son cône de déjection. Les profils en travers 1, 2 et 3, situés sur le cône de déjection, montrent, en effet, que l'incision maximale du torrent dans ce secteur n'excède guère 1 m dans le chenal actif et près de 2,5 m dans un des paléochenaux (fig. 72 B). Enfin, certains secteurs dans la partie aval du chenal ont fait l'objet d'un marquage à la peinture. Ces parcelles peintes ont pour but de permettre de détecter toute modification du lit entre deux campagnes de mesures (fig. 73 photo. 5). Le cas échéant, il est

possible de déterminer s'il s'agit d'un simple écoulement qui n'a déplacé que quelques éléments du lit ou d'une crue qui a plus largement modifié le chenal torrentiel nécessitant alors d'effectuer un nouveau levé. Dans le cas présent, les marquages et les photographies (fig. 73) ont permis de constater que le torrent des Ruines n'a pas connu de modification significative de la partie aval de son chenal entre avril 2003 et juillet 2006. Alors que durant la même période, des torrents situés à proximité, ont, eux, connus plusieurs épisodes de crues.

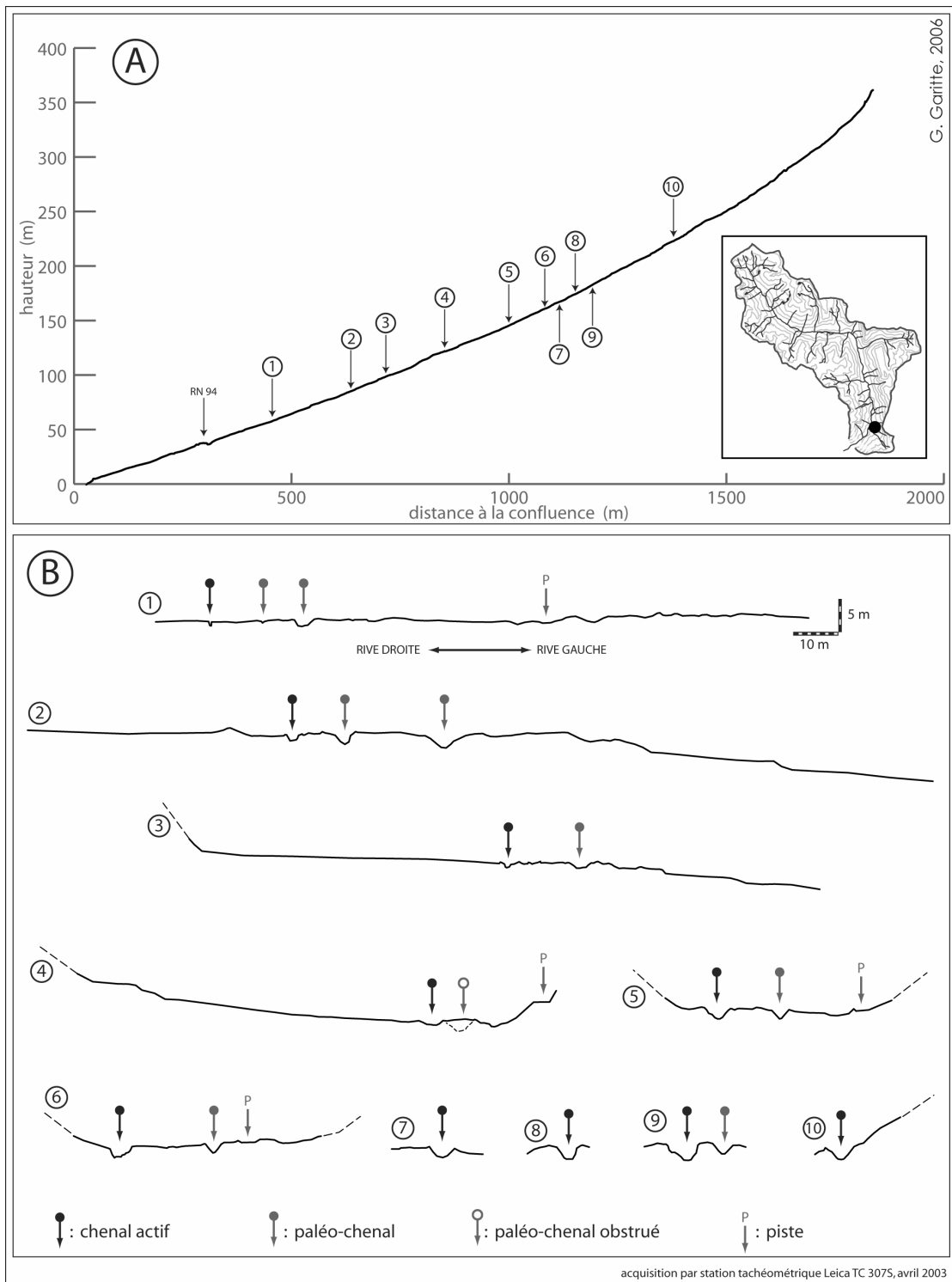


Figure 72 : la topométrie dans le torrent des Ruines
 A : profil en long
 B : profils en travers

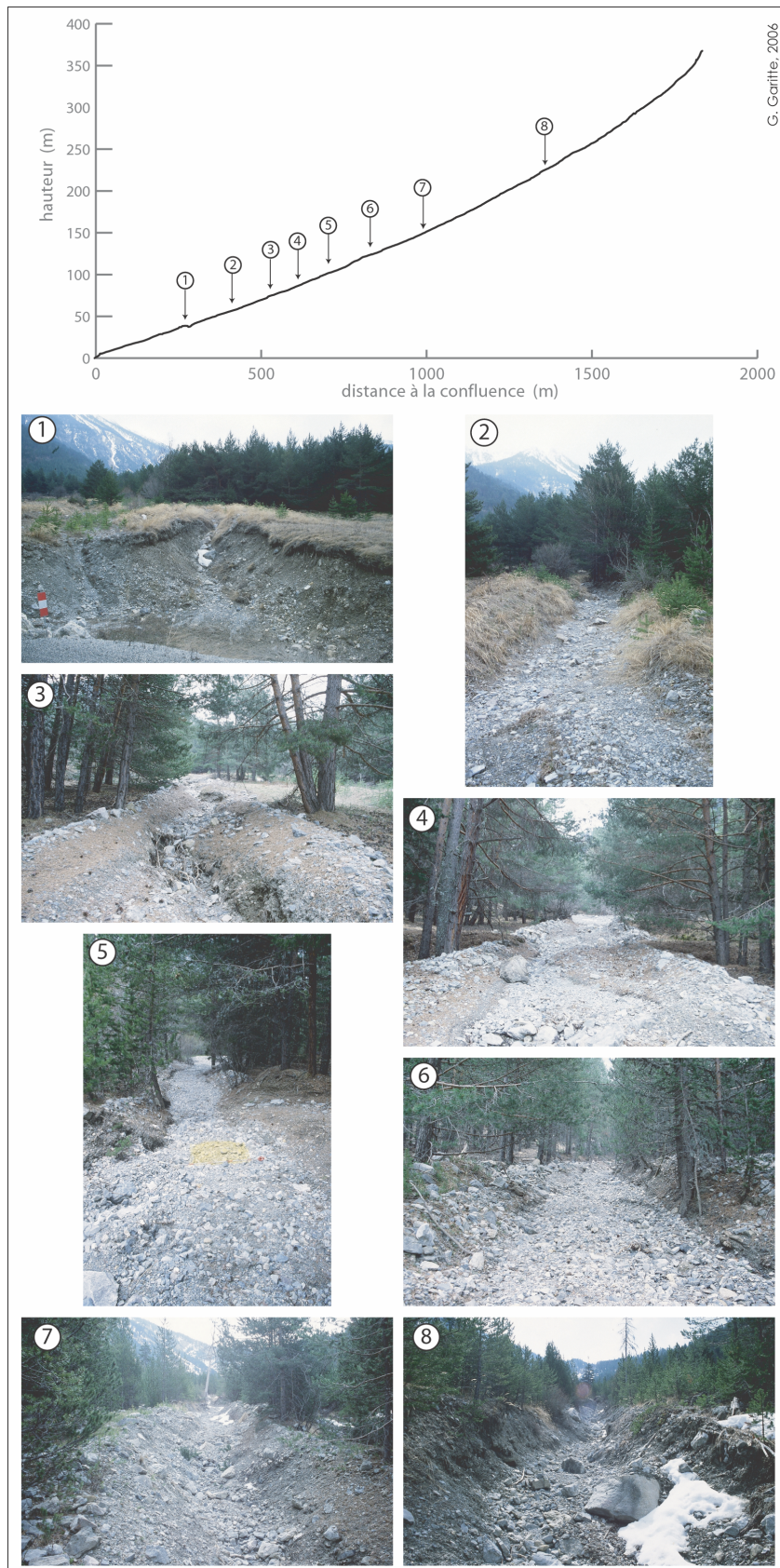


Figure 73 : torrent des Ruines, profil en long et photographies du lit

3.3.3. Les résultats de l'analyse topométrique du torrent de Malefosse

Le torrent de Malefosse (S_{bv} : 1,63 km² ; A_{max} : 2567 m ; A_{con} : 1330 m) se situe juste en aval de la vallée de la Clarée *stricto sensu* (photo. 24). Le 18 juin 2002, suite à un violent orage survenu en fin d'après midi, le torrent de Malefosse a connu un épisode de crue avec pour conséquence le dépôt d'environ 5000 à 6000 m³ de matériaux à la confluence avec la rivière principale. Le volume des précipitations qui ont déclenché cette crue est difficile à estimer en l'absence de pluviographe dans le bassin-versant du torrent. Les données disponibles correspondent à la station météorologique de Briançon où l'on a relevé 22,6 mm pour la journée du 18 juin 2002. Les conséquences de cette crue au niveau de la confluence avec la rivière principale ont nécessité l'intervention d'engins de travaux publics car la rivière commençait à affouiller la berge en rive gauche, qui constitue le pied d'un versant en glissement.



Photo. 24 : le torrent de Malefosse

Les mesures effectuées en octobre 2001 et septembre 2002 ont permis de déterminer le fonctionnement du torrent durant cette crue. Sur le document suivant, qui montre l'évolution du profils en long du torrent, on note ainsi une tendance quasi généralisée à l'incision du lit avec néanmoins quelques zones de dépôt au niveau de certains barrages RTM (fig. 74).

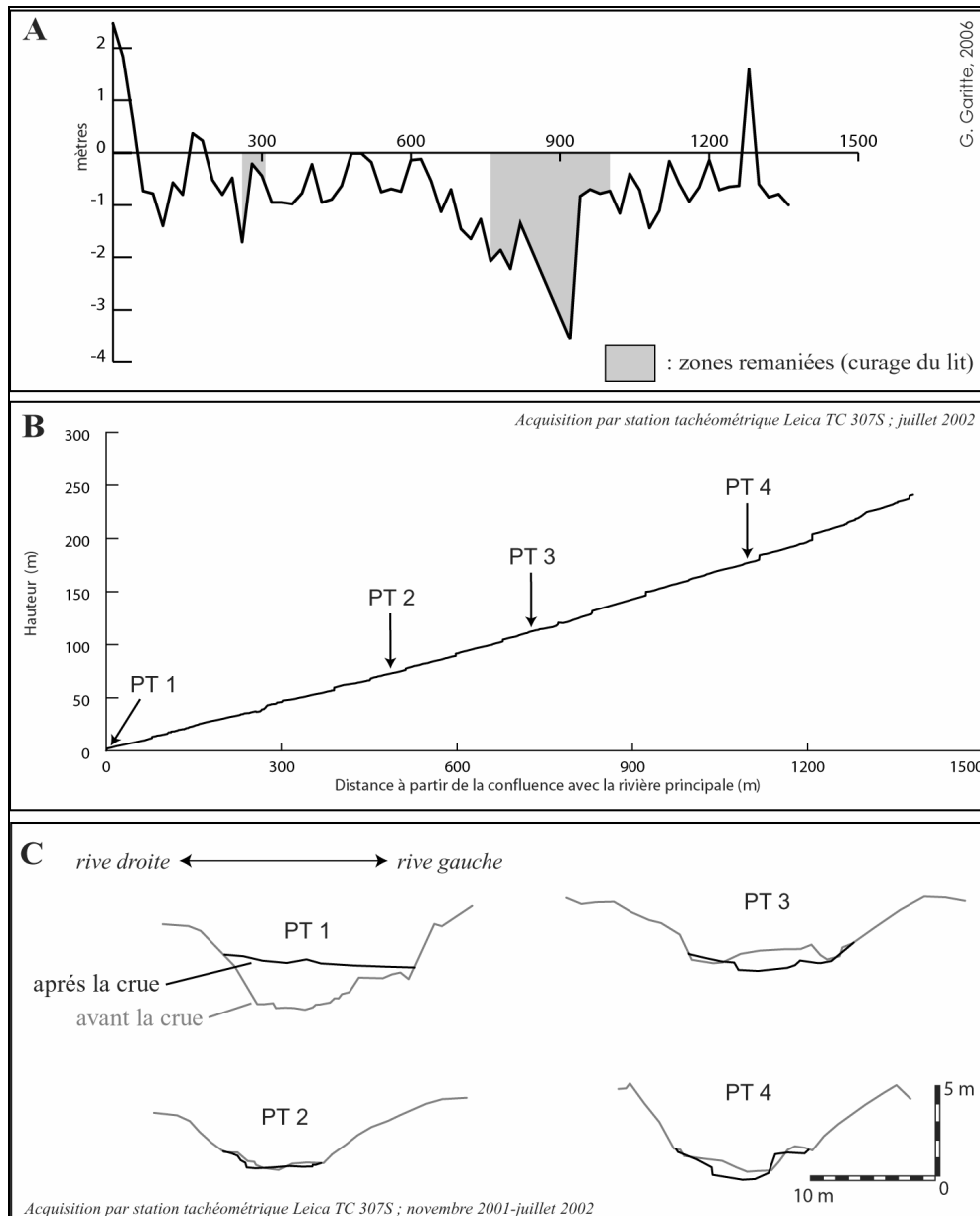


Figure 74 : torrent de Malefosse, les conséquences morphogéniques de la crue du 18 juin 2002
 A : évolution du profil en long (11/2001-09/2002)
 B : profil en long et localisation de quelques profils en travers (PT)
 C : évolution de quelques profils en travers

Comme les nombreux profils en travers effectués ne révèlent aucune trace de bourrelets latéraux, formes généralement associées au transport par lave torrentielle, il est donc possible de supposer que la majeure partie de la charge déposée à la confluence avec la rivière principale a été mobilisée par charriage (fig. 74).

Le torrent de Malefosse appartient-il pour autant à la catégorie des torrents à charriage ? La cartographie géomorphologique à grande échelle dressée en

novembre 2001 sur un secteur clef du torrent montre une toute autre physionomie. Le site cartographié se situe à la confluence du Ravin de la Combe d'Hermitte et de celui des Rochers Rouges qui forment le torrent de Malefosse. Situé vers 1530 m d'altitude ce secteur couvrant environ 2200 m² est limité à l'aval par un barrage de sédimentation construit par le RTM en 1953 (fig. 75). Les observations géomorphologiques ont été reporté sur un MNT et complétées par différents comptages granulométriques permettant de mieux caractériser la charge grossière de surface (cf. encadré 9 ci-dessous).

Encadré 9 : le comptage granulométrique de la charge grossière de surface

La méthode de comptage granulométrique de la charge grossière de surface utilisée dans cette étude, consiste à mesurer le grand côté d'une centaine de blocs prélevés de façon aléatoire sur une surface d'un m². L'utilisation de cette méthode se limite à une comparaison entre des comptages effectués sur différents organismes ou sur différents dépôts au sein d'un même torrent, mais il est exclu de comparer ces résultats à ceux obtenus avec d'autres méthodes de mesure. L'intérêt de cette méthode de comptage réside principalement dans la facilité de sa mise en pratique qui permet de caractériser rapidement la charge sédimentaire d'un lit torrentiel ou de suivre l'évolution d'une parcelle.

Le secteur choisi est propice à l'enregistrement de la dynamique du torrent. La présence de 6 générations de bourrelets torrentiels démontre que le torrent de Malefosse est susceptible de générer régulièrement des laves torrentielles, tout au moins dans la partie supérieure de son chenal. De plus, le fait que certains de ces bourrelets sont exempts de toute végétation confirme que ces transports par lave torrentielle sont relativement récents. Les comptages granulométriques de la fraction grossière de surface révèlent une très nette distinction entre plusieurs types de dépôts. On distingue ainsi les bourrelets torrentiels composés de blocs grossiers (fig. 75, comptages F et G), des dépôts plus fins et qui possèdent un relatif tri granulométrique traduisant un mode de transport plus proche des dynamiques fluviales (fig. 75, comptages E et I). Les lits torrentiels sont, quant à eux, composés de matériaux plus hétérométriques (fig. 75, comptages A, C et H).

Le torrent de Malefosse est donc caractérisé par une dynamique mixte où les transports par laves torrentielles côtoient les transports par charriage. Cependant, il se peut que ce comportement ne traduise en fait que l'efficacité des ouvrages de correction torrentielle mis en place dans le lit du torrent par le service RTM (cf. 2.4.3.2.). En effet, le système de correction torrentielle, constitué d'une douzaine de barrages de sédimentation érigés entre la partie médiane du torrent (1530 m) et la confluence avec la rivière principale, peut expliquer que l'on ne retrouve de traces de laves torrentielles importantes uniquement dans la partie supérieure du torrent. Néanmoins, l'importance des perturbations anthropiques suite au curage d'une partie de lit (cf. 4.2.3.3.) et au réaménagement de la confluence entre les deux branches supérieures (ravins de la combe d'Hermitte et des Rochers Rouges), a limité la possibilité d'effectuer un suivi topométrique régulier de ce torrent.

3.3.4. Les résultats de l'analyse topométrique du Ravin des Sables

Le Ravin des Sables (S_{bv} : 0,82 km² ; A_{max} : 2668 m ; A_{con} : 1431 m), se situe à la limite des communes de Névache et de Val-des-Prés, jusqu'en 1995 son activité torrentielle se manifestait par des écoulements boueux incorporant quelques blocs qui se déposaient occasionnellement sur la RD 994g (14 juin 1957, 20 juin 1993).

Or, le 24 juillet 1995, à l'instar d'une quinzaine d'organismes torrentiels dans le Briançonnais, le Ravin des Sables a connu un épisode de crue (Lahousse et Salvador, 1998a). Dans le cas du Ravin des Sables, cette crue revêt un caractère exceptionnel ; d'une part à cause de l'ampleur des conséquences morphogènes, d'autre part, car on ne retrouve aucun événement de cette importance dans le recensement des crues torrentielles. Lors de cet épisode, une lave torrentielle d'un volume estimé entre 12 000 et 15 000 m³ a atteint le fond de vallée (Lahousse et Romelé, 2000). Les conséquences directes de cette crue furent d'une part la coupure de la RD 994g –principale route d'accès à Névache–, d'autre part

l'obstruction partielle du lit de la Clarée forçant la rivière à inonder la ripisylve en rive droite (cf. 3.4.1.). Les matériaux mobilisés par cette crue provenaient principalement de la partie supérieure du bassin-versant constituée de vastes tabliers d'éboulis alimentés par l'érosion des hautes corniches rocheuses qui les dominent (calcaires et dolomies triasiques). En fait à l'époque « *cette lave torrentielle est apparue pour beaucoup comme un phénomène fortuit qui, en purgeant le bassin de réception d'une partie de ses matériaux directement mobilisables, garantissait de surcroît une certaine inertie morphodynamique pour les prochaines années* » (Lahousse et Romelé, 2000). Un autre effet de cette crue du 24 juillet 1995 fut la mise en place de bourrelets latéraux ayant pour conséquence inédite la chenalisation du Ravin des Sables qui jusqu'alors divaguait sur son cône de déjection. Cette crue a donc abouti au changement du morphotype du cône de déjection qui est passé d'un morphotype divagant à un morphotype chenalisé.

Le résultat de cette chenalisation est de favoriser le transit des matériaux sur le cône de déjection. La crue survenue dans la nuit du 19 au 20 septembre 1999 (82 mm de pluie relevé à Névache pour le 19 septembre 1999), illustre parfaitement les effets de la mise en place des bourrelets latéraux (photo. 25). Ainsi, alors que le volume de matériaux mobilisés était 6 à 10 fois plus faible qu'en juillet 1995 (de l'ordre de 1 500 à 2 000 m³ ; Lahousse et Romelé, 2000), les résultats de cette crue furent relativement proches. La RD 994g fut coupée plusieurs heures alors que la Clarée fut totalement obstruée et quitta son lit sur plus de 300m. Les levés topométriques effectués en mai et septembre 1999 ont permis de déterminer l'évolution du lit du Ravin des Sables. Il apparaît que les matériaux mobilisés par cette crue provenaient quasi exclusivement du lit du torrent. Par la suite, ce torrent a connu deux autres épisodes de crues le 13 juin 2000 et les 15-16 octobre 2001.

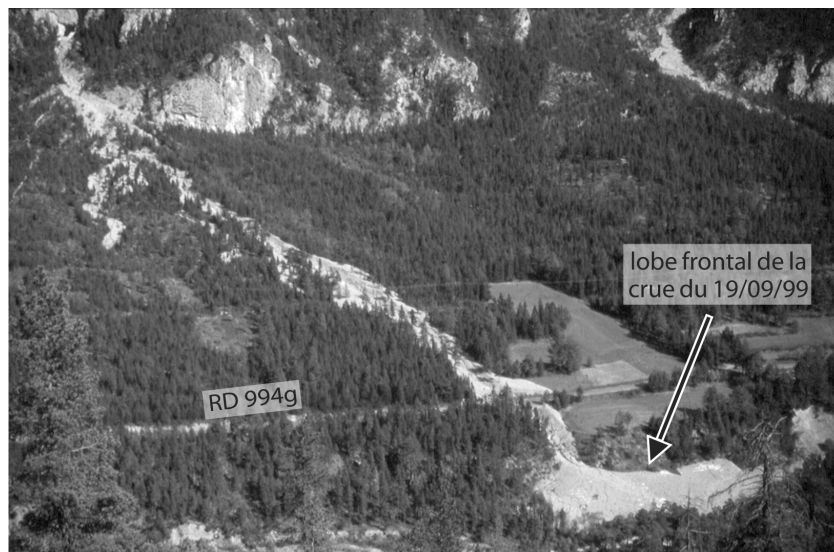


Photo. 25 : Ravin des Sables : crue du 19 septembre 1999

Une carte hydrogéomorphologique à échelle fine, basée sur un modèle numérique de terrain (Garitte *et al.*, soumis), a permis de mettre en évidence le mode de transport de la charge sédimentaire lors des crues de septembre 1999, juin 2000 et octobre 2001 (fig. 76). Ce document qui montre pour deux secteurs distincts les dépôts de crue circonscrits entre les bourrelets torrentiels érigés lors de la crue du 24 juillet 1995, illustre toute la complexité du transport torrentiel. Alors que, dans la partie amont (site 1), on retrouve une série de lobes typiques d'un fonctionnement en bouffées de laves torrentielles successives ; la partie aval (site 2), présente une morphologie bien différente puisque l'on découvre des formes plus proches de la dynamique fluviale : ici, c'est l'érosion qui domine, avec la mise en place de terrasses suite à l'incision des dépôts des différentes crues antérieures.

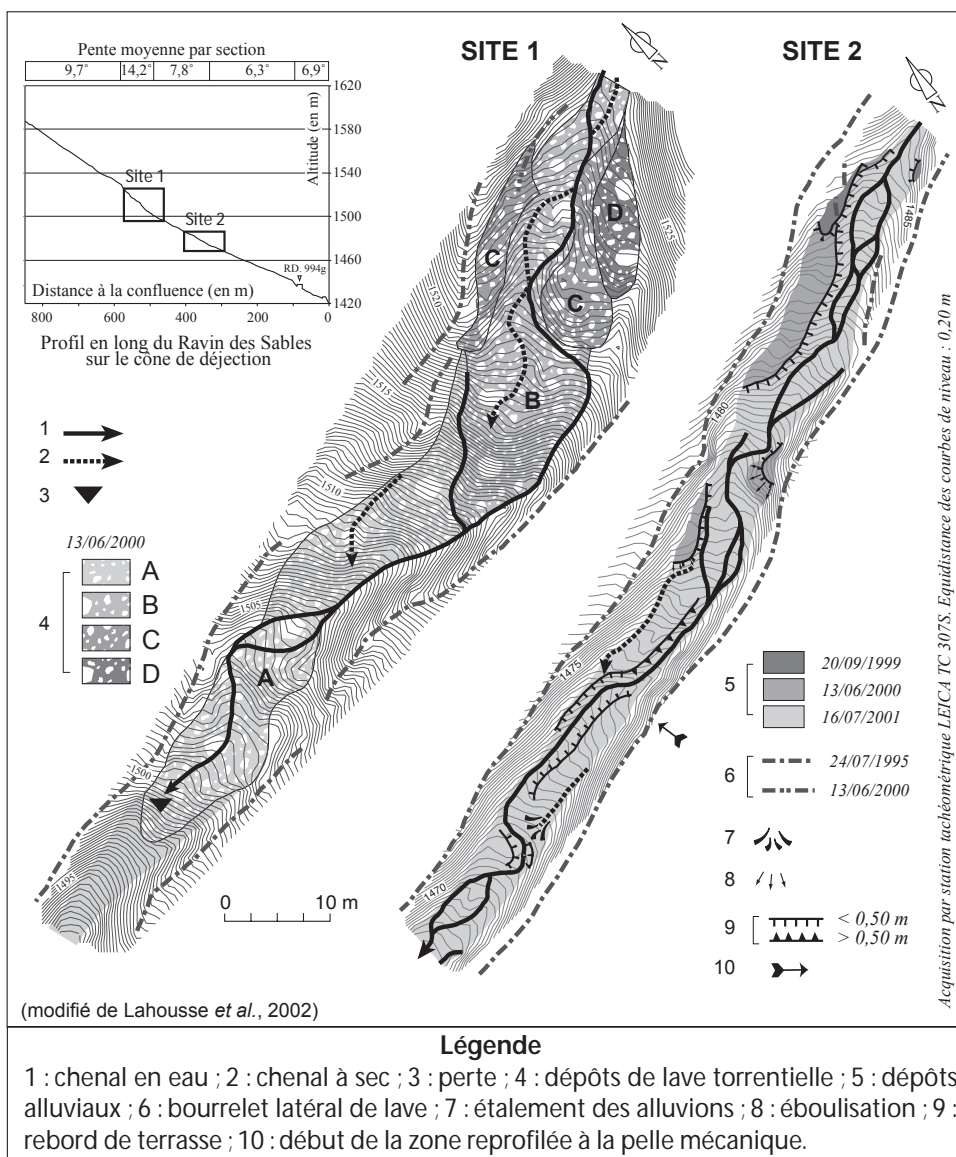


Figure 76 : cartographie détaillée de deux secteurs du Ravin des Sables

Le chenal du Ravin des Sables n'a pas connu d'épisode de crue après octobre 2001, il a cependant été visité régulièrement et la mise en place de parcelles peintes dans le talweg du torrent a confirmé l'absence d'écoulement morphogène. Il n'a donc pas fait l'objet d'un suivi topométrique au cours de notre étude.

3.3.5. Les résultats de l'analyse topométrique du Ravin de l'Enrouye

Le Ravin de l'Enrouye (S_{bv} : 0,23 km² ; A_{max} : 2250 m ; A_{con} : 1359 m) se situe dans la basse vallée de la Clarée. La partie supérieure de son bassin-versant est constituée d'imposantes corniches rocheuses taillées dans des dolomies et calcaires du Trias dont les pentes, souvent supérieures à 50%, limitent la constitution de stocks de matériaux.

Ce torrent connaît une activité régulière depuis une quinzaine d'années ; même s'il est vraisemblable qu'un certain nombre de crues ne sont pas référencées dans l'inventaire des crues torrentielles du fait de l'absence d'enjeux importants sur son cône de déjection en dehors de la RD 994g (tableau 4). Si les observations menées depuis 2001 dans la vallée de la Clarée permettent d'avoir une meilleure compréhension de la dynamique des organismes torrentiels, elles peuvent aussi avoir l'inconvénient de fausser l'inventaire des crues torrentielles. En effet, certaines crues récentes seraient passées inaperçues sans nos observations *in situ*.

Date	Observations
9 juillet 1956	Crue (eaux boueuse et gros matériaux), RD994g coupée sur 50 m, 15 ares de terres agricoles submergés
3 août 1990	Lave torrentielle, RD994g coupée sur 30 m
20 juin 1993	Coulée boueuse* sur le cône de déjection
18 juin 2002	Coulée boueuse qui n'a pas atteint la RD994g
5 août 2003	Coulée boueuse sur le cône de déjection jusqu'à la RD994g
24 juin 2005	Lave torrentielle de faible ampleur avec quelques écoulements boueux sur la RD994g

Tableau 11 : inventaire des crues pour le Ravin de l'Enrouye
(source : RTM 05 et observations personnelles)

* ce terme générique est celui employé dans l'inventaire du service RTM

3.3.5.1. Les conséquences morphogènes de la crue du 18 juin 2002

Le 18 juin 2002, le Ravin de l'Enrouye (comme le torrent voisin de Malefosse) connaît un épisode de crue suite à un épisode orageux survenu en fin d'après midi. Le volume des précipitations qui a déclenché cette crue demeure impossible à quantifier précisément compte tenu de l'absence de station météorologique à proximité du torrent. La seule donnée disponible concerne la station de Briançon qui a enregistré 22,6 mm pour cette journée du 18 juin 2002. L'impact de cette crue est resté très faible, puisque les matériaux transportés se sont déposés sur le cône de déjection et que seuls quelques écoulements boueux ont atteint le fond de vallée. Grâce aux levés topométriques de mai et juillet 2002, il est néanmoins, possible de déterminer les conséquences morphogènes de cette crue. Tout d'abord, l'analyse des effets de la crue du 18 juin 2002 sur le lit du Ravin de l'Enrouye met en évidence une succession de secteurs d'incision et d'accumulation qui rappellent les mécanismes de substitution de charge habituellement évoqués pour le transport par charriage et parfois observés lors de crues torrentielles (Peiry, 1990 ; Lajournade *et al.*, 1998 ; Lahousse et Romelé, 2000). Ce phénomène est bien visible sur la figure 77 A, élaborée en comparant les données des profils en long levés avant et après la crue. De même, les deux profils en travers présentés dans cette même figure (fig. 77 B et C), illustrent cette succession de secteurs d'incision et de secteurs d'accumulation. Dans le cas présent, il s'agit vraisemblablement d'un remaniement de la charge sédimentaire en fin de crue car l'essentiel du transport s'est effectué sous forme de lave torrentielle, comme l'attestent les bourrelets torrentiels relevés à plusieurs reprises dans différents secteurs du chenal.

Malgré le grand nombre de profils en travers levés avant et après cet épisode de crue, il a été impossible d'estimer le volume de matériaux qui a transité. En effet, même si l'on dispose d'un nombre relativement élevé de profils en travers –26 sur l'ensemble du chenal soit en moyenne 1 profil tous les 35 m– il n'est pas envisageable d'extrapoler de façon réaliste l'état du lit entre deux profils. Alors que S. Veyrat-Charvillon (2005) propose de quantifier l'état sédimentaire d'un lit torrentiel en étudiant des « boîtes sédimentaires » délimitées par deux profils en travers ; nous avons constaté dans le Ravin de l'Enrouye, qu'entre deux profils en travers successifs caractérisés par une accumulation, il peut y avoir un secteur qui s'est incisé. Compte tenu de la dynamique observée du torrent, une extrapolation de l'état d'un tronçon du lit à partir de deux profils en travers ponctuels, aboutirait à une estimation de volume erronée ou avec une marge d'erreur très importante qui n'aurait pas de réelle signification.

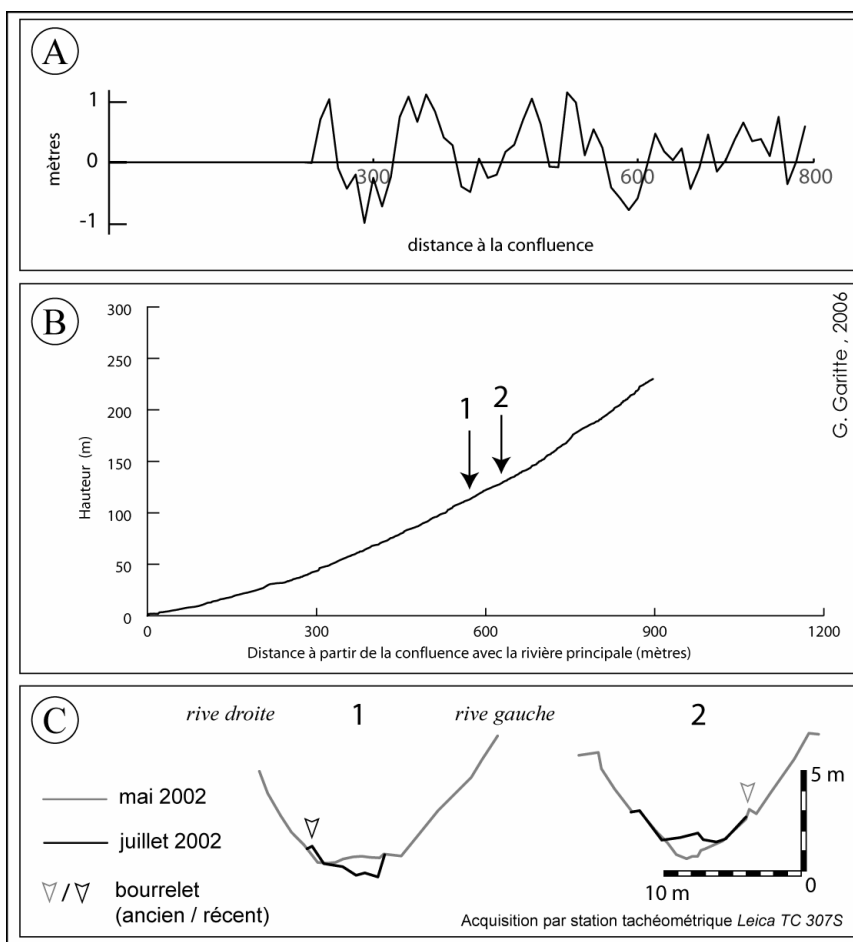


Figure 77 : le Ravin de l'Enrouye ; conséquences de la crue du 18 juin 2002
 A : évolution du profil en long du torrent (mai-juillet 2002)
 B : profil en long et localisation des profils en travers (juillet 2002)
 C : profils en travers (mai-juillet 2002)

3.3.5.2. L'évolution du lit torrentiel de 2002 à 2005

Au delà d'une description événementielle, le suivi régulier du Ravin de l'Enrouye est un outil précieux pour déterminer l'évolution du lit torrentiel durant 4 années. Tout d'abord, il apparaît que le profil en long a globalement peu évolué sur l'ensemble de la période d'observation. On remarque néanmoins une tendance à l'accumulation dans la partie inférieure du chenal, tandis que l'on retrouve 3 secteurs distincts marqués par une incision ne dépassant que ponctuellement 1 m (fig. 78).

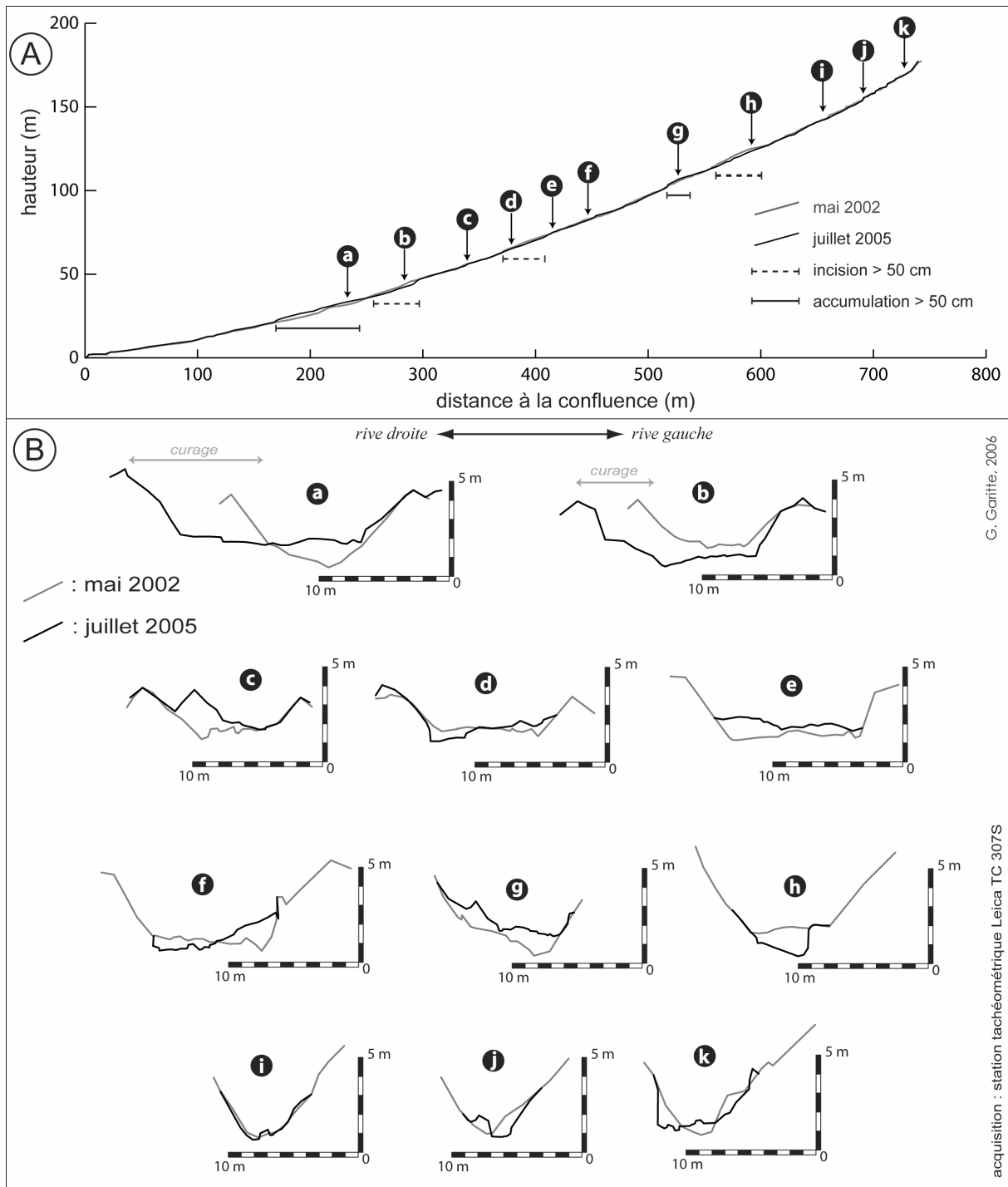


Figure 78 : Ravin de l'Enrouye, évolution des profils longitudinaux et transversaux entre mai 2002 et juillet 2005

L'analyse des profils en travers levés lors des 5 campagnes de mesures, montre qu'à échelle fine, le lit du Ravin de l'Enrouye évolue fréquemment. Les deux séries de profils en travers, présentés en figure 79 B, sont typiques du fonctionnement de ce torrent. Lors des levés successifs, le lit torrentiel a évolué sensiblement mais pas de façon linéaire sur l'ensemble du chenal. Ainsi, lors du même épisode de crue, alors

que certains profils en travers révèlent une incision d'autres montrent un exhaussement du lit (fig. 79).

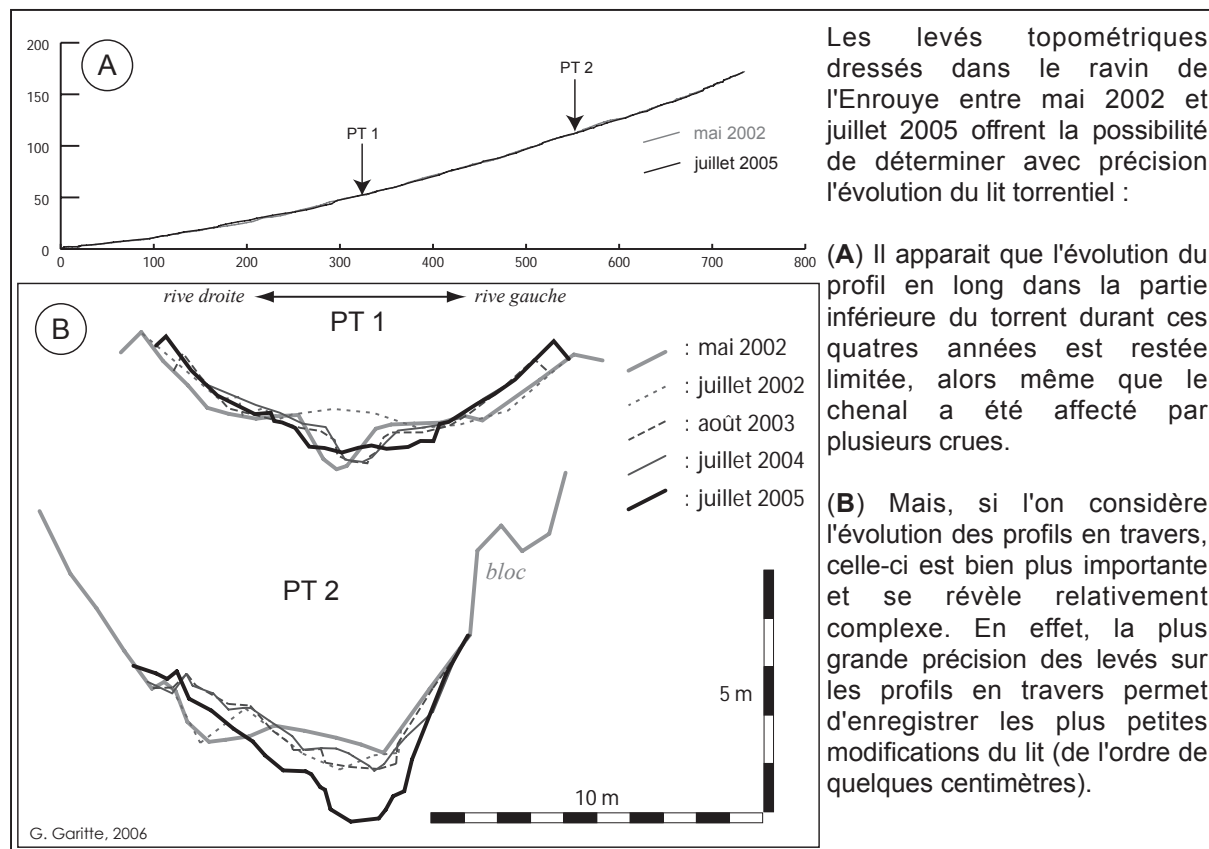


Figure 79 : évolution ponctuelle du lit du Ravin de l'Enrouye (2002-2005)

A : localisation des profils en travers

B : évolution du profil transversal du torrent
voir photos sur les figures suivantes

L'analyse de l'évolution de la morphologie du lit torrentiel du torrent de l'Enrouye à partir de l'examen diachronique de photographies démontre la grande mobilité des matériaux qui constituent le lit. On constate sur les photographies suivantes (photo. 26) qui correspondent aux profils en travers dont l'évolution est détaillée en figure 79 que le lit du torrent évolue de façon régulière depuis le début de son suivi. Ces observations illustrent la variabilité de la morphologie du lit torrentiel et ce uniquement à la faveur de crues HF-BM.

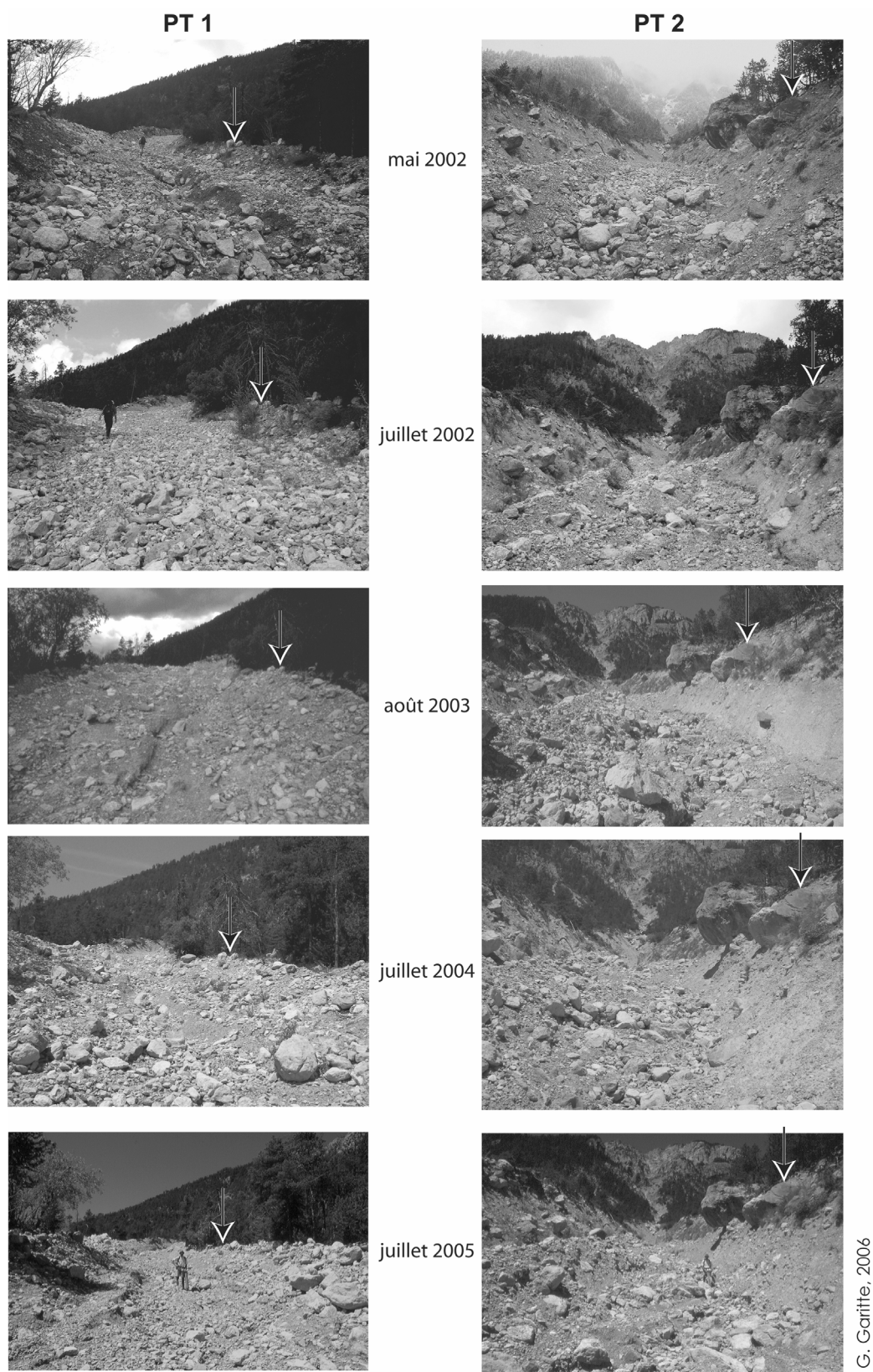


Photo. 26 : aperçu de l'évolution de la morphologie du lit du ravin de l'Enrouye entre mai 2002 et juillet 2005
voir figure précédente pour la localisation des photographies

Les différentes campagnes de mesures menées dans le Ravin de l'Enrouye ont permis de déterminer les modalités de transport de la charge grossière. Les laves torrentielles sont courantes, comme l'attestent les bourrelets torrentiels relevés à plusieurs reprises lors des différents levés. Compte tenu de l'absence de stock sédimentaire important dans la partie supérieure du bassin-versant, il s'agit en grande partie d'un remaniement de la charge de fond et ponctuellement d'incision du lit et d'érosion des berges. Les nombreuses mesures effectuées ne mettent pas en évidence un important transit de matériaux mais souligne l'étendue des relais spatio-temporels dans le transit de la charge grossière dans le Ravin de l'Enrouye.

3.3.6. Les résultats de l'analyse topométrique du Ravin de Combal

Le Ravin de Combal (S_{bv} : 1,32 km² ; A_{max} : 2577 m ; A_{con} : 1373 m), se situe en rive gauche de la Clarée. Le torrent débute sous des corniches rocheuses (calcaires et dolomies triasiques) et la partie supérieure de son bassin-versant comporte quantité d'éboulis et de dépôts morainiques (photo. 27). Au niveau de son cône de déjection ce torrent divague et dépose la majeure partie de sa charge grossière. C'est actuellement un des torrents les plus actifs de la vallée de la Clarée. Il connaît une activité torrentielle régulière depuis 15 ans, on recense ainsi 7 crues : 3 août 1990, 18 juillet 1999, 15 octobre 2000, 19 août 2002, Juin 2003, Printemps 2004, 24 juin 2005. La présence de la RD 201 peut expliquer qu'un nombre élevé de crues soit répertorié. D'autant qu'après certaines crues, des matériaux déposés sur le cône de déjection sont susceptibles d'être remobilisés à la faveur de fortes précipitations, comme durant l'été 1999 durant lequel les services de la D.D.E. sont intervenus à 5 reprises pour nettoyer la RD 201 (Clément, 2000). Ces débordements qui correspondent juste à un remaniement de la charge présente sur le cône de déjection ne sont néanmoins pas comptabilisés dans le recensement des crues torrentielles.

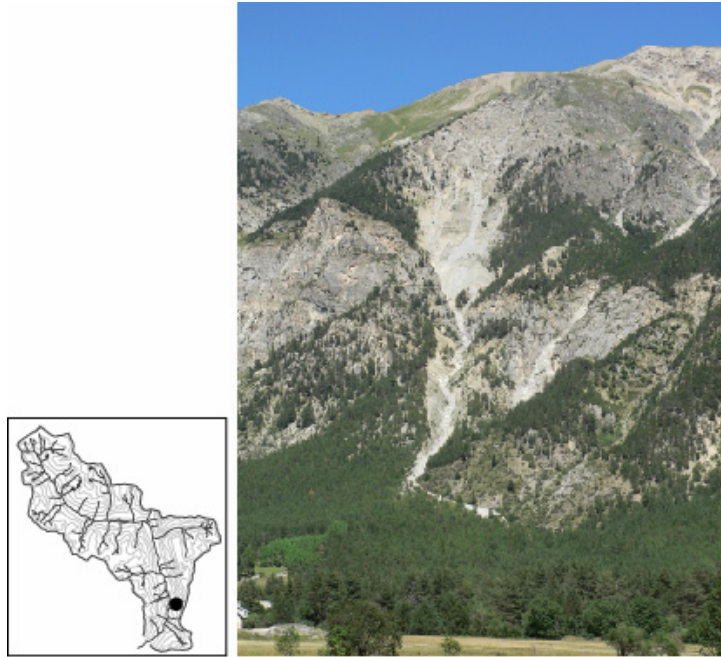


Photo. 27 : le Ravin de Combal

Les mesures topométriques effectuées depuis juin 2002 ont permis de caractériser les conséquences morphogéniques des événements les plus récents. La figure suivante, réalisée en comparant les levés effectués avant et après les crues, illustre bien la diversité du fonctionnement torrentiel du Ravin de Combal lors de différentes crues (fig. 80).

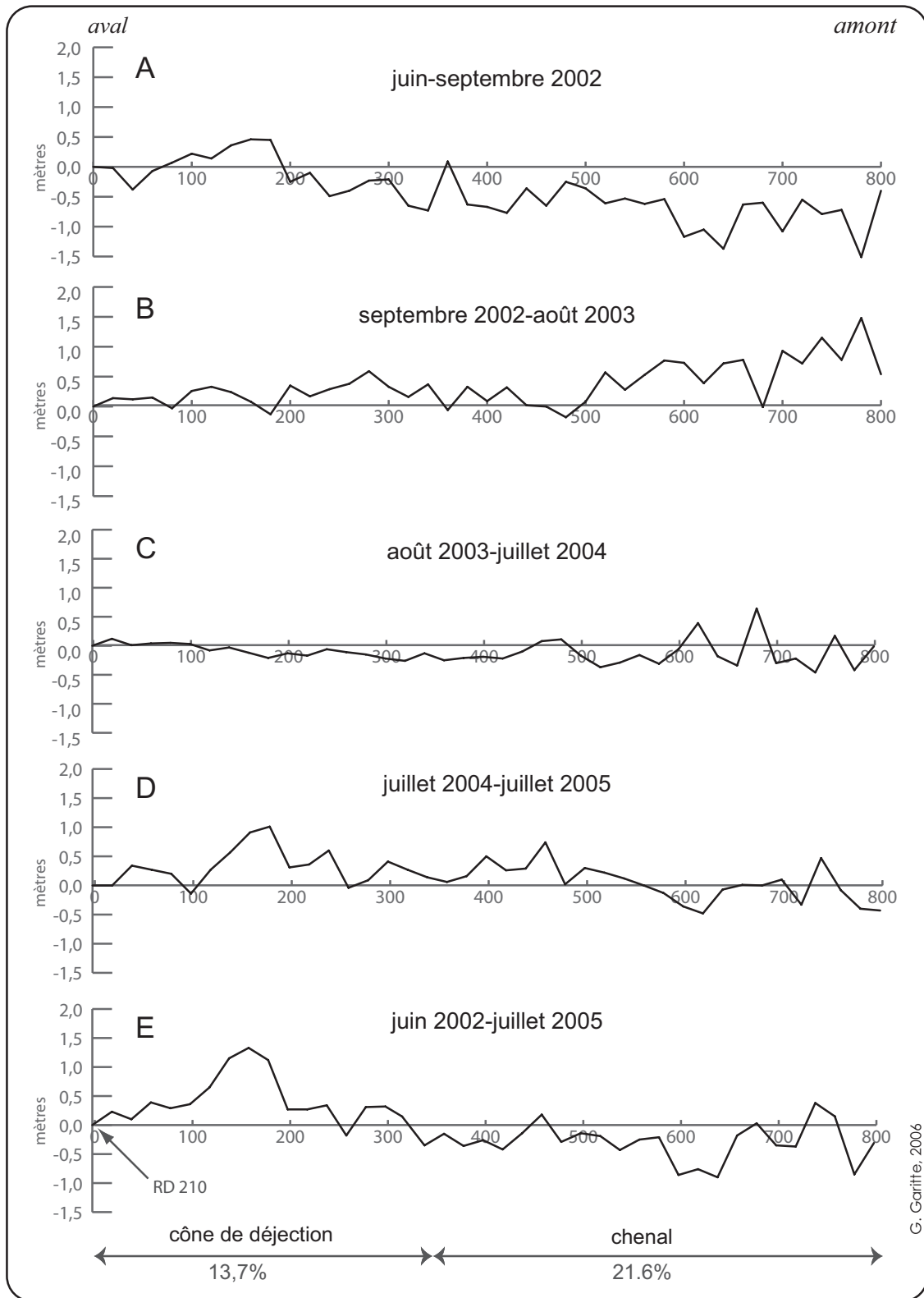


Figure 80 : évolution verticale du profil en long du Ravin de Combal

3.3.6.1. La crue du 19 août 2002

Cette crue du Ravin de Combal a entraîné la coupure de la RD 201 suite au dépôt de matériaux essentiellement boueux sur la route⁴⁴. Il ressort des mesures de juin et septembre 2002 que la crue du 19 août a sensiblement incisé le lit supérieur du torrent (fig. 80 A). Les différentes mesures et observations montrent que pendant cet épisode, une partie au moins des matériaux mobilisés ont été déplacés par une lave torrentielle comme le prouvent les bourrelets torrentiels relevés sur différents profils en travers. Cette crue a prélevé une grande quantité de matériaux dans le lit du torrent (photo. 28). Toutefois cette tendance à l'incision est limitée localement par l'affleurement de la roche mère. Vers 2500 m d'altitude, le torrent s'écoule directement sur des calcaires et calschistes qui auraient été mis à nu lors de la crue du 18 juillet 1999 (Clément, 2000). Ce seuil rocheux a pour effet de fixer le profil du chenal dans la partie médiane du torrent. Dans ce secteur, le torrent ne pouvant s'inciser a tendance à prélever des sédiments en affouillant les berges. En fait, on ne constate pas d'évolution très sensible du profil en long parce qu'une grande partie de la charge (environ 1 200 m³) a débordé en rive gauche à environ 400 m en amont de la confluence avec la Clarée (fig. 80 A). Néanmoins, cette crue conservait une puissance non négligeable, y compris en arrivant sur le cône de déjection où la pente est la plus faible. En effet, un bloc d'un volume de l'ordre de 0,53 m³, marqué et précisément repéré en juin 2002, a été pris en charge et déplacé sur plus de 400 m de distance (fig. 81).

⁴⁴ La route départementale 201 a été coupée pendant 24 h à la suite d'un dépôt de matériaux essentiellement boueux sur 30 à 50 mètres linéaire pour une épaisseur de l'ordre de 20 à 50 cm. Le coût des travaux de remise en état de la route se sont élevés à environ 3 000€ (source : Conseil Général, Division Territoriale)

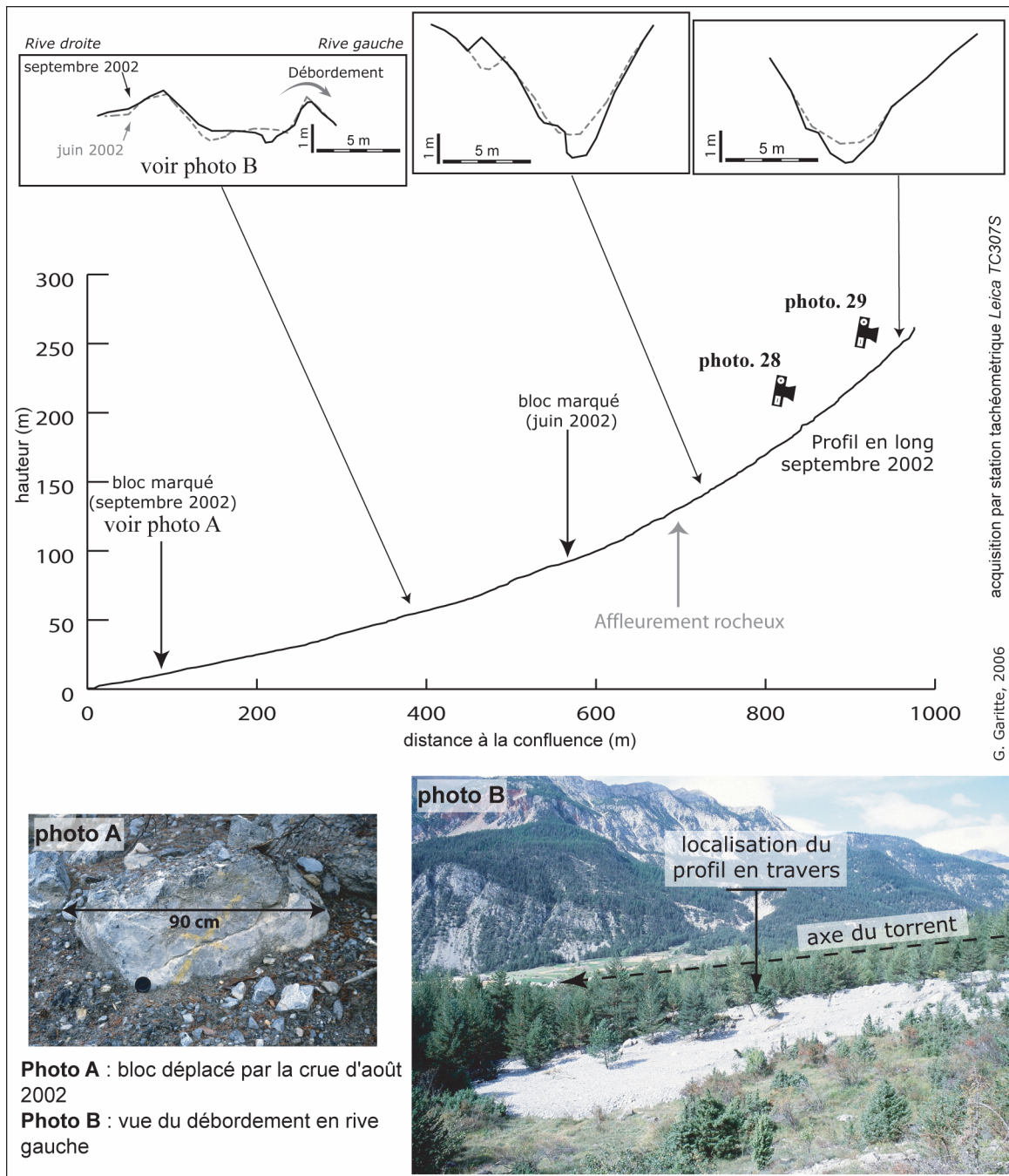


Figure 81 : Ravin de Combal, conséquences morphogènes de la crue du 19 août 2002

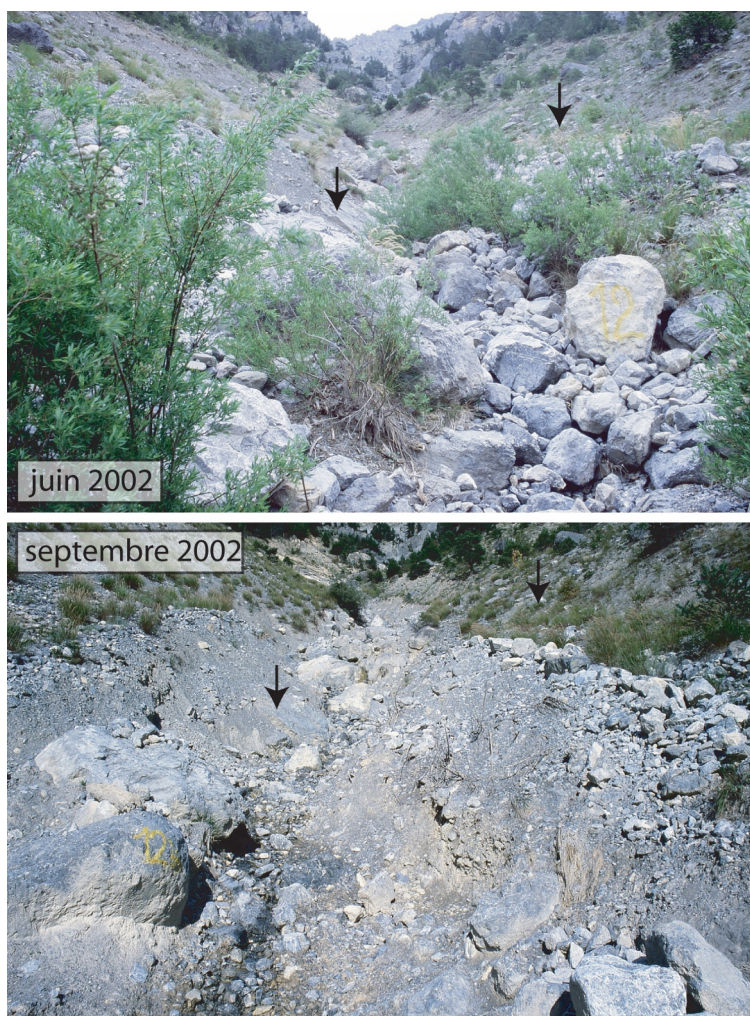


Photo. 28 : conséquences de la crue de 19 août 2002 dans le chenal du Ravin de Combal
voir fig. 81 pour la localisation sur le profil en long

3.3.6.2. La crue de juin 2003

La crue de juin 2003 a eu des effets très différents puisqu'elle est à l'origine d'une recharge sédimentaire de la partie supérieure du chenal (fig. 80 B). Les matériaux provenaient principalement de la partie supérieure du bassin-versant qui contient de vastes dépôts polygéniques qui sont, de plus, alimentés régulièrement par l'érosion des hautes corniches rocheuses qui les dominent (photo. 27). Mais si les conséquences morphogéniques de cette crue ont été faibles sur le cône de déjection, différents enseignements concernant l'impact des crues sur le lit torrentiel ont pu en être tirés. En septembre 2002 une parcelle d'1 m² avait fait l'objet d'un comptage granulométrique et les éléments qui s'y trouvaient ont été marqués à la peinture. En août 2003, quelques galets peints (grand axe inférieur à 5 cm) ont été

retrouvés à près de 380 m en aval de leur position initiale ; et contre toute attente, nombre de ces éléments marqués ont été retrouvés à leur place, et ce même après le passage de la crue.

Cela a permis d'étudier *in situ* l'impact de cette crue sur le lit du torrent. Cette crue a laissé des traces de son passage sur les berges du torrent jusqu'à une hauteur d'environ 1,80 m, ainsi que des dépôts dans le lit du torrent sur une épaisseur de l'ordre de 20 à 30 cm (fig. 82 D).

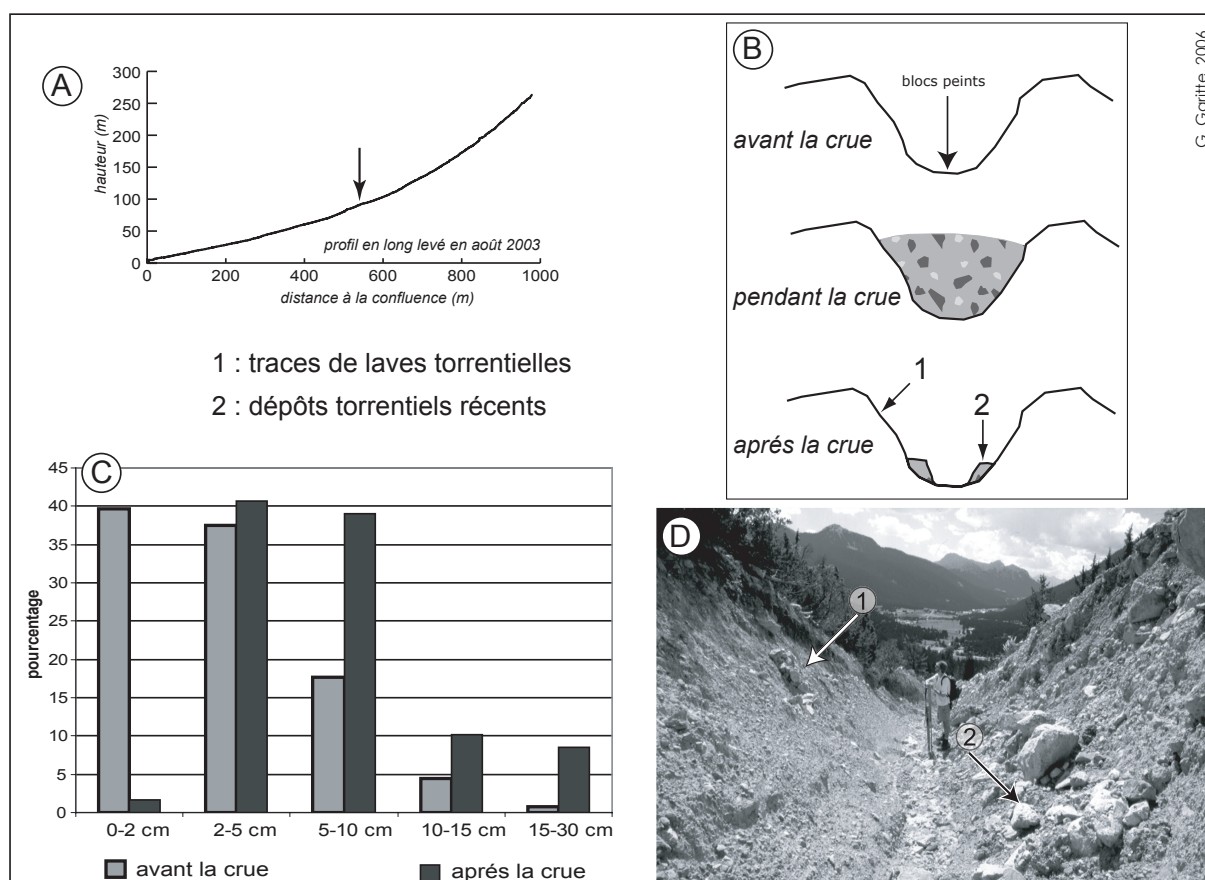


Figure 82 : impact de la crue de juin 2003 sur le lit du Ravin de Combal

A : localisation de la parcelle peinte

B : représentation schématique du passage de la crue

C : évolution de la granulométrie des éléments grossiers de surface échantillonnés

D : photographie du chenal après la crue

Lorsque l'on cherche à établir la chronologie de cet épisode de crue, il apparaît tout d'abord que les matériaux charriés par la crue sont passés par-dessus la parcelle peinte sans la détruire (fig. 82 B). Ensuite, ce sont vraisemblablement les écoulements en fin de crue qui ont incisé les dépôts récents (fig. 82 B), mais cette incision n'a pas touché le lit du torrent. En fait, cette incision s'est surtout limitée aux dépôts récents saturés en eau et plus facilement mobilisables que le lit du torrent. Au niveau de la parcelle étudiée, seuls les éléments les plus fins ont été emportés, cela

se traduit par un décalage vers le haut de la granulométrie des éléments grossiers peints encore présents sur la parcelle après la crue (fig. 82 C). Ces observations tendent à démontrer que lors de leur passage, certaines crues torrentielles, peuvent n'avoir qu'un impact limité sur le lit torrentiel. De plus, ces mesures viennent en complément de celles effectuées après la crue du 19 août 2002, au cours de laquelle un bloc bien plus imposant avait transité sur plus de 400 m (fig. 81). On remarque que ces deux crues, aux conséquences morphogènes distinctes (la première se traduit par une incision dans la partie amont du chenal au contraire de la seconde plus marquée par l'accumulation dans cette partie du lit), n'eurent pas le même impact sur le transport sédimentaires dans la partie médiane du torrent. Ces différences dans la mise en mouvement de la charge grossière peuvent, en fait, exprimer une dissemblance dans l'énergie et la compétence de ces deux crues en réponse à des événements hydrométéorologiques distincts. Toutefois, d'autres études menées dans les Alpes, soulignent l'influence de la structure et de la morphologie du lit dans la prise en charge et le transport des sédiments (Gintz *et al.*, 1996).

3.3.6.3. La crue du printemps 2004

Durant le printemps 2004, le Ravin de Combal a connu un nouvel épisode de crue. Les effets de cette crue se sont limités à la partie supérieure du chenal (fig. 80 C). L'originalité de cette crue est d'avoir été générée non pas suite à des précipitations intenses mais par la fonte rapide des dépôts d'une avalanche survenue durant l'hiver. Dans la vallée de la Clarée ce type de facteur déclenchant est marginal par rapport aux précipitations intenses, mais il a été décrit dans les hautes latitudes (Decaulne *et al.* 2005) ainsi que dans le massif alpin et en particulier en Suisse (Rebetez *et al.*, 1997 ; Bardou *et al.*, 2002 ; Bardou et Delaloye, 2004 ; Wiczorek et Glade, 2005). En fait, la fonte rapide du manteau neigeux ou de cônes d'avalanches a pour effet de modifier la pression interstitielle au sein du matériau jusqu'à aboutir à sa mise en mouvement (Iverson, 1997). Mais si la fonte de la neige peut parfois être à l'origine de laves torrentielles de forte magnitude, cette crue de printemps a juste modifié le lit du torrent sur quelques centaines de mètres, et l'on ne retrouve pas de modifications significatives du chenal au niveau du cône de déjection. Seules quelques accumulations ponctuelles à la faveur de secteurs de ralentissement dynamiques sont visibles

3.3.6.4. La crue du 24 juin 2005

La crue du 24 juin 2005 a eu approximativement le même comportement que celle du 19 août 2002 : la partie supérieure du chenal a été incisée et l'on observe une accumulation dans la partie inférieure du cône de déjection. Cependant, tout comme en 2002, une partie de la charge s'est déposée en rive gauche du torrent, le débordement a eu lieu dans le même secteur et les matériaux sont venus recouvrir les dépôts de 2002, ce qui explique que l'évolution entre les profils en long levés en juillet 2004 et juillet 2005 n'apparaît pas importante (fig. 80 D). Les conséquences morphogènes de cette crue furent :

- un épandage de matériaux, en partie peigné par la forêt, d'une épaisseur généralement inférieure à 50 cm mais atteignant ponctuellement 1,2 m. Ce dépôt, couvrant le cône de déjection sur près de 2,6 ha (mesure par GPS, antenne Hollux®, logiciel Arpent GIS®), est principalement constitué de blocs dont le grand axe est compris entre 5 à 10 cm (fig. 83, comptages A, B, C et E). Seuls certains secteurs, correspondant à des fronts de lave, sont composés de blocs plus volumineux et possèdent une granulométrie étendue (fig. 83, comptage D). A l'inverse les matériaux provenant du lessivage de dépôts situés à l'amont sont caractérisés par une granulométrie peu étendue, composée d'éléments de 2 à 5 cm (fig. 83, comptages G et H)
- une fraction de la charge grossière transportée lors de cette crue est venue couper la RD 210 et a atteint la Clarée. Le volume de matériaux venu en partie obstrué le lit de la rivière principale demeure cependant modeste (estimation de l'ordre de 100 à 150 m³).

Comme dans le cas du torrent de Malefosse et du Ravin des Sables, ce brusque apport de matériaux dans le lit de la rivière principale réaffirme les liens qui existent, au sein du système fluvial, entre le sous-système torrentiel et la rivière principale (Marston *et al.*, 1997). Mais surtout, cette capacité des torrents à engraver la rivière principale soulève des problèmes en terme de risque d'embâcle dont la rupture brutale pourrait avoir des conséquences sérieuses pour les enjeux situés à l'aval (cf. 3.4.).

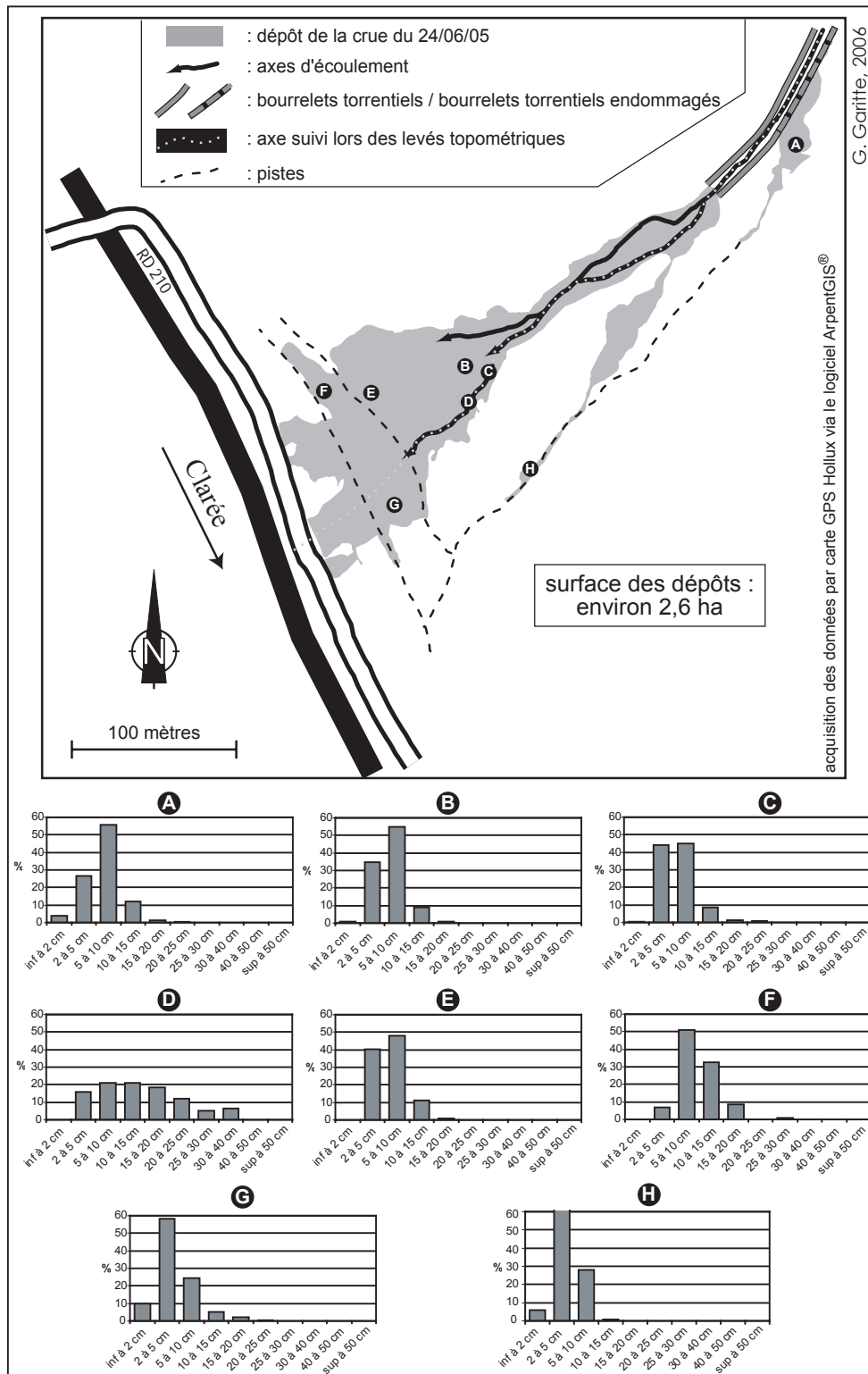


Figure 83 : extension et caractéristiques granulométriques de la crue du 24 juillet 2005 sur le cône de déjection du ravin de Combal

Sur l'ensemble de la période d'observation (juin 2002 à juillet 2005), quatre campagnes de mesures ont permis de déterminer l'évolution du Ravin de Combal. Celle-ci est surtout marquée par une accumulation au niveau du cône de déjection, qui peut atteindre par endroit environ 1,5 m. Les matériaux semblent principalement venir du lit torrentiel et de l'érosion des berges, même si les apports provenant de la partie supérieure du bassin-versant, constituée de placages morainiques et de vastes éboulis, ne doivent pas être négligés. En effet, de nombreux secteurs y compris dans la partie amont du chenal, ont beaucoup changé. L'évolution du secteur présenté sur la photographie suivante (photo. 29), montre une nette tendance à l'incision suite au déplacement de nombreux blocs, dont le volume dépasse parfois 1,5 m³, le lit a été comme purgé. Cela tend à démontrer que certains secteurs du lit torrentiel peuvent largement évoluer à la faveur de crues HF-BM.



Photo. 29 : évolution de la partie amont du lit du Ravin de Combal
voir fig. 81 pour la localisation sur le profil en long

3.3.7. Les résultats de l'analyse topométrique du torrent de Roubion

Le torrent de Roubion (S_{bv} : 5,09 km² ; A_{max} : 2686 m ; A_{con} : 1577 m) se trouve en rive gauche de la partie médiane de la vallée de la Clarée. Il est associé à un bassin-versant marqué par la présence de gypse dans sa partie occidentale dans lequel le torrent s'incise vigoureusement. De plus, d'épais dépôts morainiques affleurent ponctuellement au niveau des gorges qui raccordent le vallon des Thures, qui forme la majeure partie du bassin-versant, au chenal torrentiel *stricto sensu* (photo. 21)

L'évolution de la partie inférieure du chenal du torrent de Roubion entre novembre 2001 et juillet 2005 s'avère relativement limitée (fig. 84). Les modifications du lit entre les deux campagnes de mesures n'ont que très ponctuellement atteint 1 m. Les profils dressés dans le chenal sur l'ensemble du cône de déjection, montrent une légère tendance à l'incision. Cette évolution a sûrement été aussi influencée par les différentes actions de corrections torrentielles menées dans le torrent. Entre les deux campagnes de mesures, en 2004, un barrage de sédimentation a été construit par le service RTM dans la branche de rive droite du torrent. Si ces perturbations anthropiques réduisent la possibilité de tirer des enseignements sur le fonctionnement "naturel" de ce torrent, il est notable de constater que malgré les conditions favorables à une abondante fourniture en matériaux mobilisables (présence d'épais dépôts morainiques), ce torrent reste marqué par une légère tendance à l'incision. Cela peut être le signe de l'efficacité des ouvrages de correction torrentielle implantés dans le lit du torrent par le service RTM qui, en fixant le profil du chenal et en favorisant le stockage sédimentaire dans la partie amont du lit, entraîne un phénomène d'incision dans la majeure partie du chenal inférieur. Toutefois, cela peut aussi signifier que l'ajustement morphologique du torrent au tarissement du transit sédimentaire reste d'actualité. La progression de la couverture végétale au niveau du raccordement entre le vallon des Thures et le chenal, dans des secteurs autrefois dominés par le ruissellement, peut avoir modifié la dynamique sédimentaire du torrent de Roubion.

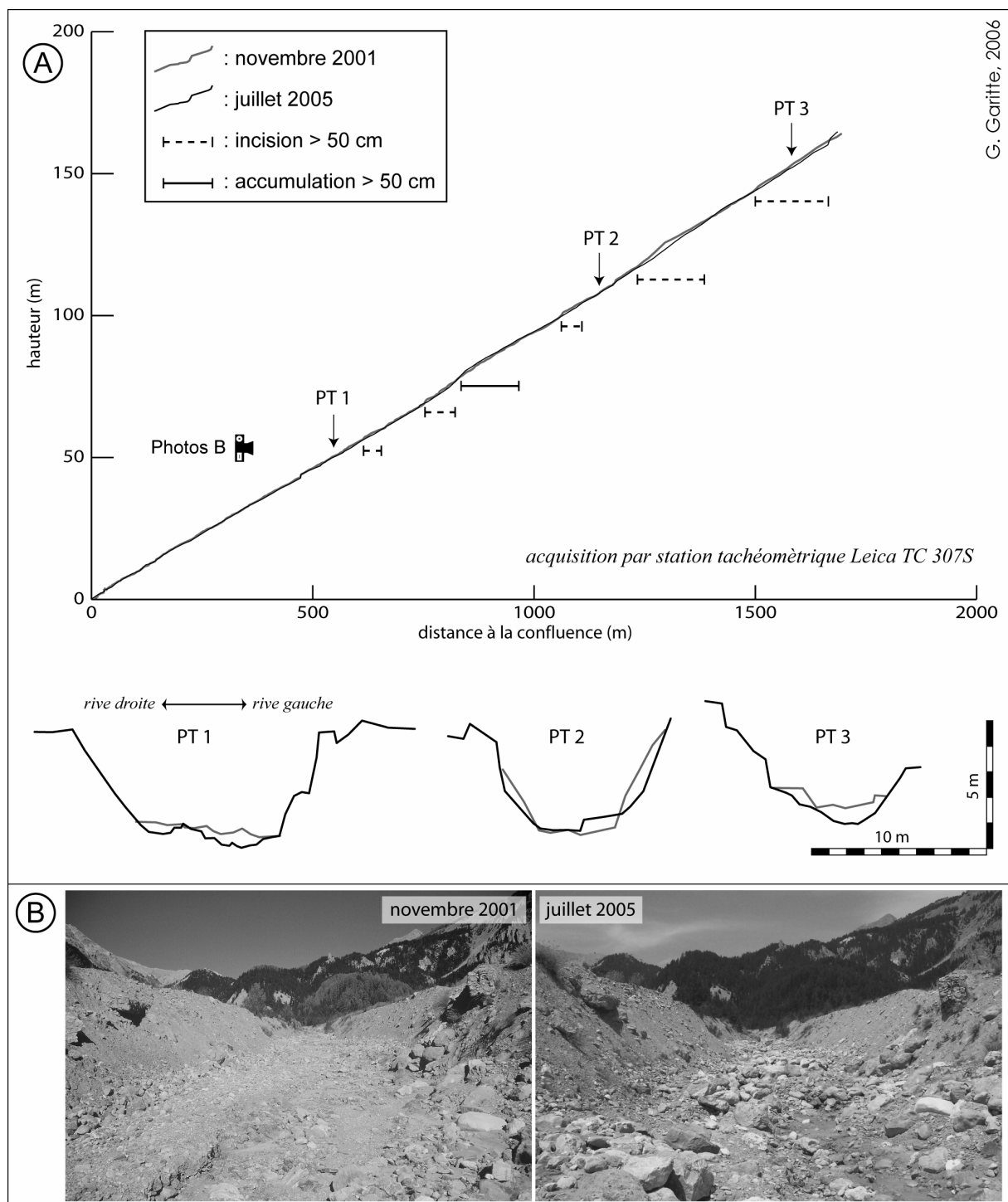


Figure 84 : évolution du lit torrentiel sur le cône de déjection du torrent de Roubion (2001-2005)

A : topométrie

B : photographies diachroniques du PT 1

3.3.8. Les crues torrentielles du 16 juillet 2006

Le 16 juillet 2006, à la fin d'une journée caniculaire, de violents orages se sont abattus sur plusieurs communes du Briançonnais. Les précipitations, mesurées sur 24 heures, se sont élevées à 11,3 mm à Névache et 25,5 mm à la station de Briançon (source : Météo France). Dans la vallée de la Clarée, en plus de la réactivation de différentes coulées de débris élémentaires, ces orages ont déclenché plusieurs crues torrentielles. Ces épisodes paroxystiques récents ont fait l'objet d'une étude individuelle car ils offrent la possibilité d'analyser un exemple de crues torrentielles multiples simultanées. En effet, en quelques heures, 3 torrents relativement distants à l'échelle de la vallée (fig. 85) et possédant des caractéristiques morphologiques différentes sont entrés en crue : le torrent du Roubion ($S_{bv} : 5,09$), le torrent de la Ruine ($S_{bv} : 1,16$) et le Ravin de l'Enrouye ($S_{bv} : 0,23$). Notre approche a permis, d'une part, de définir les modalités de transport de la charge sédimentaire, d'autre part, d'analyser les conséquences de ces crues et l'origine des perturbations consécutives.

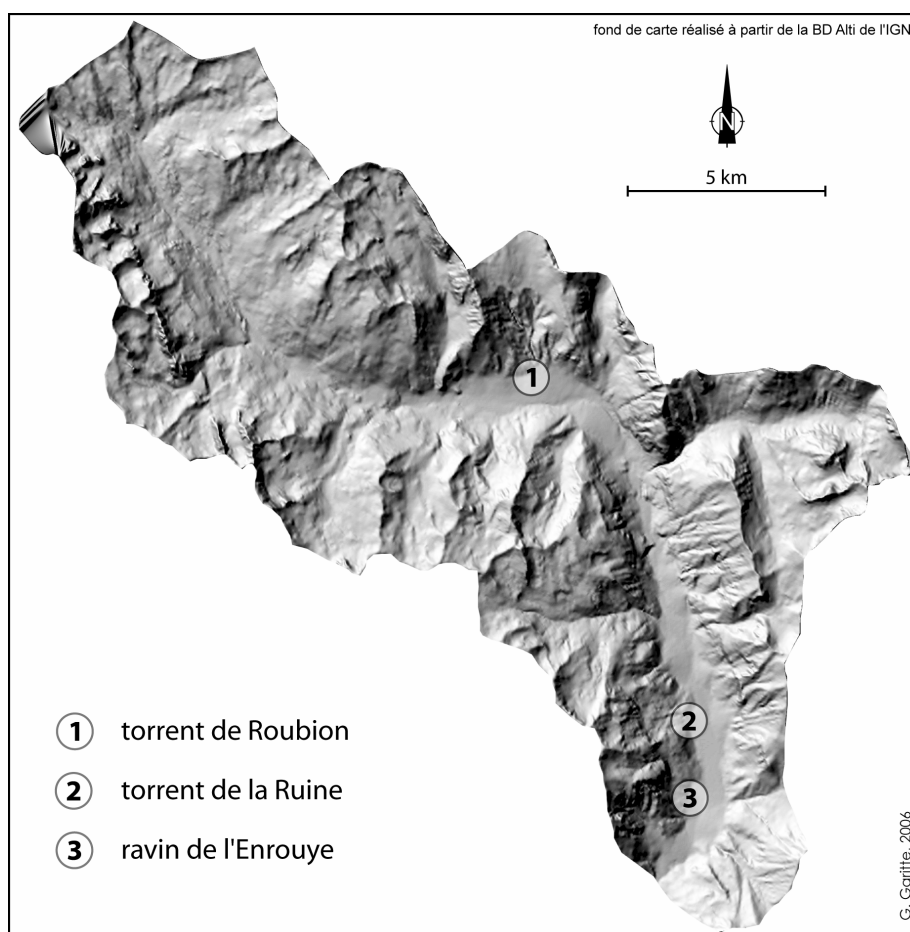


Figure 85 : localisation des crues torrentielles du 16 juillet 2006

3.3.8.1. Le ravin de l'Enrouye

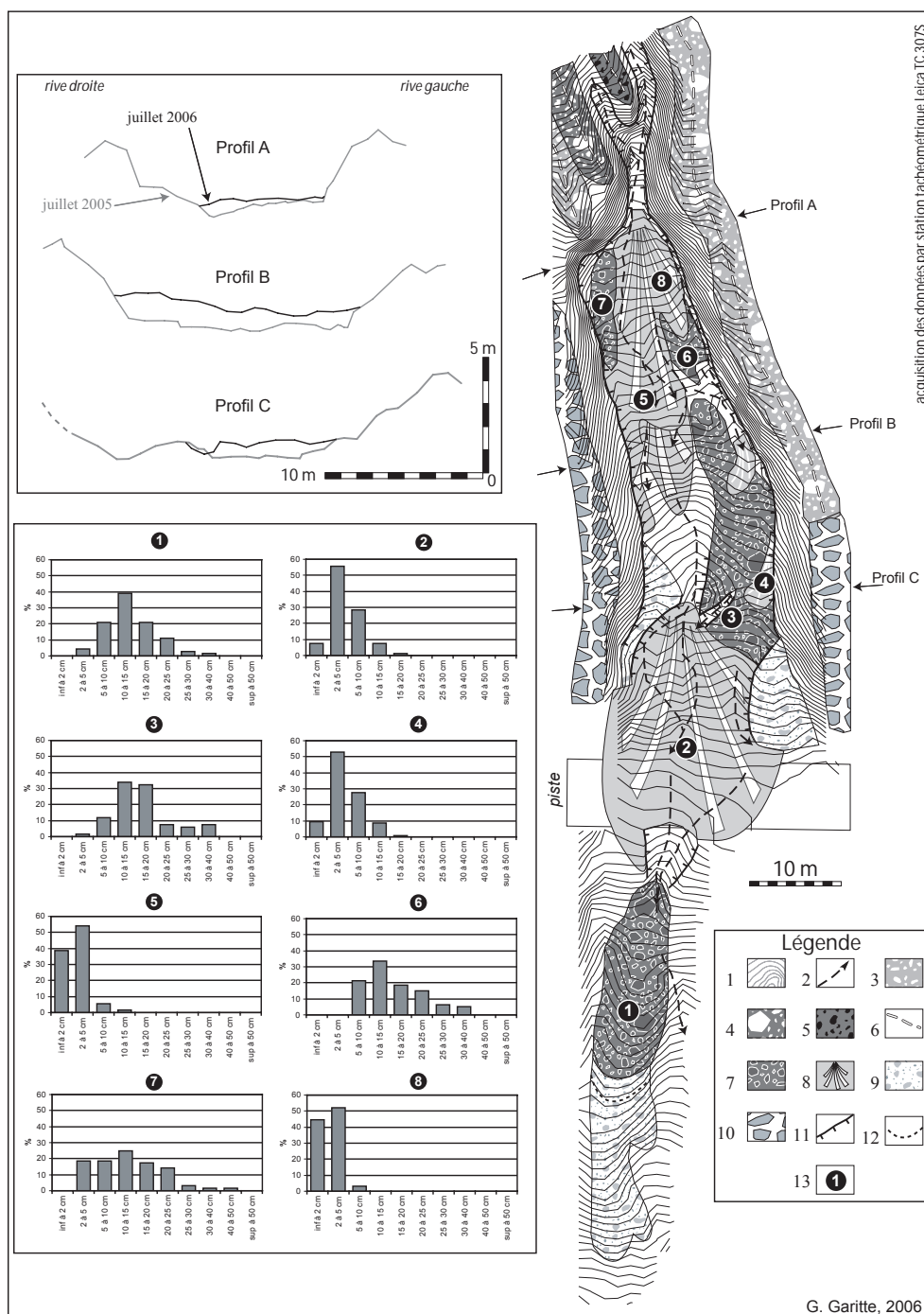
Lors de cette crue, les écoulements du ravin de l'Enrouye n'ont pas directement atteint le fond de vallée et la RD 994g. Cependant, une piste ayant principalement une vocation touristique (chemin de randonnée pédestre, de vélo tout terrain, d'équitation et piste de ski de fond) située sur le cône de déjection a été coupée. Le suivi régulier de ce torrent ainsi que les nombreuses mesures topométriques permettent de déterminer les grandes caractéristiques de cette crue morphogène.

L'examen des formes laissées par cette crue, et en particulier les levées latérales ponctuellement visibles le long du chenal, atteste qu'une partie au moins du transport de la charge grossière s'est effectuée par le biais d'une lave torrentielle. De plus, les observations menées dans le lit du torrent démontrent que la lave torrentielle générée lors cette crue a été suivie par des écoulements de fin de crue qui ont ponctuellement incisé et lessivé les dépôts récents et mobilisé des matériaux relativement fins jusque dans la partie terminale du chenal. Ces observations soulignent, comme cela a déjà été observé dans d'autres organismes torrentiels de la vallée, que le transit de la charge sédimentaire s'est effectué selon différents modes de transport au cours de cette crue.

Pour mieux comprendre les effets de cette crue, un MNT a été dressé sur le cône de déjection dans un secteur de ralentissement dynamique. Ce MNT a servi de base à une cartographie hydrogéomorphologique à grande échelle, apte à souligner les conséquences morphogènes de cet événement (fig. 86).

Dans un premier temps, il semble que la lave torrentielle qui a transité dans la majeure partie du chenal d'écoulement s'est immobilisée dans un secteur où le chenal a été élargi à la pelle mécanique et qui correspond à une zone de ralentissement dynamique propice à l'arrêt des crues torrentielles. Une portion de ces matériaux relativement grossiers (fig. 86, comptages granulométriques 1, 3, 6, 7) a transité jusqu'à recouvrir une partie des dépôts de la crue du 24 juin 2005. Ces éléments hétérométriques, dont le grand axe est généralement compris entre 5 et 25 cm, correspondent aux matériaux mobilisés par une lave torrentielle. Plus en aval, on ne retrouve que quelques débris végétaux et des traces d'écoulements boueux. Dans un deuxième temps, des écoulements chargés de matériaux fins, dont le grand axe n'excède que rarement 5 cm, (fig. 86, comptages granulométriques 2, 5, 8) sont venus successivement s'immobiliser sur la piste et sur les matériaux grossiers fraîchement déposés. On retrouve plusieurs lobes correspondant à autant de phases de dépôts consécutives. Il semble en fait que ces éléments plus fins aient été mobilisés par des écoulements de fin de crue qui ont pu, par endroit, inciser et lessiver les dépôts récents avant de déposer leur charge à la faveur d'un ralentissement dynamique à l'aval. C'est par exemple le cas en rive gauche où,

localement, des dépôts grossiers ont été mobilisés et déposés quelques mètres en aval (fig. 86, comptage granulométrique 4).



3.3.8.2. Le torrent de Roubion

Depuis son endiguement⁴⁵, il y a maintenant plus de trente ans, le torrent de Roubion n'avait causé aucun dégât sur son cône de déjection à la suite d'une crue. Or, cette crue débordante du torrent de Roubion a endommagé⁴⁶ le chantier de construction d'un nouveau pont et provoqué un embâcle, ce qui a entraîné la coupure pendant 3 h 30 min de la seule route desservant le chef lieu de la commune de Névache (RD 994g). De plus, les débordements causés par cet embâcle ont atteint et légèrement endommagé la station d'épuration située à proximité du torrent (photo. 30).

L'examen *in situ* des traces laissées dans le lit du torrent a permis de mieux comprendre cette crue. Tout d'abord, il apparaît que les différentes branches du torrent n'ont pas contribué de la même façon à la genèse de cette crue. C'est principalement l'une des deux branches du torrent, le ravin de la Liche, qui a alimenté le chenal en l'eau, alors que dans la branche orientale les traces d'écoulement sont plus diffuses (fig. 87). Ce comportement différent des deux principales branches du torrent peut s'expliquer par la possible localisation des précipitations au niveau de la crête de la Grande Chalanche et surtout par la morphologie particulière du bassin-versant. Alors que la branche principale du torrent draine le vallon des Thures qui possède une pente moyenne relativement faible (inférieure à 8%, cf. 2.5.2.), le ravin de la Liche est, lui, dominé par la Grande Chalanche culminant à plus de 2600 m, compte tenu de l'énergie du relief dans ce secteur, la concentration des eaux se révèle plus rapide.

⁴⁵ L'historique de la correction torrentielle dans le torrent de Roubion est détaillé dans le chapitre consacré aux différents modes de gestion du risque torrentiel dans la vallée de la Clarée

⁴⁶ Le montant des dégâts provoqués par cette crue sur le chantier du nouveau pont s'élève à 4600€ (source : QUEYRAS Travaux Publics)

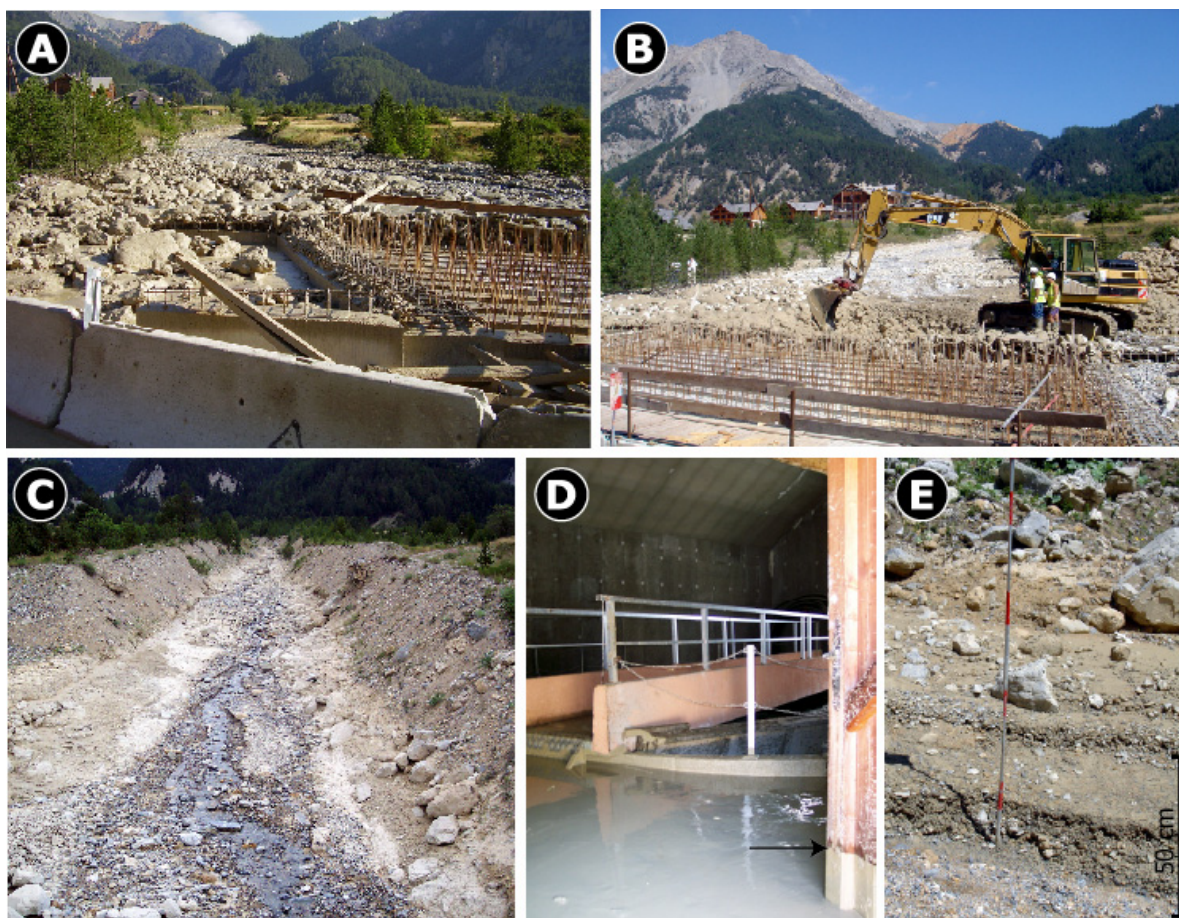


Photo. 30 : Torrent de Roubion : conséquences de la crue du 16/07/06

A et B : l'embâcle au niveau du chantier du pont

C : le lit du torrent après la crue, les dépôts récents apparaissent plus clairs

D : la station d'épuration inondée, la flèche montre le niveau maximale de la boue

E : le litage des dépôts de cette crue

L'examen des matériaux mobilisés et déposés lors de cette crue a permis de déterminer les modalités du transport de la charge grossière. Une portion du chenal de la branche orientale située juste à l'aval d'un barrage, révèle des levées latérales de faible ampleur (hauteur maximale : 1,20 m), signalant ainsi le passage d'une lave torrentielle. La forte pente et la présence de matériaux mobilisables directement dans le lit peuvent expliquer que l'on ne retrouve de traces de lave torrentielle que dans cette portion du lit. En dehors de ce secteur très limité, l'organisation litée des dépôts⁴⁷ atteste d'un transport par charriage (photo. 30).

Les évolutions du profil longitudinal s'avèrent dans l'ensemble très limitées, toutefois, la majeure partie du chenal comporte des traces d'écoulements boueux

⁴⁷ Différents échantillons ont été prélevés dans ces dépôts, l'analyse granulométrique en cours va permettre de préciser les modalités de transport. En effet, contrairement aux autres événements décrits dans ce travail, le fait d'être sur place lors de la crue a permis de faire les prélèvements moins de 24 h après le passage de la crue, les matériaux n'ont donc pas été sensiblement remaniés ou lessivés par les écoulements ou la pluie.

venus partiellement recouvrir d'anciens dépôts jusqu'à une hauteur de 1,2 à 1,5 m au dessus du lit actuel. Localement, on retrouve une succession de zones d'incision – maximum 1,2 m– et de dépôts qui rappellent les phénomènes de substitution de charge décrits sur d'autres organismes torrentiels (Peiry, 1990 ; Lahousse et Romelé, 2000).

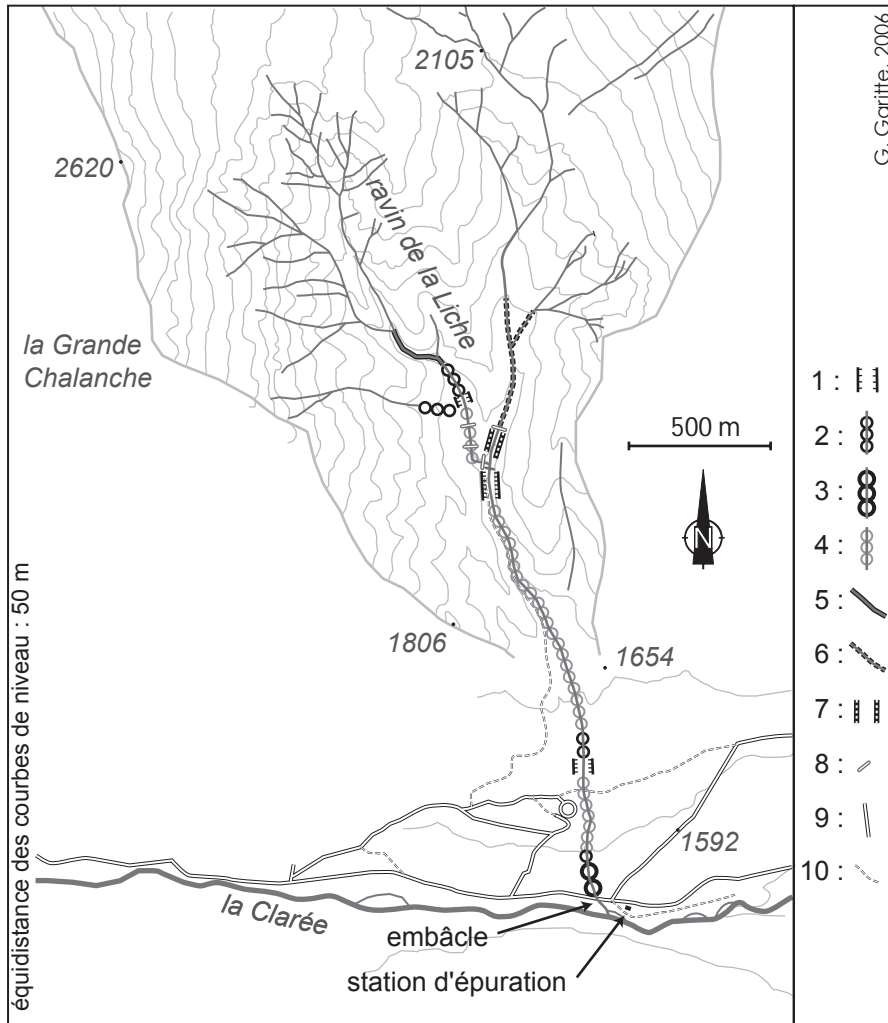


Figure 87 : les effets de la crue du 16 juillet 2006 sur le lit du torrent de Roubion
 1 : incision > 0,5 m ; 2 : accumulation > 0,5 m ; 3 : accumulation > 1 m ; 4 : traces d'écoulement boueux ; 5 : traces d'écoulement liquide ; 6 : traces d'écoulement liquide important ; 7 : bourrelets torrentiels ; 8 : barrage ; 9 : route ; 10 : piste.

Le suivi topométrique du torrent a aussi permis d'estimer entre 2 700 et 3 400 m³ le volume de matériaux accumulés à l'amont de la buse installée à l'ouverture du chantier de construction du nouveau pont de franchissement de la RD 994g (fig. 88).

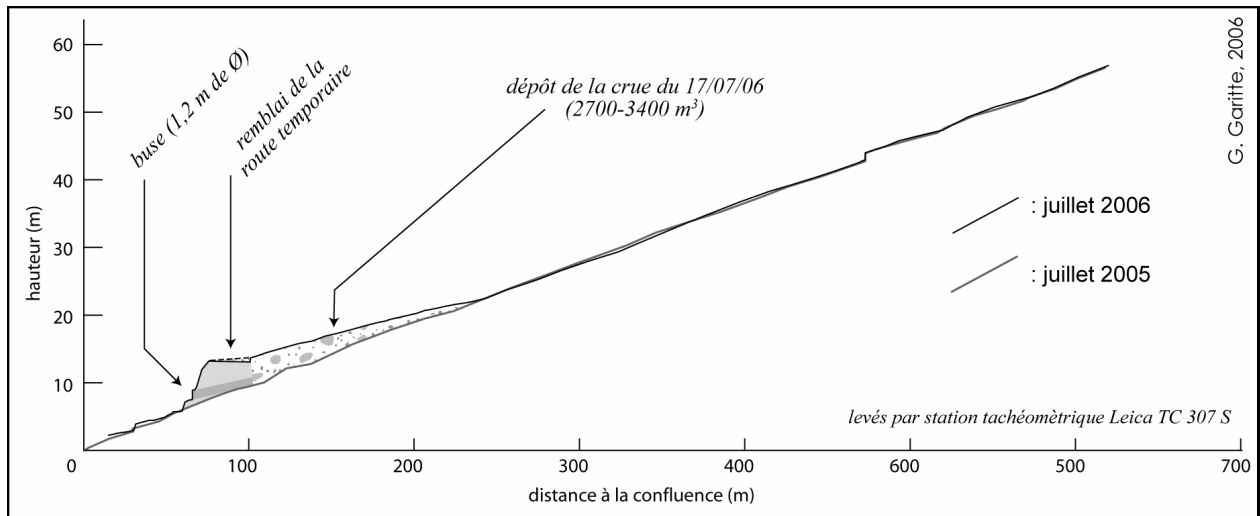


Figure 88 : évolution du profil longitudinal du torrent de Roubion dans sa partie aval à la suite de la crue du 17 juillet 2006

Si cette crue a été déclenchée par un événement hydrométéorologique intense, ses conséquences et les perturbations qui en suivirent, apparaissent en grande partie d'origine anthropique. Lors des travaux, une seule buse d'un diamètre de 1,2 m de diamètre (tirant d'air : 1,13 m²) permettait au torrent de s'écouler jusqu'à la rivière principale alors que le pont possédait lui un tirant d'air de l'ordre de 24,3 m² (levé topométrique de novembre 2001). Il est alors vraisemblable qu'en l'absence des travaux de construction d'un nouveau pont ayant nécessité la mise en place d'une route temporaire, cette crue n'aurait eu que des effets mineurs au niveau de la confluence avec la rivière principale.

3.3.8.3. Le torrent de la Ruine

Cette crue du torrent de la Ruine est survenue le 16 juillet vers 20 h 30 soit environ 1 heure après le début de l'orage. Le débordement du torrent dans sa partie terminale n'a causé aucun dégât mais la coupure de la RD 994g, engravée par plusieurs décimètres de matériaux essentiellement boueux, a interrompu la circulation pendant 3 h sur cet unique axe de communication desservant l'amont de la vallée de la Clarée.

Cette crue apparaît riche d'enseignements. Tout d'abord, on constate une multiplicité des modes de transport de la charge sédimentaire. Dans la partie amont du torrent, on retrouve des traces de bourrelets latéraux indiquant que le transport de la charge grossière s'est en partie effectué sous forme de lave torrentielle (Photo. 31 A). Toutefois, plusieurs indices indiquent que cette lave torrentielle a été suivie d'un écoulement plus liquide qui a incisé le lit torrentiel sur plusieurs décimètres jusqu'à exhumer un niveau argilo-limoneux compact (Photo. 31 C). Cette incision a

affouillé les berges et entraîné une déstabilisation des versants. Ces réactivations locales des vastes glissements de terrain présents dans le bassin-versant contribuent à une recharge sédimentaire rapide du lit torrentiel (Photo. 31 B). Par ailleurs, les observations menées tout au long du lit soulignent l'efficacité des ouvrages de correction torrentielle mis en place par le service RTM dans la partie terminale du chenal d'écoulement juste à l'apex du cône de déjection. En effet, une partie de la charge sédimentaire s'est immobilisée au niveau de l'atterrissement du premier barrage RTM (B6). Dans ce secteur, propice au ralentissement dynamique, les blocs les plus volumineux ont été stoppés (Photo. 31 D). En aval de la série de 6 barrages de sédimentation, les traces de cette crue correspondent à des dépôts boueux ne contenant que peu de blocs (Photo. 31 E et F).

Les levés topométriques décrivant l'évolution du lit torrentiel entre 2004 et 2006, révèlent que cette crue n'a pas eu de conséquences morphogènes majeures dans la partie inférieure du chenal (fig. 89). On constate ainsi que les traces de boue associées à cette crue ne dépassent que ponctuellement une hauteur de 2 m au dessus du lit actuel. En dehors d'une accumulation notable au niveau de l'atterrissement du barrage RTM le plus amont et dans la partie terminale du torrent au niveau de la RD 994g, on ne constate pas de changement significatif dans le profil longitudinal du torrent.

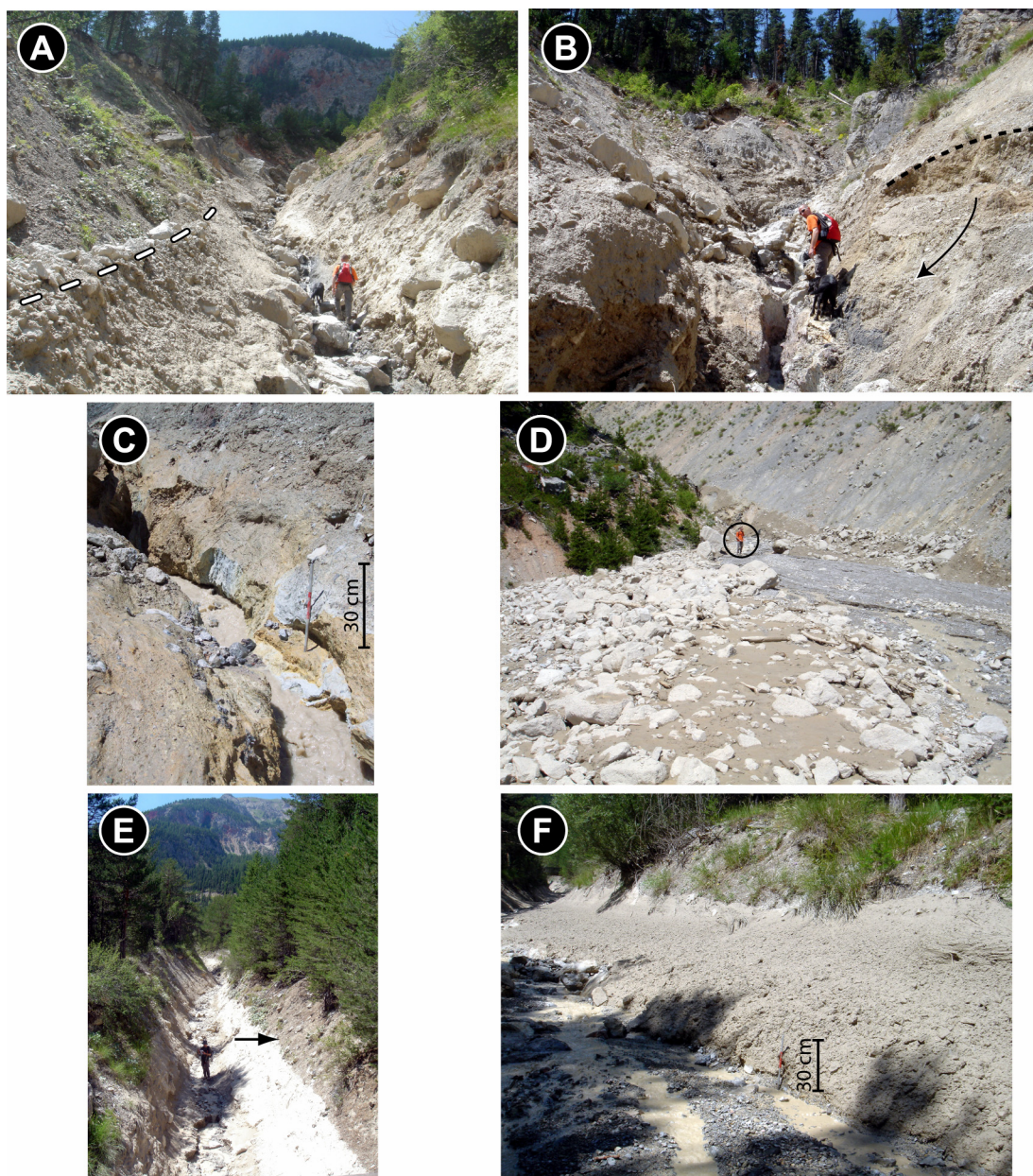


Photo. 31 : Torrent de la Ruine : la crue du 16/07/06

les photos sont présentées d'amont vers l'aval

A : trace de lave torrentielle dans la partie supérieure du chenal ; B : l'incision du lit et la déstabilisation consécutive des versants ; C : l'incision du lit torrentiel ; D : l'atterrissement du barrage B6 ; E : le chenal en aval des barrages notez le niveau des écoulements boueux ; F : les dépôts de la crue en aval des barrages

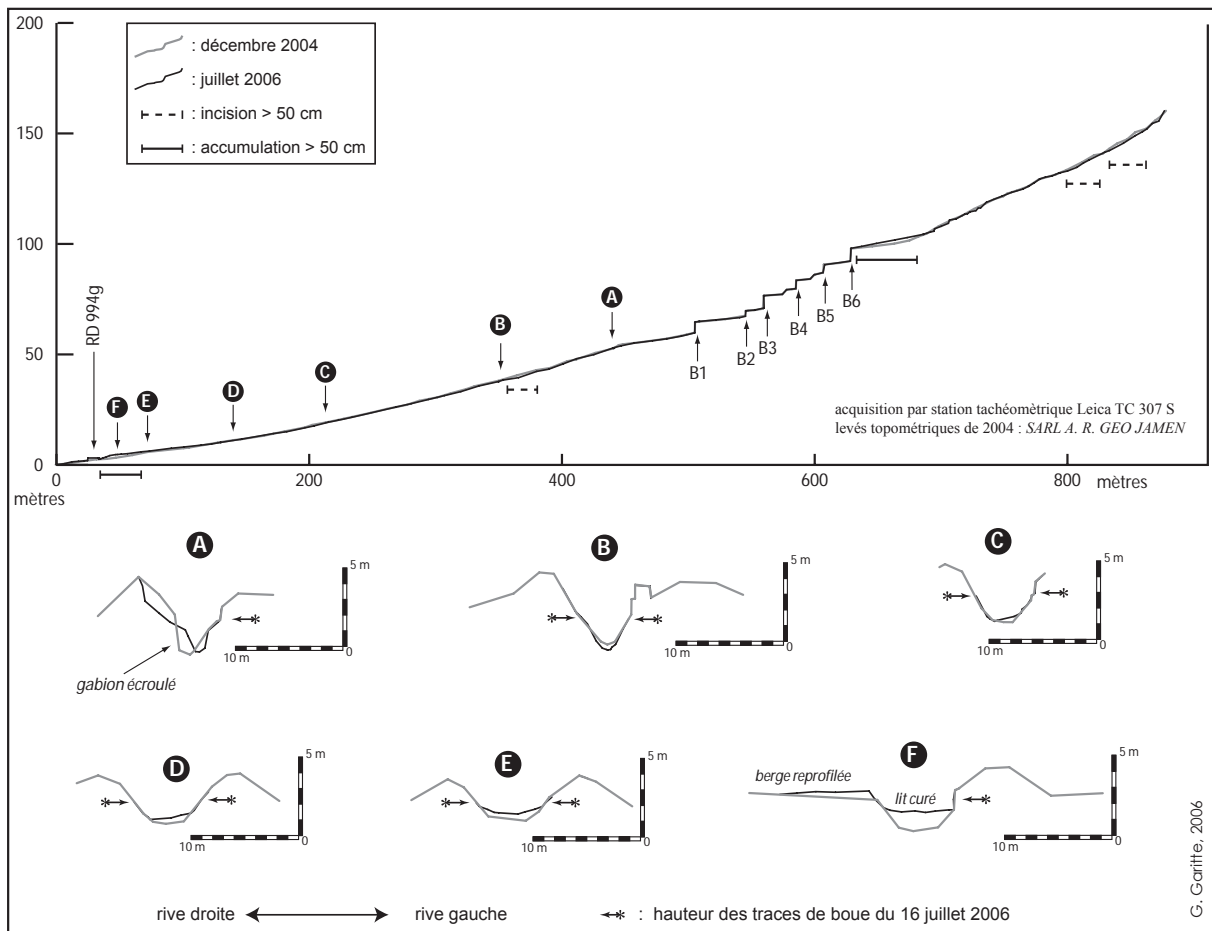


Figure 89 : évolution du lit torrentiel du torrent de la Ruine (2004-2006)

Ces résultats soulignent que la principale perturbation causée par cette crue, à savoir la coupure de la RD 994g, est en grande partie d'origine anthropique. Le franchissement du torrent de la Ruine sous la RD 994g –uniquement constitué de deux buses de 40 cm de diamètre– apparaît largement sous-dimensionné puisque le moindre écoulement chargé peut, en effet, rapidement boucher les buses et entraîner un débordement sur la route (Photo. 32). Toutefois, des problèmes techniques liés au passage au niveau de la route d'une importante conduite d'eau alimentant Briançon, limitent la possibilité de construire aisément un ouvrage possédant un tirant d'air plus conséquent. C'est pourquoi, d'importants travaux visant à aménager de nouvelles digues ainsi qu'une plage de dépôts sur le cône de déjection du torrent de la Ruine sont prévus à court terme (cf. 4.2.3.1.).

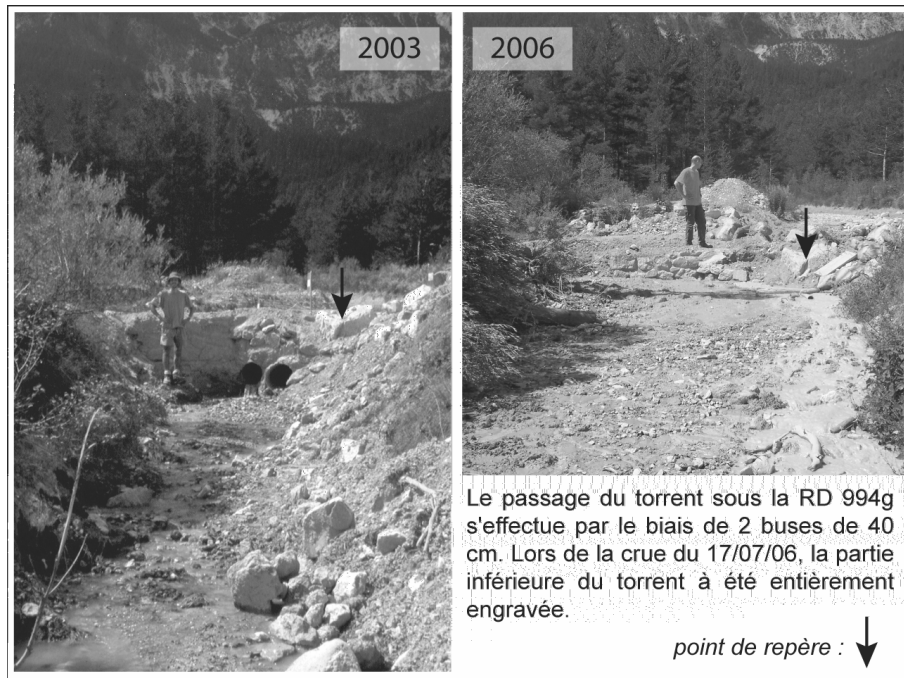


Photo. 32 : le sous-dimensionnement du franchissement de la RD 994 g

Le suivi topométrique entrepris sur plusieurs torrents de la vallée de la Clarée durant près de 5 ans, a permis de déterminer plusieurs caractéristiques de leur dynamique.

Tout d'abord, nous avons pu constater qu'à échelle fine la distinction classique entre torrents à lave et torrents à charriage est à nuancer car il a été observé une juxtaposition de ces deux modes de transport de la charge sédimentaire lors de plusieurs crues.

Par ailleurs, il est important de noter que si certains torrents ont connu plusieurs épisodes de crues au cours des 5 dernières années, d'autres torrents situés à proximité (comme le torrent des Ruines), n'ont quasiment pas évolué durant la même période. Certains des torrents les plus pentus ont eu un fonctionnement régulier depuis 2001, et l'impact de plusieurs épisodes de crues HF-BM a pu être mesuré. Pourtant, même si ces crues n'ont pas eu d'impact en terme d'endommagement, elles ont un effet morphogène important comme l'atteste les changements qui ont affectés les torrents de l'Enrouye et du Combal en particulier. De plus, l'ensemble des levés topométriques effectués sur les torrents les plus actifs tend à démontrer l'importance du lit torrentiel comme étant une source majeure de matériaux mobilisables, tout au moins lors de ces crues HF-BM.

Enfin, si les différentes crues torrentielles analysées démontrent l'efficacité de la correction torrentielle dans la réduction de l'aléa, les crues survenues le 16 juillet

2006 soulignent aussi l'importance des aménagements anthropiques dans l'émergence du risque torrentiel, en particulier à cause du sous dimensionnement des ouvrages de franchissement des axes de communication.

3.4. Le risque d'embâcle de la rivière principale

Les crues torrentielles touchent principalement les cônes de déjection qui constituent l'espace géographique du risque torrentiel. Cependant, les dépôts torrentiels lors de ces crues peuvent parfois s'étendre jusqu'au fond de vallée et atteindre la rivière principale. La possibilité de la survenue d'un embâcle de la rivière principale par des dépôts torrentiels souligne l'importance des relations torrent-rivière au sein du système fluvial.

3.4.1. L'exemple du Ravin des Sables

La crue de Ravin des Sables du 24 juillet 1995 revêt un caractère exceptionnel d'une part, à cause de ses conséquences sur la dynamique du torrent (cf. 3.3.4.), d'autre part, à cause de l'extension inattendue de ses dépôts. En effet, lors de cet événement, environ 12 000 à 15 000 m³ de matériaux ont été mobilisés (Lahousse et Romelé, 2000). La RD 994g, seule route desservant Névache, a été coupée et surtout le lobe frontal de la lave torrentielle a obstrué une large partie du lit de la Clarée. Les matériaux déposés dans le lit de la rivière ont repoussé celle-ci en rive droite (photo. 33).

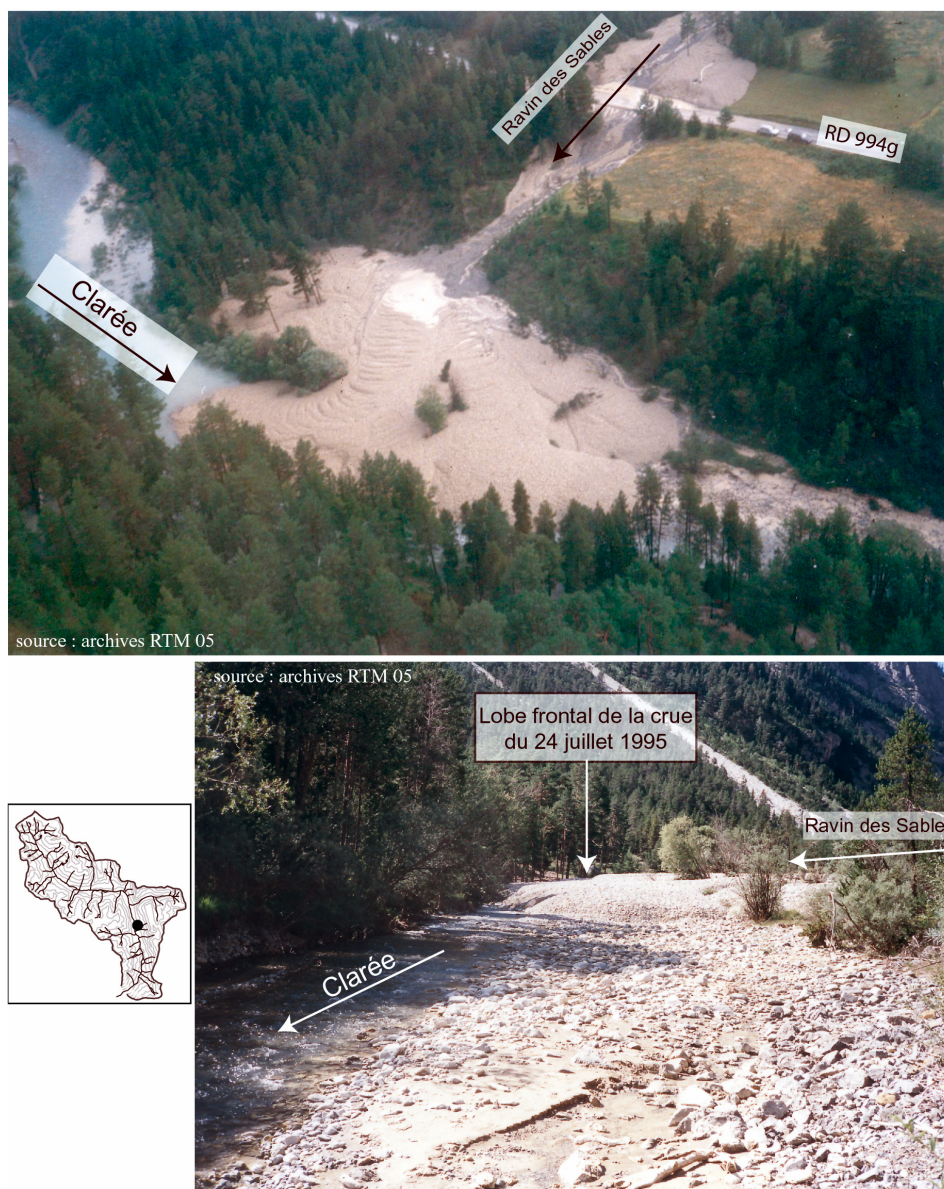


Photo. 33 : l'obstruction partielle de la Clarée par la crue du Ravin des Sables du 24 juillet 1995

En 1869, un tel phénomène avait eu lieu à la suite d'une importante avalanche à l'amont de Val-des-Prés, avec pour résultat la mise en place d' « un beau lac factice qui ne fut asséché que plus tard (...); pendant vingt-quatre heures la Clarée se trouva être à sec, vers l'aval, et on pu prendre à la main des milliers de truites » (Guillemin, 1899). Cependant, aucune archive ne rapporte la création d'un lac suite à une crue torrentielle dans la vallée de la Clarée. Si la crue du 24 juillet 1995 n'a fait que repousser la Clarée en rive droite, la possibilité qu'une vaste retenue se forme à la suite d'une crue torrentielle, élargit grandement la zone indirectement soumise à l'aléa torrentiel.

Le risque d'embâcle de la rivière principale par une crue torrentielle est connu et s'est déjà produit ailleurs dans les Alpes comme par exemple sur l'Arc en Savoie (Mougin, 1931 ; Marnézy, 1993). De fait, les zones soumises au risque de rupture d'embâcle correspondent aux basses terrasses et aux anciennes zones d'emprises de la Clarée (cf. 4.2.4.3.). Toutefois, dans le cas présent, la montée de l'eau pourrait être très rapide et ses conséquences seraient alors sans commune mesure avec celles d'une crue habituelle de la Clarée. Une telle rupture d'embâcle pourrait surprendre les nombreux campeurs installés à proximité de la Clarée (terrains de camping et campeurs « sauvages » sur les rives de la rivière).

Les effets des crues de juillet 1995 sur le morphotype du cône de déjection du Ravin des Sables, avec la chenalisation du torrent par les imposantes levées latérales, ont profondément modifié la dynamique du torrent. Lors de la crue survenue le 19 septembre 1999, les matériaux prélevés dans le lit du torrent ont été canalisés par les bourrelets et ont transité sur le cône de déjection. Bien que le volume mobilisé ait été plus faible qu'en 1995, (environ 1 500 à 2 000 m³ d'après Lahousse et Romelé, 2000), les conséquences de cette crue furent plus importantes. La Clarée fût totalement obstruée, conduisant la rivière à s'écouler sur sa basse terrasse en rive droite, quittant ainsi son lit sur près de 500 m. Ce qui entraîna l'évacuation de campeurs installés à proximité. La photographie aérienne prise quelques jours après la crue est très riche d'enseignement car elle montre l'état de la confluence avant que les travaux de terrassement en vue de rendre son cours normal à la rivière ne débutent (photo. 34). On constate que le lac formé par l'obstruction latérale n'a qu'un volume très réduit, car à cet endroit la vallée est relativement large. Cela a permis à la rivière de s'écouler en rive droite évitant ainsi le risque d'une rupture d'embâcle aux conséquences incertaines.

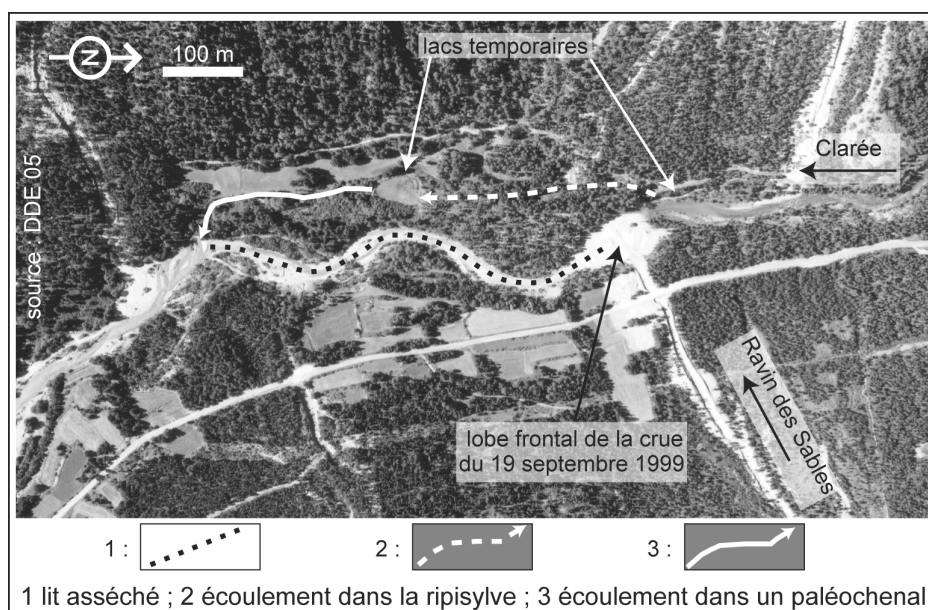


Photo. 34 : conséquences de la crue du Ravin des Sables du 19 septembre 1999

3.4.2. Le cas du Ravin de Combal

Les crues du Ravin de Combal n'ont jamais obstrué la Clarée si l'on se réfère aux archives disponibles. Néanmoins, depuis le début des années 1990, le torrent connaît une activité paroxystique régulière (3 août 1990 ; 18 juillet 1999 ; 15 octobre 2000 ; 19 août 2002 ; juin 2003 ; printemps 2004 ; 24 juin 2005). Cela a pour conséquence de faire transiter la charge sédimentaire vers l'aval (cf. 3.3.6.). Désormais les crues du Ravin de Combal déposent fréquemment leur charge jusque dans le lit de la Clarée, comme lors de la crue du 18 juillet 1999 ou celle du 24 juin 2005 durant laquelle 100 à 150 m³ de matériaux ont en partie obstrué la rivière principale (fig. 90 A et B). Or, à cet endroit, la section mouillée maximale de la Clarée est limitée par la présence en rive gauche de la RD 210 et en rive droite d'une digue protégeant le camping municipal de l'Isle du Rosier (fig. 47 C). Autrement dit, si un volume important de matériaux torrentiels était déposé par une crue du Ravin de Combal, le cours de la Clarée serait vraisemblablement repoussé en rive droite au risque d'inonder une partie du camping municipal.

La section mouillée maximale avant débordement de la Clarée, estimée à partir d'un profil en travers levé en juin 2004, est de l'ordre de 67 m² (fig. 90 C), cela signifie qu'environ 3 350 m³ de matériaux serait nécessaire pour obstruer la rivière sur une section de 50 m. Si l'on se réfère aux méthodes d'estimations du volume de matériaux susceptibles d'être mobilisés par une lave torrentielle, et nonobstant les limites inhérentes à ce type d'estimation, la valeur la plus basse est de l'ordre de 12 000 m³ (cf. 3.2.3.2.). Cela signifie qu'en cas de crue BF-HM mobilisant une large partie des matériaux disponibles, l'hypothèse d'une obstruction de la Clarée par les dépôts d'une crue du Ravin de Combal n'apparaît pas invraisemblable et devra donc être prise en compte dans la gestion du risque torrentiel dans la vallée.

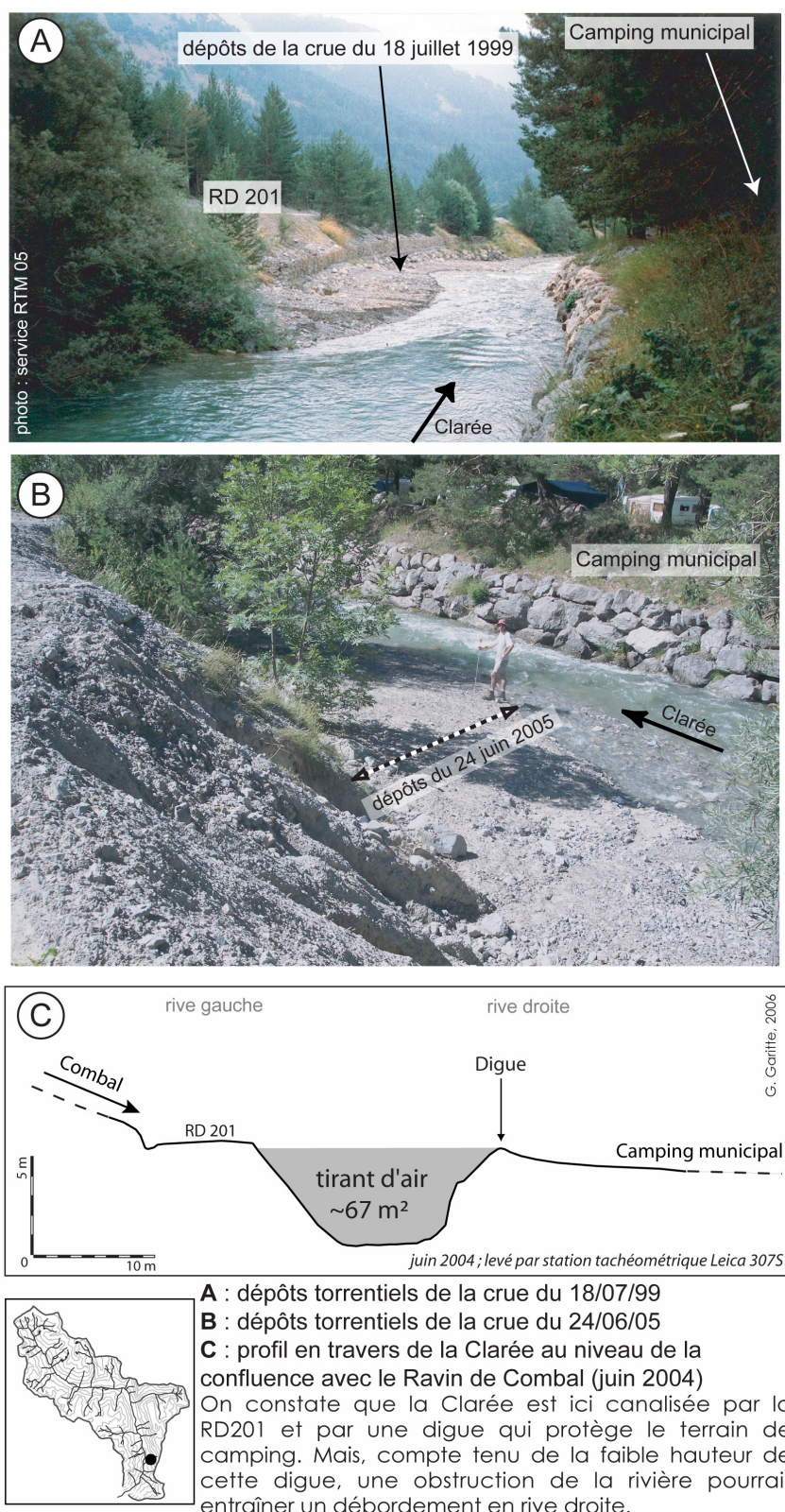


Figure 90 : le risque d'obstruction de la Clarée par le Ravin de Combal

Les cônes de déjection sont les secteurs les plus sensibles à l'aléa torrentiel, cependant, lors des épisodes de crues, les matériaux torrentiels peuvent transiter sur le cône de déjection et atteindre le fond de vallée. Cela signifie que les crues torrentielles peuvent toucher des enjeux situés en fond de vallée tels que les axes de communication mais aussi déposer les matériaux transportés dans la rivière principale. L'hypothèse d'une obstruction latérale de la rivière principale et le risque d'une rupture d'embâcle ont pour conséquence d'étendre sensiblement les zones soumises indirectement à un aléa torrentiel qui ne se limitent plus alors uniquement aux cônes de déjection.

3.5. Conclusion de la troisième partie

Le suivi des torrents de la vallée de la Clarée a permis de déterminer les principales caractéristiques de la dynamique des différents systèmes torrentiels de la vallée. Ainsi, au-delà des différences morphologiques évoquées dans la première partie, il existe une distinction au niveau de la dynamique entre les systèmes torrentiels élémentaires et les systèmes torrentiels complexes. Au cours du suivi que nous avons effectué depuis octobre 2001, nous avons constaté que certains torrents ont connu plusieurs épisodes de crues torrentielles de faible ampleur qui favorisent la mobilité de la charge sédimentaire alors que d'autres torrents, situés à proximité, n'avaient connu qu'un écoulement qui avait à peine modifié le lit torrentiel. En fait, parmi tous les facteurs qui entrent en jeu dans le déclenchement d'une crue torrentielle, les caractéristiques morphologiques du bassin-versant ont une importance non négligeable. Ce constat réaffirme la distinction qui existe entre les deux grands types de systèmes torrentiels dans la vallée de la Clarée (cf. 1.5.). Par ailleurs, alors que classiquement on distingue les torrents selon leur mode de transport dominant, les observations à échelle fine menées dans différents torrents de la vallée ont démontré que quelque soit le type de torrent, le transport de la charge sédimentaire pouvait se faire alternativement ou conjointement en conjuguant charriage et lave torrentielle.

Lorsque l'on étudie l'inventaire des crues torrentielles depuis le milieu du 20^{ème} siècle, en discriminant les torrents selon la dénivelée spécifique de leur bassin-versant

(M_{bv}), il apparaît que les torrents associés aux bassins-versants les plus abrupts sont plus largement représentés (fig. 91).

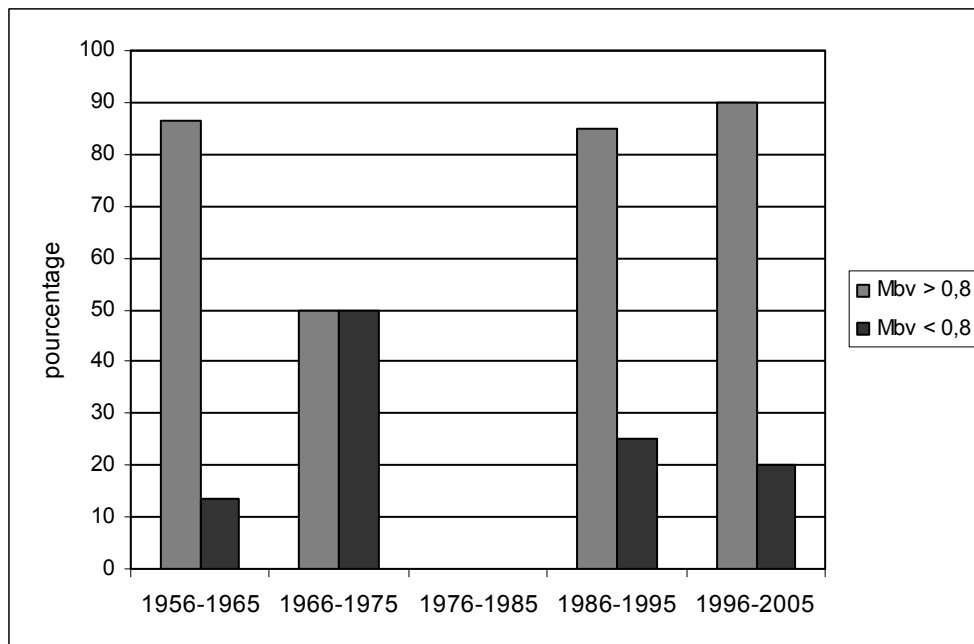


Figure 91 : répartition des crues torrentielles selon le coefficient de Melton des bassins-versants (inventaire portant sur 17 torrents⁴⁸ et 65 crues)

Ce constat est l'illustration de la plus grande sensibilité des systèmes torrentiels élémentaires ($M_{bv} > 0,8$) aux événements hydrométéorologiques. Ces organismes regroupent souvent plusieurs facteurs propices au déclenchement des crues torrentielles :

- des pentes fortes qui favorisent la concentration des eaux de ruissellement et freinent le développement de la végétation ;
- un chenal torrentiel la plupart du temps directement connecté à une source de matériaux mobilisables ;
- ces torrents ont rarement fait l'objet d'une politique de correction torrentielle qui pourrait réduire l'impact des crues.

Toutefois, la surreprésentation des torrents les plus abrupts dans le recensement des crues, et le fait que leur charge sédimentaire apparaisse très mobile ne signifient pas forcément que ces torrents doivent être considérés comme les plus dangereux. Les estimations du volume des laves torrentielles démontrent que ce sont les torrents associés à de vastes bassins-versants qui sont susceptibles de mobiliser les volumes les plus importants. En fait, il y a une réelle distinction entre des organismes qui

⁴⁸ Sur les 17 bassins-versants torrentiels étudiés, 9 ont un coefficient de Melton supérieur à 0,8 alors que pour 8 d'entre eux ce coefficient est inférieur à 0,8.

connaissent un transit régulier de leur charge sédimentaire et d'autres, moins actifs, qui conservent des stocks sédimentaires importants dans leur bassin-versant.

Il existe toutefois plusieurs points communs à l'ensemble des torrents de la vallée de la Clarée. Tout d'abord, la prééminence des précipitations orageuses comme facteur météorologique déclenchant les crues torrentielles. Ces orages peuvent avoir un large impact à l'échelle de la vallée de la Clarée. Ainsi, sur l'ensemble du recensement des crues torrentielles, il est à souligner que près de la moitié des crues recensées correspondent à des crues multiples simultanées. Au contraire, les orages sont parfois très localisés puisque lors de certaines crues torrentielles, les stations météorologiques de Névache et Briançon ne relèvent pas de précipitations significatives.

4. Approche géographique de la gestion du risque torrentiel dans la vallée de la Clarée

4.1. Introduction de la quatrième partie

Comme nous l'avons démontré, l'environnement de la vallée de la Clarée a largement changé au cours des siècles. En parallèle, la dynamique torrentielle a connu d'importantes mutations depuis la fin du PAG. Dans le même temps, l'occupation humaine a, elle aussi, évolué tant à l'échelle des Alpes⁴⁹, qu'à l'échelle de la vallée de la Clarée où la population connaît un net accroissement depuis le minimum démographique causé par l'exode rural. L'ensemble de ces évolutions, allié aux changements socio-économiques profonds de la seconde moitié du 20^{ème} siècle, a entraîné une mutation des relations nature-société. Celle-ci est particulièrement palpable à travers l'évolution des relations entre les populations locales et les torrents et de la gestion des risques torrentiels.

Face aux modifications de la mise en valeur du territoire, marquée par la progression des espaces aménagés, la délimitation des zones susceptibles d'être concernées par une crue torrentielle prend tout son sens. Toutefois, plusieurs limites réduisent la possibilité d'obtenir un zonage acceptable et fiable, au premier rang desquelles se situe l'incertitude concernant l'évolution de la dynamique torrentielle dans le contexte de réchauffement climatique global annoncé.

4.2. L'évolution de la vulnérabilité et de la gestion du risque torrentiel dans le contexte de mutation socio-économique

4.2.1. Une « urbanisation » récente des cônes de déjection

4.2.1.1. *L'évolution de l'habitat marqué par l'émergence du tourisme*

Il est possible de déterminer aisément l'emplacement des noyaux d'habitats traditionnels dans la vallée de la Clarée grâce, entre autres, à la carte de Cassini levée entre 1772 et 1777 (cf. 2.4.1.2.). On constate ainsi qu'il y a deux grands types de localisation préférentielle de l'habitat qui correspondent d'une part, aux

⁴⁹ Entre 1870 et 2000, la population des Alpes a presque doublé en passant de 7,8 à 14,3 millions d'habitants (Bätzing, 2003 cité par Deshaies, 2003)

hameaux d'estives situés en altitude à proximité des alpages –Granon, Acles, Laval– d'autre part, aux noyaux villageois situés dans la vallée et qui regroupent l'habitat permanent (fig. 92). Dans l'ensemble de la vallée de la Clarée, même si la surface plane constituée par les cônes de déjection et le fond de vallée, est réduite (de l'ordre de 9,6 km² entre Névache et La Vachette), l'habitat traditionnel n'est que rarement situé à proximité des torrents. Comme souvent dans les régions de montagne (Antoine et Desailly, 2001), les hameaux sont construits de préférence soit en bordure des cônes de déjection (Val-des-Prés, La Vachette), soit au contact entre le fond de vallée et le versant (Névache, Plampinet). Les hameaux traditionnels érigés sur des cônes de déjection sont situés à distance du torrent (Le Rosier, La Draye). En fait, chaque village constitue un site particulier composé du village, du cône de déjection et de la « plaine ». C'est naturellement en bordure de ces cônes, aux élargissements de la vallée, là où l'espace cultivable est le plus important, que les villages se sont implantés (Moutard et Wagner, 1976). Cette localisation de l'habitat traditionnel témoigne de l'intérêt des populations locales de se prémunir des différents aléas naturels courants dans la vallée de la Clarée (i.e. inondations de la Clarée, avalanches, crues torrentielles, chutes de blocs...).

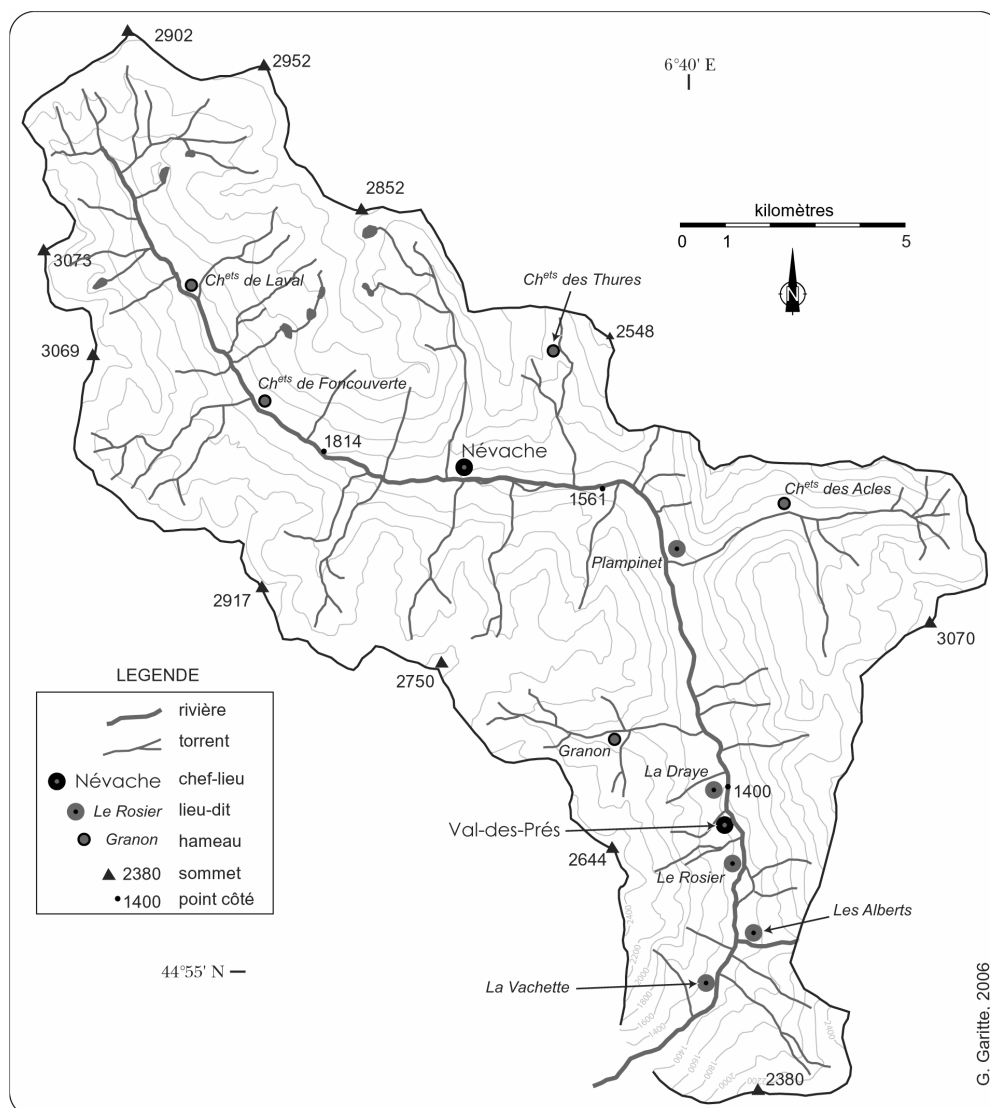


Figure 92 : localisation de l'habitat dans la vallée de la Clarée

Nombreuses sont les vallées alpines qui ont connu de considérables mutations dans la structure de leur habitat avec l'avènement du tourisme. Dans le Briançonnais les prémices du tourisme datent de la fin du 18^{ème} siècle avec l'exploitation des eaux thermales du Monêtier-les-bains (Avocat, 1979). Dans la vallée de la Clarée, la venue des premiers touristes remonte à la fin du 19^{ème} siècle. Ceux-ci sont des adeptes de l'alpinisme comme le célèbre révérend britannique W.A.B. Coolidge qui effectua les premières ascensions de nombreux sommets tels que la Pointe des Cerces et l'Aiguille Noire en 1891. A l'époque il n'existe pas d'infrastructure destinée spécialement à l'accueil des touristes. Ceux-ci peuvent néanmoins se loger chez l'habitant mais dans un confort plutôt limité (Siestrunck, 1999). Le premier hôtel de la vallée de la Clarée est inauguré en 1907 à Névache. Néanmoins les aménagements touristiques restent alors limités et leur impact sur le milieu faible.

Le tournant dans la politique locale de promotion du tourisme est symbolisé par le concours international d'aménagement de la vallée de Névache organisé en 1974 dans le cadre du Salon de l'Aménagement de la Montagne de Grenoble. Le but de ce concours était de précéder le développement de la vallée de la Clarée d'une réflexion aussi large que possible et de promouvoir un aménagement consensuel (Tane, 1995). Le schéma d'intention des maires, annexé au règlement du concours, prévoyait simultanément le percement d'un tunnel sous le col de l'Echelle, la création d'un parc naturel en haute vallée, d'une station intégrée et d'un village traditionnel. Mais aucun des projets soumis ne sera primé et les idées proposées lors de ce concours ne seront jamais concrétisées pour la plus grande satisfaction des nombreux opposants à un développement touristique de grande ampleur (Benizri, 2000). Les 6 terrains de camping de la vallée sont aménagés entre 1962 et 1987. Il faut attendre 1988 pour que soit créé l'Office du Tourisme de Névache qui devient en 1997, l'Office de Tourisme Intercommunal de la vallée de la Clarée.

Il n'y a pas eu de création de grandes infrastructures dans la vallée de la Clarée mais l'empreinte de l'activité touristique y est néanmoins très marquée, comme le prouve l'importance des résidences secondaires⁵⁰ qui représentent plus des deux tiers de l'ensemble de l'habitat en 1999 (fig. 93). Cela reste cependant plus faible que dans les communes de la vallée voisine de la Guisane qui forment la station de Serre-Chevalier, à moins de 30 kilomètres de Névache.

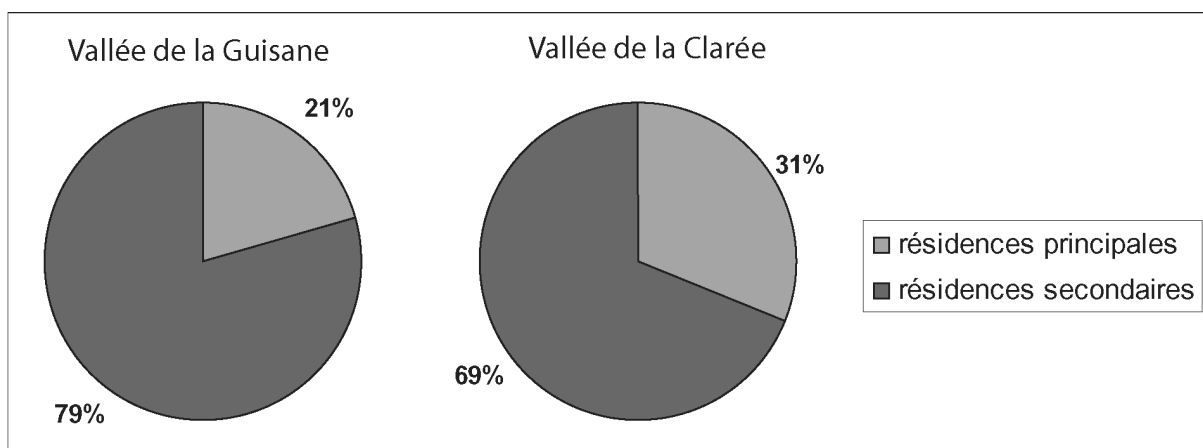


Figure 93 : part des résidences secondaires dans l'habitat des vallées de la Clarée et de la Guisane (station de Serre-Chevalier), source : I.N.S.E.E., 1999.

La capacité totale d'accueil touristique atteint, en 2005, 3 156 lits pour Névache, et 1 747 pour Val-des-Prés (Comité Départemental de Tourisme 05), alors

⁵⁰ Pour l'I.N.S.E.E. les résidences secondaires correspondent à des logements d'habitation inoccupés, utilisés pour les week-ends, les loisirs ou les vacances ; sont également classés en résidences secondaires les logements loués pour des séjours touristiques.

qu'elle s'élève à 37 838 lits pour les trois communes de la vallée de la Guisane formant la station de Serre-Chevalier (Briançon non compris).

Dans la vallée de la Clarée, l'accueil touristique est principalement constitué de résidences secondaires qui représentent 40% des lits disponibles, et de terrains de camping qui, avec une capacité de l'ordre de 1350 places, regroupent 27,5% des lits (fig. 94). Par ailleurs, bien que les municipalités tentent de limiter le phénomène, le camping sauvage est présent en particulier le long de la Clarée. Même si le nombre de personnes concernées est très difficile à quantifier, le fait que celles-ci s'installent le plus souvent dans des secteurs potentiellement dangereux n'est pas sans poser des problèmes de gestion du risque.

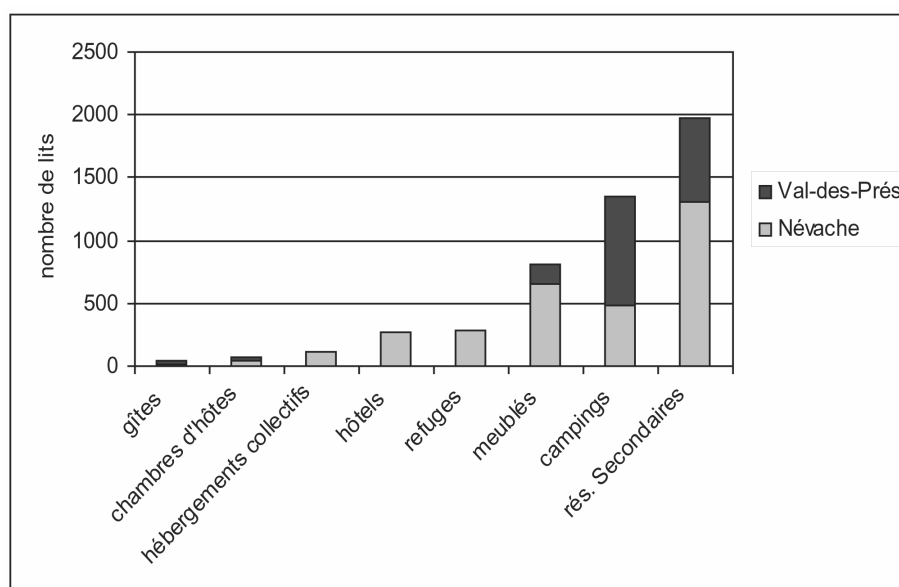


Figure 94 : structure de l'accueil touristique dans la vallée de la Clarée (source : Comité Départemental de Tourisme 05, 2005)

L'historique de l'aménagement touristique dans les vallées de la Clarée et de la Guisane révèle nettement le décalage entre, d'une part, une station de sport d'hiver qui s'est développée à partir de années 1960 avec une accélération de la construction de résidences secondaires durant la période 1975-81 dans la vallée de la Guisane et, d'autre part, la vallée de la Clarée qui est restée à l'écart des aménagements touristiques importants jusqu'en 1974. En Clarée, près de la moitié des résidences secondaires –qui constituent la première structure d'accueil des touristes– ont été construites avant 1915 (fig. 95). Ces résidences secondaires correspondent à des réhabilitations de logements anciens souvent localisés dans les noyaux villageois traditionnels, habituellement peu soumis aux risques torrentiels (Antoine et Desailly, 2001 et cf. 2.4.1.2.). Au contraire, dans la vallée de la Guisane, la majorité des résidences secondaires ont été construites depuis 1975 (fig. 96); ces logements sont situés le plus souvent en marge des noyaux villageois traditionnels et

parfois à proximité immédiate des organismes torrentiels. Ainsi, dans la station de Serre-Chevalier, certains logements récents ont été érigés dans des secteurs touchés par la crue torrentielle du 9 juillet 1981, comme par exemple, sur le cône de déjection du torrent du Verdarel (Flez et Lahousse, 2000, 2002 et 2004a).

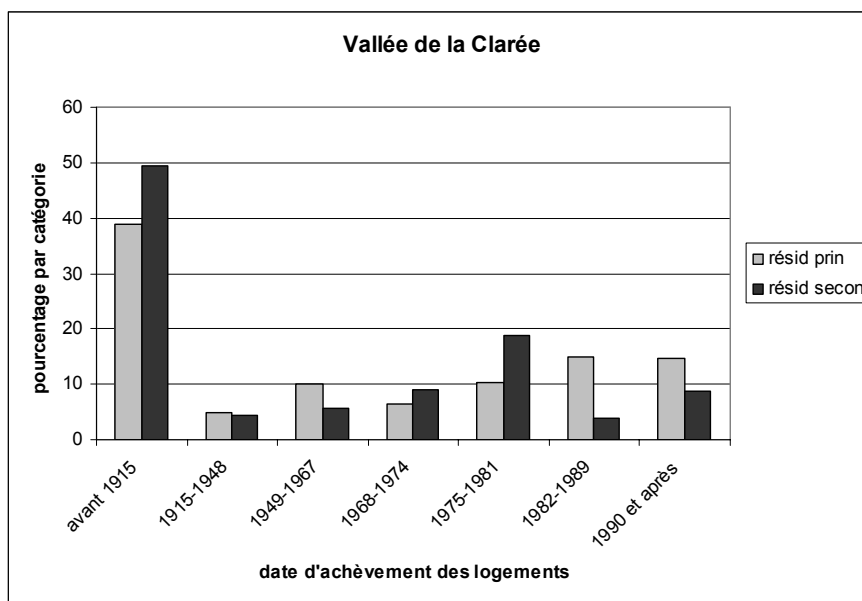


Figure 95 : date d'achèvement des résidences principales et secondaires dans la vallée de la Clarée (source : I.N.S.E.E., 1999)

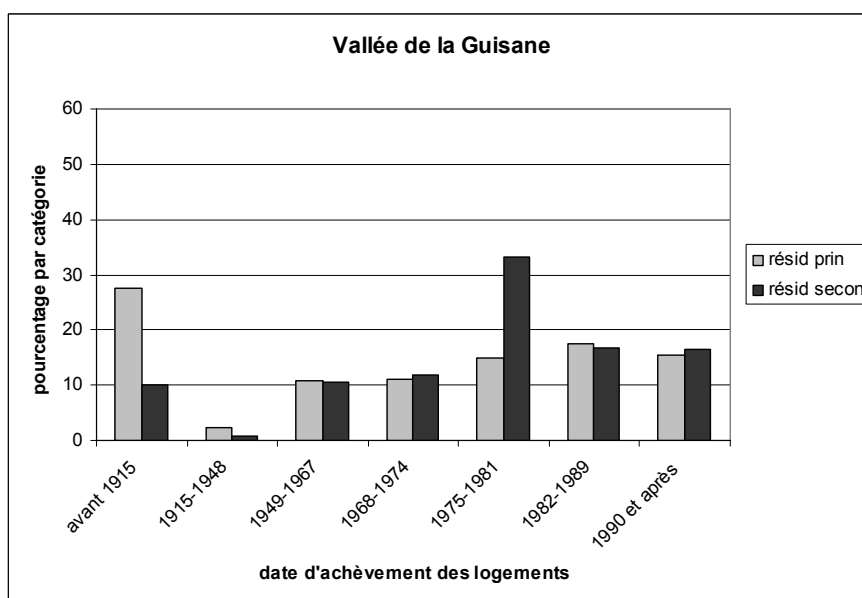


Figure 96 : date d'achèvement des résidences principales et secondaires dans la vallée de la Guisane (station de Serre-Chevalier, Briançon non compris) (source : I.N.S.E.E., 1999)

4.2.1.2. L'importance stratégique des axes de communication

→ L'importance historique des axes de communication

Les axes de communication transalpins ont depuis longtemps revêtu un caractère stratégique. Il en va ainsi des routes desservant les cols de l'Echelle et de Montgenèvre. Certains pensent effectivement que c'est par le col de Montgenèvre qu'Hannibal franchit les Alpes en 218 av. JC avant de rejoindre la plaine du Pô (Renaud, 1994). Mais, si l'on ne peut attester que les éléphants d'Hannibal aient véritablement foulé les berges de la Clarée, l'importance stratégique du col de Montgenèvre est avérée dès l'époque romaine. César y passa la première fois en 58 avant J. C. lorsqu'il fut nommé proconsul de la Gaule Cisalpine et Transalpine. Ayant soumis les tribus des montagnards, Cottius, allié de César, fit construire une route plus apte au passage des légions. La "Via Cottia per Alpem" commençait à Turin, passait par Susa (*Segusium*), Oulx (*Villa Martis*), Cesana (Gadaone ou Gaesao) et franchissait les gorges de Clavière, permettant d'arriver jusqu'à l'actuel col de Montgenèvre, où fut bâti un petit temple dédié à Janus (ce qui a donné son nom au mont Janus qui domine le col de Montgenèvre) (Meyzenq, 1984). Du col, la route qui poursuivait jusqu'à la ville de Briançon (*Brigantium*) était plus facile et aisée ; on retrouve d'ailleurs l'existence de cet important axe de communication sur la célèbre Table de Peutinger, ancêtre des cartes routières, qui est une copie d'une carte romaine datant du 4^{ème} siècle réalisée vers 1265. Mais faute d'entretien les chaussées disparurent progressivement au Moyen Age. C'est en 1802 que Bonaparte relance la construction d'une route franchissant le col de Montgenèvre afin « qu'on puisse arriver au Piémont sans être obligé de mettre pied à terre ».

→ La vulnérabilité actuelle des routes

Les deux principaux axes de communication dans la vallée de la Clarée sont : la RN 94 qui relie Briançon à l'Italie via le col de Montgenèvre, et la RD 994g, unique route desservant la vallée de la Clarée jusqu'à Névache (fig. 97). Si de nos jours plus aucun éléphant ne remonte la RN94 en direction de l'Italie via le col de Montgenèvre, ce sont d'autres poids lourds qui l'empruntent. La RN 94 supporte un trafic de poids lourds limité (4,8% pour la RN 94 et 1,6% pour la RD 994g – D.E.E. 05, 2004) mais bien réel qui peut connaître des augmentations sensibles, comme lors de la fermeture du tunnel du Fréjus suite à un incendie en juillet 2005.

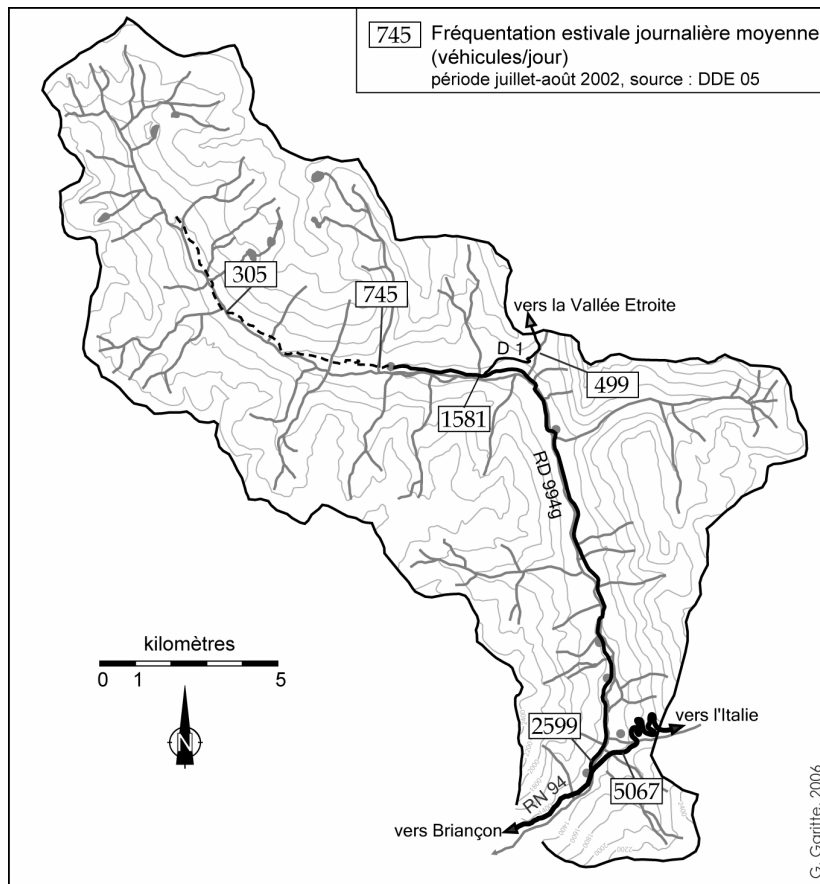


Figure 97: le trafic routier sur les différents axes de communications de la vallée de la Clarée

Or, ces routes constituent des lieux sensibles, régulièrement soumis à des épandages de dépôts torrentiels. Il ressort de l'analyse du recensement des crues torrentielles que près de la moitié des épisodes de crue ont des conséquences directes sur les axes routiers (fig. 98).

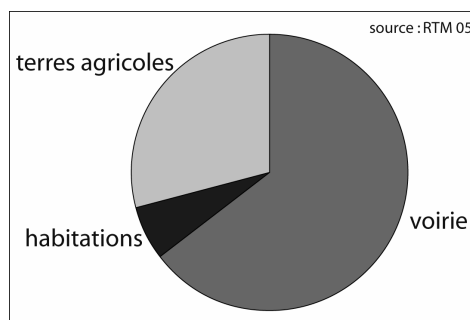


Figure 98: localisation des dégâts pour l'ensemble des crues torrentielles recensées (1437-2005) (Sources : RTM 05 et observations personnelles)

Par ailleurs, la répartition annuelle du trafic routier reste principalement liée à la fréquentation touristique. Les débits journaliers connaissent un premier pic durant les

vacances hivernales mais les maxima sont atteints durant les mois de juillet et d'août pour la RN 94 et la RD 994g (fig. 99). Cela signifie qu'il y a une concomitance entre les mois qui connaissent les trafics les plus importants et la période propice au déclenchement des crues torrentielles.

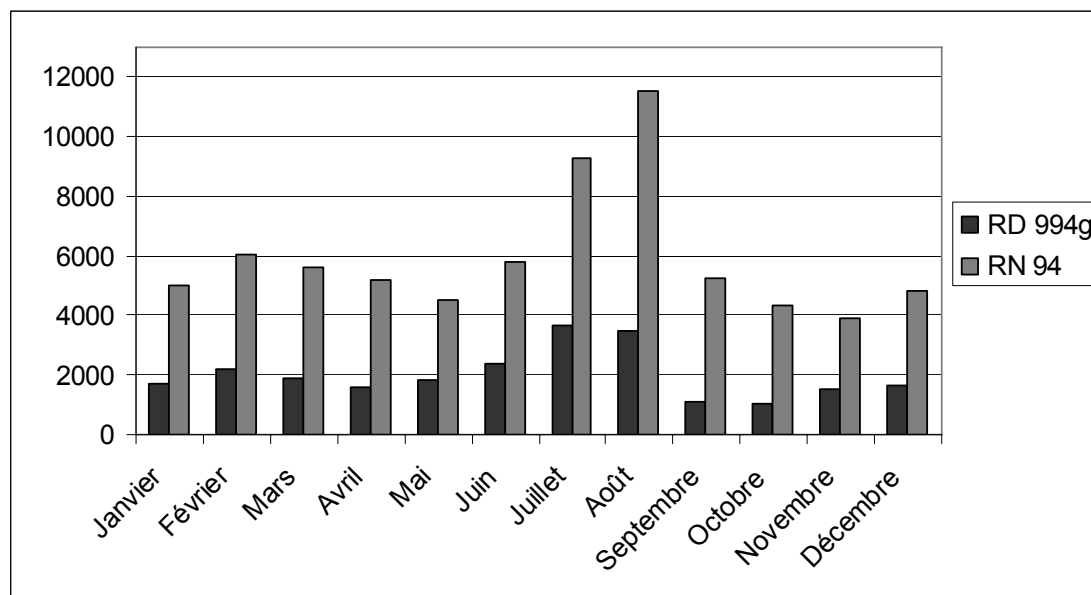


Figure 99 : débits moyens journaliers en 2004 pour la RD 994g et la RN 94
(source : D.D.E. 05)

Par ailleurs, l'analyse du recensement des crues torrentielles a mis en évidence le fait que près de la moitié des épisodes de crues torrentielles dans la vallée de la Clarée sont caractérisés par des crues multiples simultanées (cf. 3.2.2.). Il est donc probable qu'un épisode orageux intense à l'échelle de la vallée aboutisse à plusieurs coupures de route par des dépôts torrentiels. Ce paramètre est à prendre en compte dans la gestion du risque torrentiel car, en cas de crues multiples simultanées, cela rendrait d'autant plus complexe le travail des services de secours.

4.2.2. L'émergence du risque torrentiel en réponse à la mutation socio-économique de la vallée

Les données historiques sont régulièrement utilisées dans l'étude des risques naturels et en particulier dans les zones montagneuses (Lahousse, 1997 ; Barninkel et Becht, 2003 ; Barninkel, 2004 ; Carrara *et al.*, 2003 ; Petrucci et Polemio, 2003 ; Warner, 2000 ; Tropéano et Turconi, 2004).

Pourtant, si on se réfère uniquement à l'inventaire des crues torrentielles du service RTM des Hautes-Alpes qui débute en 1437 en ce qui concerne les torrents de la vallée de la Clarée, la période du PAG apparaît comme une période d'accalmie torrentielle alors que celle-ci est parfois désignée par l'appellation « *petit âge de la torrentialité* » (Bravard, 2000 cité par Liébault, 2003). En effet, sur l'ensemble de la vallée de la Clarée on ne dénombre que cinq épisodes de crues torrentielles entre 1437 et 1856 dans ce recensement (fig. 100).

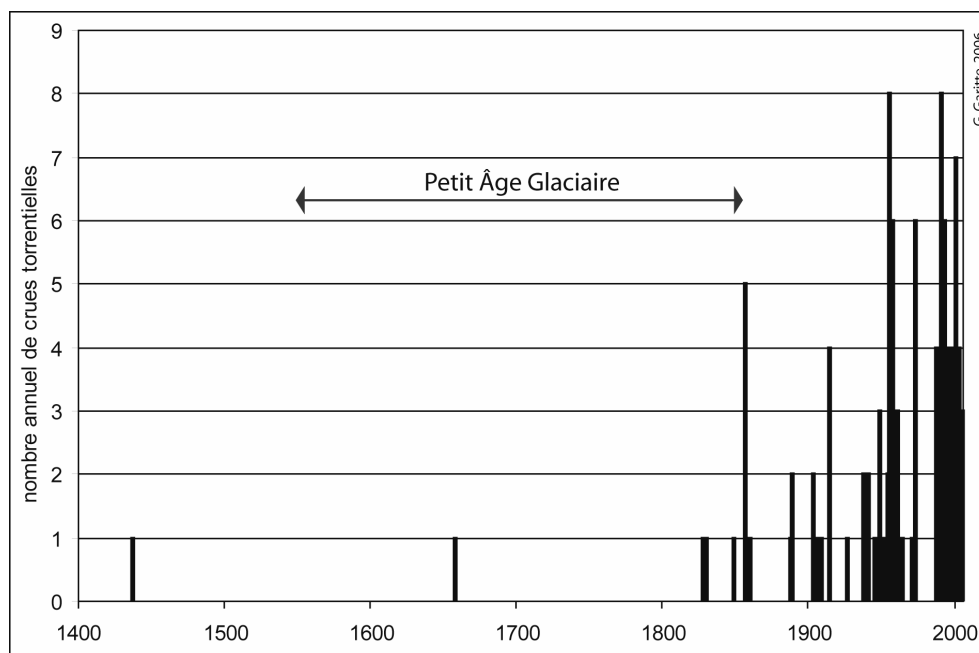


Figure 100 : les limites du recensement des crues torrentielles

Ce constat peut paraître paradoxal puisque, contrairement aux rares témoignages contemporains du PAG qui insistent sur les ravages causés par les « ruisseaux et les ravins », les crues torrentielles recensées sont rares (cf. 2.4.1.1.). Cette apparente accalmie est aussi en contradiction avec les observations chronostratigraphiques et les études effectuées dans les Alpes du sud par différents auteurs (Jorda, 1980 ; Ballandras, 1997 et 1998 ; Flez et Lahousse, 2003). Le 20^{ème} siècle, classiquement associé à une période d'abaissement de la torrentialité, est lui marqué par une recrudescence des épisodes paroxystiques recensés. Les sources historiques et le recensement des crues torrentielles en particulier, sont donc à manier avec prudence, d'autant plus pour les périodes les plus anciennes où leur manque d'exhaustivité ne fait aucun doute.

En fait, sur l'ensemble de la période concernée (1400-2005), le recensement des crues apparaît plus comme le reflet des relations entre les torrents et la société plutôt que comme un indicateur du fonctionnement paroxystique des organismes torrentiels. Le faible nombre de crues recensées avant le milieu du 20^{ème} siècle, ne désigne pas une période de faible activité torrentielle mais illustre

vraisemblablement le fait que les enjeux étaient alors plus rares à proximité des torrents. Naguère, la population de la vallée se concentrait dans les noyaux villageois traditionnels à l'écart des torrents, les cônes de déjection étaient alors principalement occupés par des parcelles agricoles. Les populations locales craignaient particulièrement les crues de la rivière principale⁵¹. Depuis les années 1970, les cônes de déjection se couvrent peu à peu de bâtiments. Aujourd'hui, la population de Névache et Val-des-Prés a plus que doublé depuis le minimum démographique atteint au recensement de 1968 (tableau 12).

Années	1901	1968	1999
Nombre d'habitants	1160	345	740

Tableau 12 : la population des communes de Névache et Val-des-Prés
source : INSEE

Même si le nombre d'habitants permanents reste aujourd'hui moins important qu'au début du 20^{ème} siècle, la forte population estivale, l'importance des axes de communication et la progression des enjeux sur les cônes de déjection peuvent expliquer que les crues torrentielles sont désormais plus présentes dans le recensement (fig. 101). Cette mutation est aussi palpable à travers l'évolution de la part respective des crues de la Clarée et des torrents. Alors que les crues de la rivière principale, la Clarée, représentaient 34% des crues recensées sur la période 1400-1969 ; leur part s'est abaissée à moins de 8% pour la période la plus récente illustrant ainsi l'émergence des crues torrentielles qui apparaissent désormais comme une préoccupation prégnante pour les communes de la vallée. Toutefois, l'évolution de la part des torrents et de la rivière dans le recensement des crues peut aussi être faussée par l'évolution des usages : jusqu'au 19^{ème} siècle de nombreuses prises d'eau dans la Clarée alimentaient des moulins, de fait, des crues de la rivière ont pu être enregistrées car ayant endommagé ces prises d'eau, alors que de nos jours ces crues n'engendreraient pas de dégâts et donc pas de recensement.

⁵¹ Certaines des crues de la Clarée ont causé de graves dégâts pour les communautés villageoises de la vallée, par exemples : le 28 mai 1437 (10 ponts détruits, une chapelle engravée jusqu'au toit et une partie des terres arables emportées), le 19 mai 1856 (un four et un moulin détruits et 7 habitations endommagées) ou le 22 juillet 1914 (tous les ponts entre La Meuille et Plampinet sont détruits, plusieurs maisons sont inondées à Névache, interventions de la troupe interrompue par l'entrée en guerre, soit l'équivalent de plus de 810 000 € de dégâts).

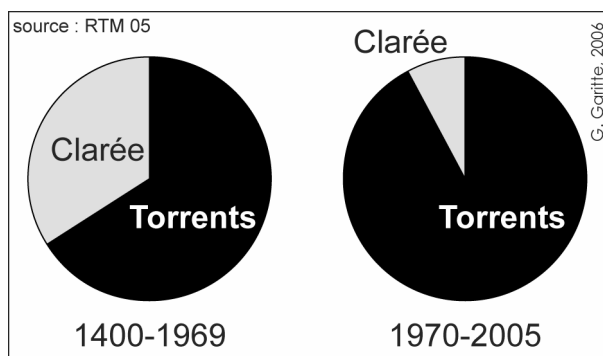


Figure 101 : part de la rivière Clarée et des torrents dans le recensement des crues

Cette modification capitale des relations entre les torrents et les populations locales est particulièrement visible à travers le changement qu'a connu la politique de gestion du risque torrentiel à partir des années 1960.

L'histoire de l'anthropisation de la vallée de la Clarée est ancienne, aujourd'hui elle reste caractérisée par l'important contraste qui existe entre de larges espaces vierges de tout aménagement et les noyaux villageois qui concentrent la majorité de l'habitat.

A l'heure actuelle, les principaux enjeux sont constitués, d'une part, des axes de communication qui sont particulièrement sensibles aux crues torrentielles, d'autre part, des noyaux villageois qui connaissent un relatif développement depuis le passage d'une économie traditionnelle à une économie tournée vers le tourisme. Or, ce développement caractérisé par la construction de nouveaux logements destinés à l'accueil des touristes occupe parfois des secteurs situés à proximité des torrents.

4.2.3. La gestion actuelle du risque torrentiel

La décennie 1960 marque un tournant dans la politique de correction torrentielle dans la vallée de la Clarée. Alors que traditionnellement les interventions avaient pour but de limiter l'impact des crues torrentielles sur les enjeux présents de longue date sur les cônes de déjection (cf. 2.4.3.), désormais les interventions du service RTM visent soit à étendre l'aménagement à des secteurs jusqu'alors vierges de toutes constructions, car soumis à un aléa torrentiel fort, soit à protéger les enjeux

nouvellement construits près des torrents. Les interventions vont alors principalement se porter sur des organismes qui ne possèdent pas de système de correction torrentielle : le torrent de Roubion à partir de 1960, le torrent de la Ruine à partir de 1963 et le torrent des Acles en 2004 (fig. 102).

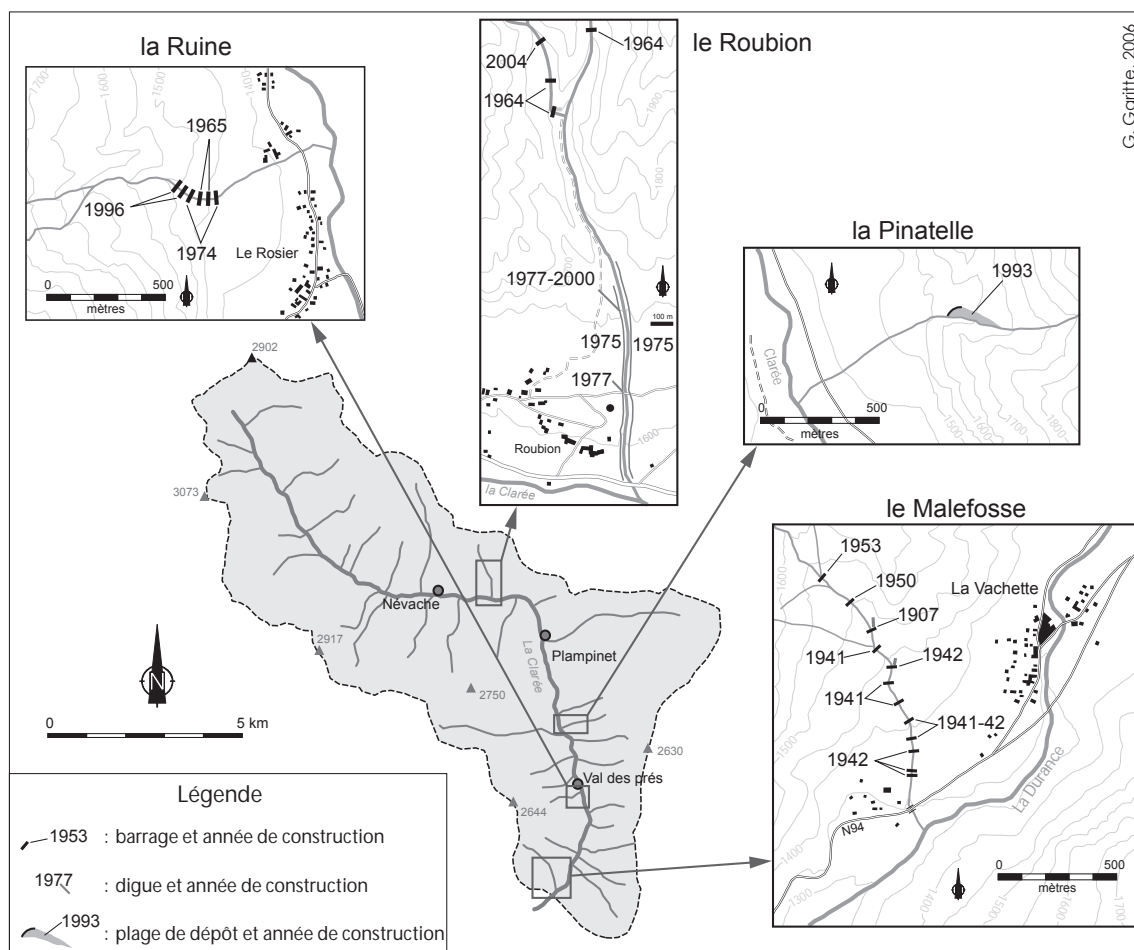


Figure 102 : les principaux ouvrages de correction torrentielle dans la vallée de la Clarée

4.2.3.1. Aperçu de la gestion du risque torrentiel dans le torrent de la Ruine

Le cône de déjection du torrent de la Ruine, situé sur la commune de Val-des-Prés, a fait l'objet d'une occupation ancienne à l'échelle de la vallée de la Clarée puisque le hameau du Rosier, situé en bordure du cône de déjection, apparaît déjà sur la carte dite de Cassini. Jusque dans les années 1960, l'extension des zones habitées se limitait au hameau traditionnel du Rosier. Mais en 1963, la construction d'un centre d'éducation est engagée en rive droite du torrent de la Ruine (fig. 103).

La même année, compte tenu de l'enjeu que constitue cet important complexe destiné à l'accueil d'enfants, une partie du bassin-versant (26,8 ha) a été acquise par le service RTM qui préconise la construction d'un barrage de sédimentation à l'apex du cône de déjection. En fait, c'est un ensemble de 6 ouvrages qui va être installé entre 1964 et 1995 dans la partie terminale du chenal d'écoulement et à l'apex du cône de déjection (photo. 35).

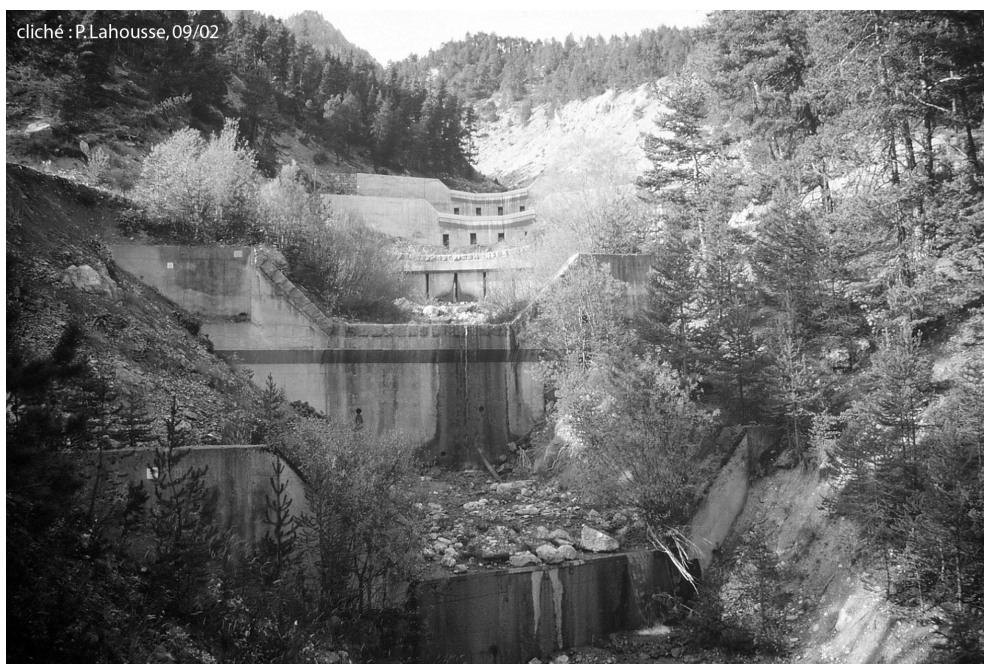


Photo. 35 : torrent de la Ruine,
barrages construits entre 1964 et 1995

Il apparaît donc que la mise en place d'un important système de correction torrentielle dans le torrent de la Ruine a été motivée par l'apparition d'enjeux nouveaux à proximité du torrent. En définitive, on remarque qu'il existe un parallèle entre les moyens financiers investis dans la construction d'un système de correction torrentielle et la progression des secteurs aménagés vers le torrent.

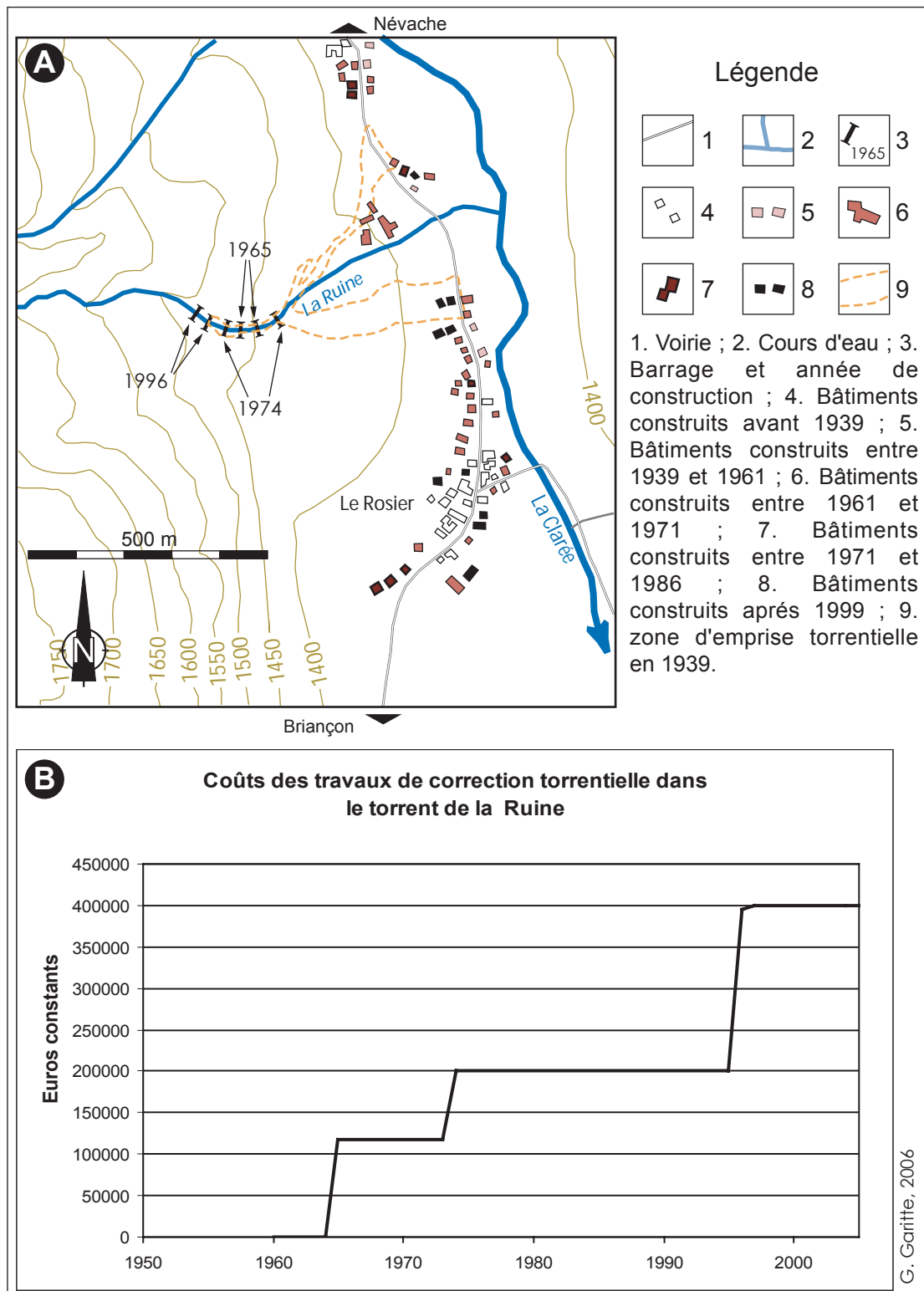


Figure 103. : torrent de la Ruine, évolution de l'aménagement du cône de déjection et du coût des travaux de correction torrentielle
(Source : R.T.M. 05)

Pourtant, le torrent de la Ruine est un organisme qui connaît des crues torrentielles régulières si l'on se réfère à l'inventaire des crues torrentielles (1964, 1973, 1990, 1993, 1995, 2003, 2006). Cela peut s'expliquer par les caractéristiques du bassin-versant et par la présence d'enjeux sur le cône de déjection : d'une part, le bassin-versant du torrent est occupé par de nombreux glissements de terrain qui se réactivent au niveau du talweg et alimentent de façon régulière le torrent en matériaux ; d'autre part, la RD 994g, qui traverse le cône de déjection est un enjeu propice au recensement de la moindre crue du torrent, d'autant plus que l'infrastructure de franchissement, simplement constituée de deux buses de faible diamètre, semble sous estimée (cf. 3.3.8.3.). Cela a pour conséquence de favoriser le débordement et le dépôt de matériaux sur la route dès que l'écoulement du torrent est chargé. C'est pour contenir les débordements réguliers de ce torrent qu'un projet de correction torrentielle va être entrepris sur le cône de déjection du torrent de la Ruine. Compte tenu de la présence d'une importante conduite d'eau au niveau de la RD 994 g qui limite les possibilités d'intervention, il a été décidé de construire une vaste infrastructure de protection passive sur le cône de déjection (fig. 104).

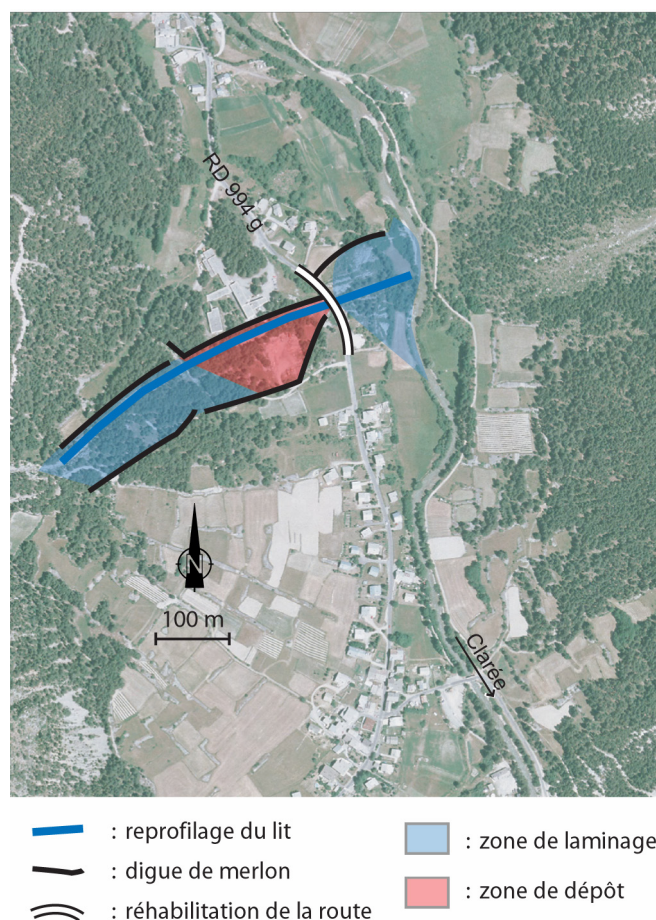


Figure 104. : le projet de correction torrentielle sur le cône de déjection du torrent de la Ruine (modifié de Koulinski, 2005 ; photo : IGN BD Ortho® 2003)

Le coût de ces travaux comprenant un recalibrage du lit, la réalisation d'une plage de dépôt et la construction d'un entonnement au niveau du franchissement de la RD 994 g, est estimé à 500 000 € (Koulinski, 2005), ce qui portera le montant total des aménagements de correction torrentielle sur le torrent de la Ruine à plus de 900 000 € depuis 1964. Il semble donc qu'il y ait un changement dans la politique de gestion du risque torrentiel par la commune et les services déconcentrés de l'État qui privilégient désormais les aménagements lourds au niveau du cône de déjection au détriment des actions de correction torrentielles dans le bassin-versant. Ces investissements élevés pourraient être un préalable pour mener plus avant la colonisation du cône de déjection.

4.2.3.2. *Aperçu de la gestion du risque torrentiel dans le torrent de Roubion*

Les premières actions d'envergure de correction torrentielle dans le torrent de Roubion débutent en 1964 avec la construction de 3 ouvrages dans le lit du torrent (2 barrages de sédimentation et un contre-barrage ; fig. 102). Malgré cela, et peut-être aussi parce que la mémoire collective se souvenait encore des crues répétitives de 1952, 1955 et 1956, le cône de déjection du Roubion a pendant longtemps échappé à l'urbanisation. En fait, c'est la chenalisation du torrent par des digues en 1975 et 1977 qui va véritablement donner le départ à la colonisation du cône de déjection par l'habitat (fig. 105). Celui-ci porte aujourd'hui une trentaine de bâtiments, dont un centre de vacances pour enfants.

Pour une commune rurale comme celle de Névache, le coût de la protection contre les débordements torrentiels est beaucoup trop élevé pour qu'elle puisse seule le prendre en charge. Le projet d'implantation d'un centre de vacances pour les enfants de la commune de Vitrolles dans les années 1970 était donc l'occasion d'attirer des fonds extérieurs, permettant la mise en sécurité des terrains situés sur le cône de déjection du Roubion. En 1975, la municipalité de Vitrolles a ainsi contribué à l'endiguement du torrent, pour un montant de 100 000 francs, soit un peu plus de 62 000 € (monnaie constante 2001) (fig. 105). Sans ce soutien financier, la colonisation du cône de déjection n'aurait peut-être pas encore débuté.

Parce qu'il représente une étendue considérable à proximité de Névache, le cône de déjection du Roubion est devenu un espace fortement convoité. Et ce ne sont pas les crues de 1987, 1998 et 2000 qui vont remettre en cause cet état de fait. Bien au contraire, les digues ayant à cette occasion pleinement joué leur rôle, ces événements ont plutôt rassuré la population sur l'efficacité du dispositif de

protection. Ils confortent en cela la commune dans sa politique de développement de la capacité d'accueil en direction du torrent du Roubion.

Avec l'augmentation de sa capacité d'hébergement, la commune de Névache dispose maintenant de revenus qui lui permettent de participer à l'amélioration des aménagements déjà en place. En 2000, une digue a ainsi été implantée à l'amont du cône de déjection pour un montant de 45 805 €, dont 30% ont été financés par la municipalité, le reste ayant été pris en charge par l'Etat. Il s'agit là d'un véritable investissement, car l'objectif est de préserver la constructibilité d'un cône qui, en raison de son étendue et de sa proximité par rapport au noyau villageois, est aujourd'hui devenu un espace privilégié pour le développement de la commune de Névache. C'est cela qui a motivé la construction d'un nouvel ouvrage dans la branche de rive droite du torrent qui demeure particulièrement active (cf. 3.3.8.2.). Erigé en 2004, le coût de ce barrage s'élève à près de 179 000 €.

Il apparaît donc que, contrairement à ce qui a été observé pour le torrent de la Ruine, la mise en place d'un système de correction torrentielle dans le bassin versant du torrent de Roubion a précédé l'installation d'enjeux sur son cône de déjection. Mais la présence d'infrastructures sensibles sur ce cône de déjection (*i.e.* plusieurs hôtels, une école, un centre de vacances, une gendarmerie) implique que désormais l'ensemble du système de correction soit régulièrement entretenu et que l'on veille à surveiller l'état de charge du lit du torrent pour, le cas échéant, procéder à un curage, afin de préserver l'efficacité des digues actuellement en place.

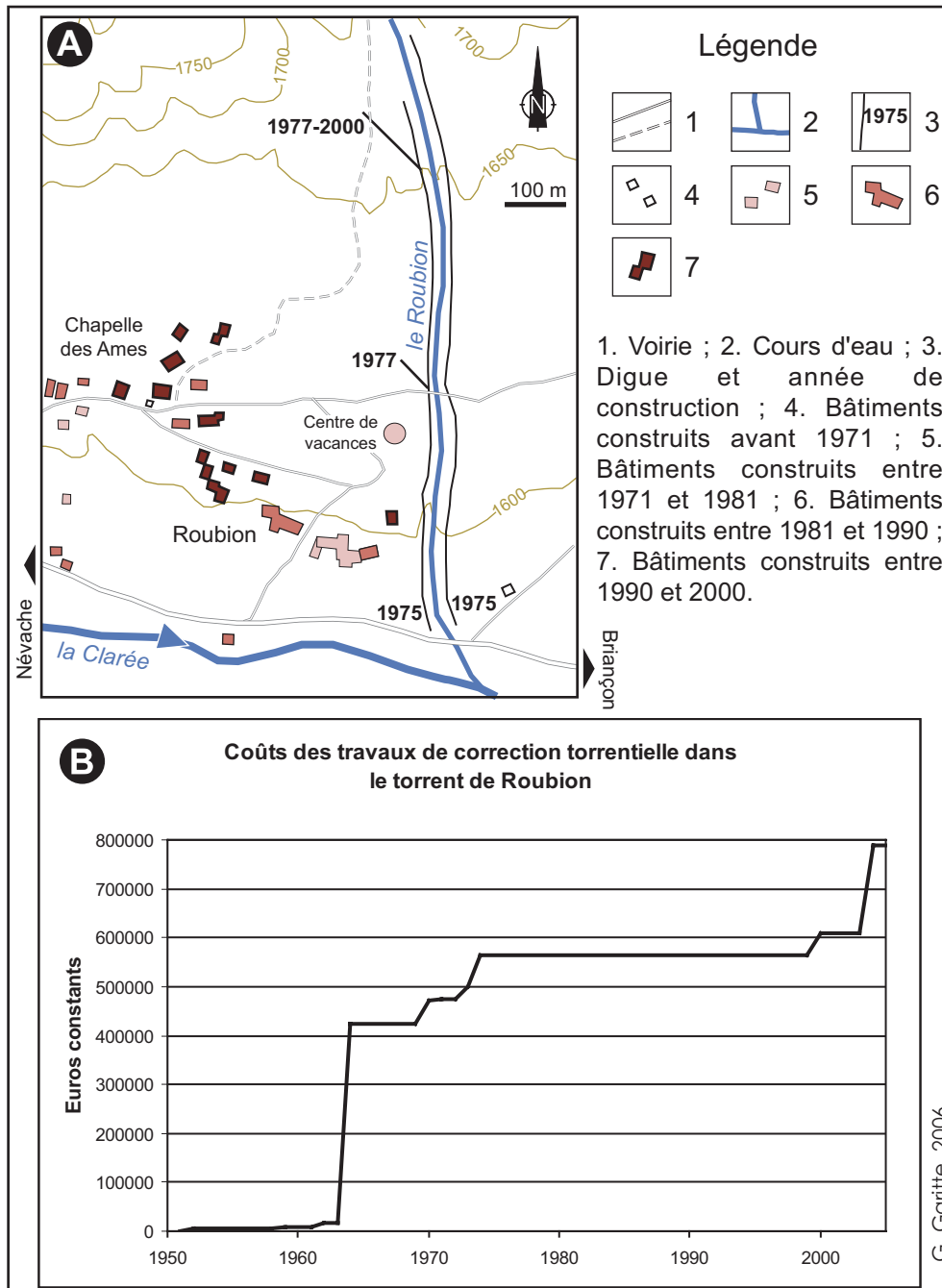


Figure 105 : Torrent de Roubion : évolution de l'aménagement du cône de déjection et du coût des travaux de correction torrentielle
(Source : R.T.M. 05)

4.2.3.3. *Le curage des lits torrentiels comme mode de gestion du risque torrentiel*

❖ Le cas du torrent de Malefosse

Le lit du torrent de Malefosse a été curé de façon ponctuelle dans le passé comme par exemple à la suite de la crue du 20 juin 1993⁵² ; et bien que ce torrent ait fait l'objet d'une importante correction torrentielle, avec la construction de digues et de 12 barrages de sédimentation, il demeure une source d'inquiétude. C'est pourquoi le service RTM a décidé de procéder au curage d'une partie de sa charge sédimentaire pour limiter l'impact des crues torrentielles en proposant une concession à une entreprise du secteur du bâtiment travaux publics (photo. 36).

Compte tenu de la loi de 1992, dite loi sur l'eau, l'extraction de matériaux dans un cours d'eau, assimilé à une carrière, est réglementée⁵³. Cela nécessite une procédure administrative relativement longue. Dans le dossier soumis à enquête publique, l'estimation du volume de matériaux à extraire est de 12 600 m³, pour une autorisation d'exploitation fixée à 5 ans, avec la possibilité d'une prolongation pour 30 ans.



Photo. 36 : le curage du lit du torrent de Malefosse

L'opportunité de faire procéder à un curage par une entreprise de Travaux Publics permet de réduire la charge disponible à moindre coût puisque que c'est à l'entreprise qui détient la concession que reviennent les frais d'extraction. Pourtant,

⁵² Suite à cette crue la RN94 a été coupée pendant 4 heures et le chenal a été comblé sur plus de 500 m dans la partie aval du cône de déjection. Le coût des travaux de curage s'est élevé à 100 000 FF, soit 17 000 € (source : RTM 05).

⁵³ Selon l'article 10 de la loi n° 92-3 du 3 janvier 1992, sont, en autres, réglementées toutes les activités entraînant « une modification du niveau ou du mode d'écoulement des eaux ».

ce mode de gestion du risque torrentiel n'est pas généralisable à tous les organismes torrentiels de la vallée de la Clarée car il est nécessaire que les matériaux qui constituent le lit torrentiel soient de « bonne qualité », c'est-à-dire susceptibles d'être exploitables par l'industrie du bâtiment, ce qui exclut les bassins-versants riches en gypse ou en dolomite.

❖ Le cas du Ravin des Sables

Depuis la crue du Ravin des Sables en juillet 1995 (cf. 3.4.1.), les services de la D.D.E. en charge de la route départementale 994g desservant Névache sont intervenus à plusieurs reprises dans le lit du torrent dans le but de limiter les conséquences de ses crues. Leurs interventions ont consisté, d'une part, à curer et reprofiler le lit du torrent afin d'éviter que les matériaux présents dans le lit, juste à l'aval de la route, ne soit mobilisés par la prochaine crue ; d'autre part, à construire une digue au niveau de la confluence avec la Clarée pour limiter le risque d'embâcle (fig. 106). Il faudra néanmoins attendre la prochaine crue pour vérifier l'efficacité de cette digue.

Il convient de s'interroger sur l'utilité d'un curage du lit du torrent qui ne fait que renforcer la chenalisation consécutive à la crue de 1995 (cf. 3.4.1.). Désormais le Ravin des Sables est susceptible de faire transiter sa charge sédimentaire tout au long de son cône de déjection, ce qui augmente de fait le risque d'embâcle de la Clarée. Au contraire, il serait plus efficace pour protéger la RD 994g et limiter le risque d'embâcle, de favoriser l'épandage de la charge sédimentaire sur le cône de déjection où celle-ci pourrait aisément être peignée par la végétation tout au moins durant les crues HF-BM.

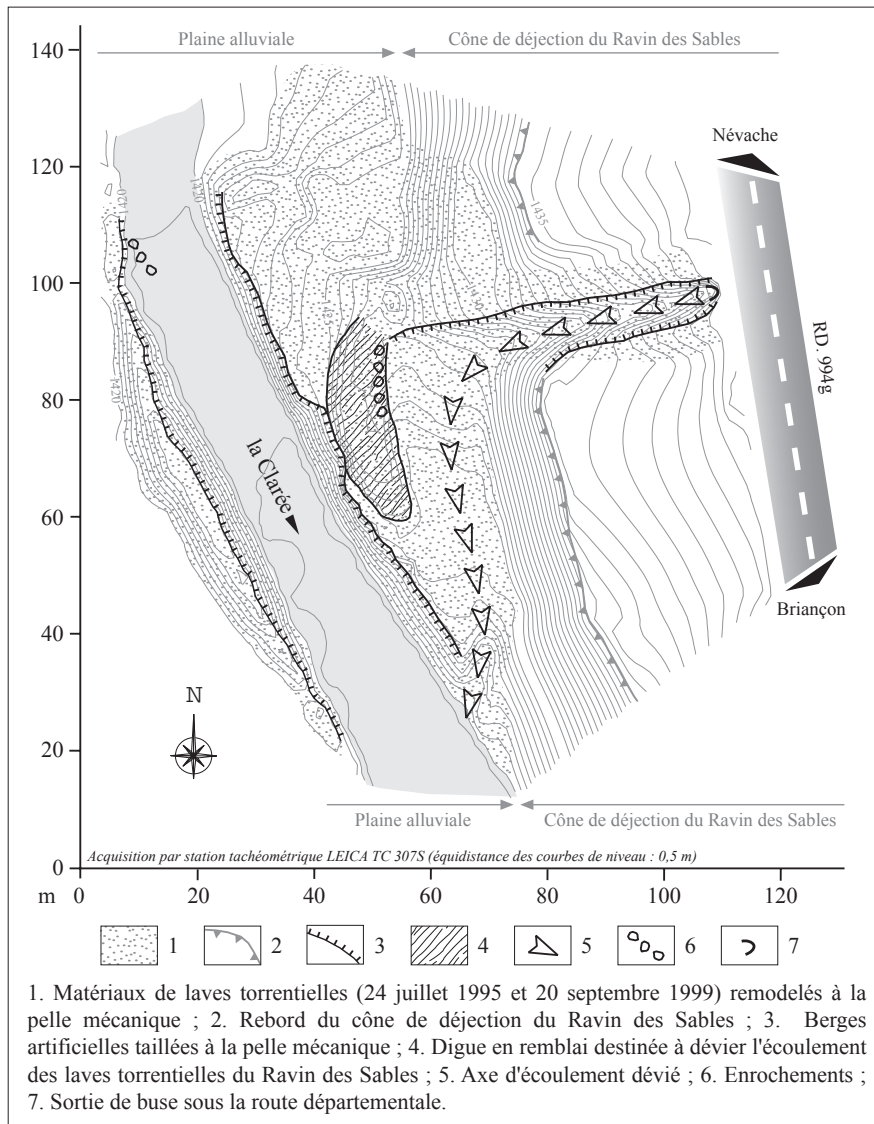


Figure 106 : l'aménagement de la confluence Ravin des Sables - Clarée suite aux crues de 1995 et 1999 (d'après Lahousse et al., 2002)

❖ Le cas du Ravin de l'Enrouye

Le Ravin de l'Enrouye a lui aussi fait l'objet d'un curage dans la partie inférieure de son chenal suite à une crue au printemps 2005 qui avait coupé une piste utilisée aussi pour le ski de fond. Le but de cette extraction, réalisée par la municipalité, était de favoriser l'étalement des apports torrentiels en amont de la piste. Cependant, cette intervention visant à limiter la menace d'épandage sur la piste s'est avérée inutile voire néfaste. La déstabilisation du lit torrentiel suite à ce curage a entraîné un processus d'érosion régressive qui contribue à remobiliser facilement quantités de

matériaux qui, jusqu'alors, étaient stockées dans le lit même du torrent (fig. 107). De fait, les crues du Ravin de l'Enrouye du 24 juin 2005 et du 16 juillet 2006 ont de nouveau coupé la route forestière en déposant en tout 800 à 1 000 m³ de matériaux dans la partie supérieure de son cône de déjection.

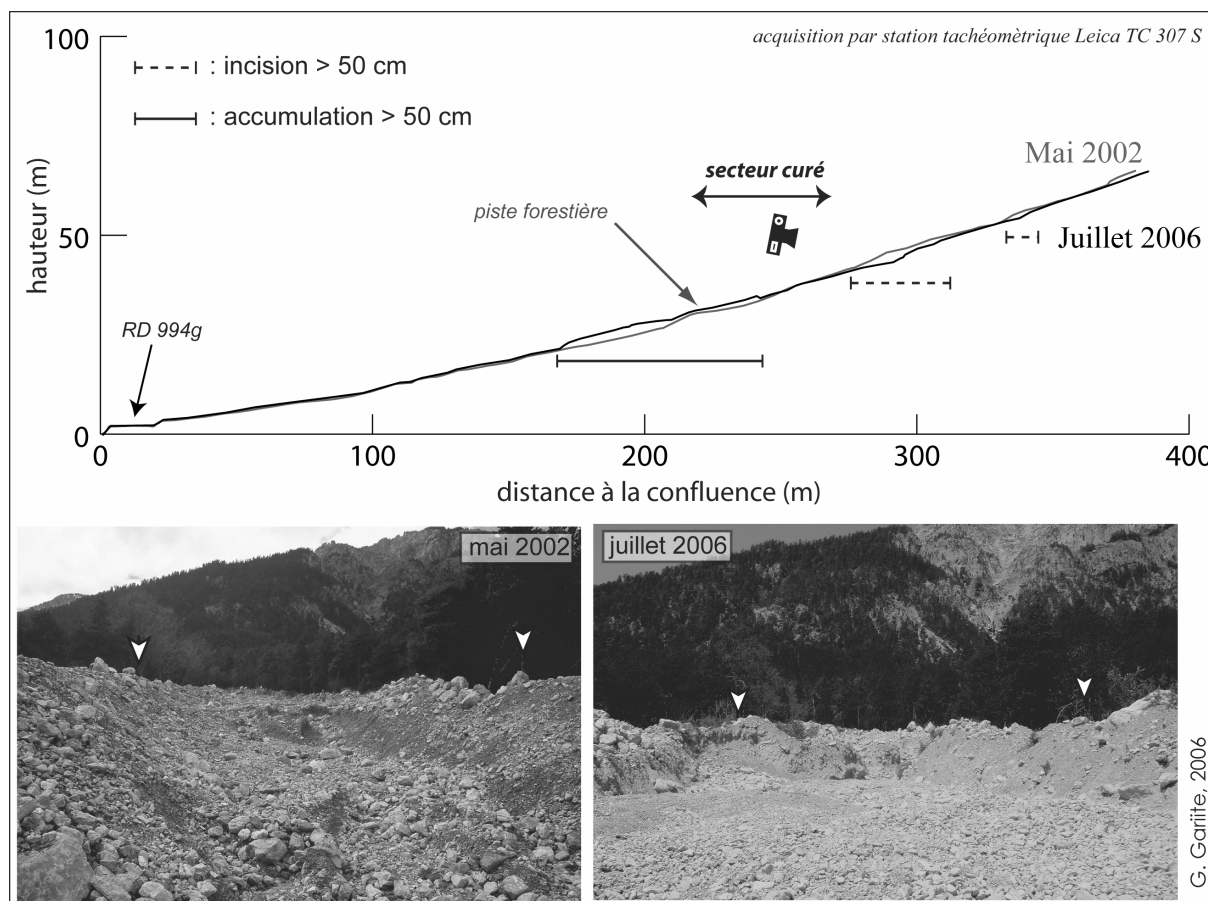


Figure 107 : l'évolution du chenal du Ravin de l'Enrouye suite au curage d'une partie du lit

Le curage des lits torrentiels peut donc prendre différentes formes. Il peut s'agir d'actions limitées visant à reprofiler localement le lit torrentiel ou alors d'actions à plus vastes échelles spatiale et temporelle dont le but est de réduire durablement la charge grossière mobilisable dans le lit. Toutefois, si à l'heure actuelle l'extraction de matériaux dans le lit des torrents apparaît ponctuel à l'échelle de la vallée de la Clarée, sa généralisation ne serait pas sans inconvénients. En effet, malgré les avantages qu'offre ce mode de gestion du risque torrentiel, il a été démontré que le prélèvement de granulats dans les rivières alpines et leurs affluents, pouvait entraîner une incision de la rivière principale suite à la réduction des apports sédimentaires (Peiry *et al.*, 1994 ; Piégay et Peiry 1997 ; Marston *et al.*, 2003 ; Rinaldi *et al.*, 2005 ; Rovira *et al.*, 2005). Les conséquences à moyen terme de l'extraction massive de

granulats dans les cours d'eau peuvent s'avérer néfastes tant du point de vue écologique qu'économique. Les études menées dans la Drôme ont mis en évidence les différents effets de l'incision de la rivière principale (Landon *et al.*, 1998). Ceux-ci entraînent à la fois une déstabilisation des ouvrages de génie civil comme les ponts ou les digues, une augmentation de la pente du chenal ce qui accroît la capacité d'érosion, voire un abaissement de la nappe phréatique superficielle avec des conséquences notables en terme de gestion de l'eau.

La gestion du risque torrentiel dans la vallée de la Clarée a été marquée par différentes phases et désormais les interventions visent principalement à protéger des secteurs qui font l'objet d'importants aménagements. Ainsi, la mise en place de systèmes de correction torrentielle fait parfois suite à l'implantation de nouveaux enjeux à proximité des torrents. Dans la plupart des cas, il semble y avoir un désir de la part des acteurs locaux (mairies, services de la DDE, du RTM) de contrôler les torrents pour en limiter les impacts sur les cônes de déjection et en fond de vallée. Cette nouvelle orientation qui délaisse la correction dans les bassins-versants au profit de la réalisation de vastes projets de défense passive au niveau des cônes de déjection est parfaitement illustrée par l'exemple du torrent de la Ruine. Cela va à l'encontre des politiques actuelles de gestion du risque d'inondation qui prônent la limitation des mesures structurelles et la gestion raisonnée des territoires afin de réduire les coûts (investissements, entretiens) et de favoriser les équilibres naturels (Gilard, 1998 ; Hayes, 2004).

L'endiguement et la chenalisation des torrents sur leur cône de déjection en modifient le fonctionnement. Il existe en effet un équilibre dynamique entre d'un côté le rapport flux liquides/flux solides et d'un autre côté le comportement du torrent. La largeur de la bande active torrentielle et son évolution sont le fruit de cet équilibre qui évolue. En limitant drastiquement la largeur de la bande active torrentielle on réduit de fait la possibilité de divagation et d'épandage sur le cône ce qui favorise le transit vers le fond de vallée et la rivière principale.

4.2.4. Les conséquences cyndiniques de l'évolution des bandes actives

4.2.4.1. *Ajustement morphologique des torrents et recensement des crues torrentielles*

Il est important de noter que la rétraction des bandes actives torrentielles, qui peut être interprétée comme une phase de relaxation de l'activité torrentielle après la crise morphodynamique du PAG, ne signifie pas une « extinction » des torrents sous-entendant un arrêt de leur fonctionnement paroxystique. En effet, même si le recensement des crues torrentielles n'est pas exhaustif et que les données anté-1950 ne sont pas le reflet exact de l'activité des torrents⁵⁴, on constate que les torrents de la vallée de la Clarée ont toujours eu une activité paroxystique durant le 20^{ème} siècle. On observe alors un apparent paradoxe entre la contraction des bandes actives torrentielles qui fait suite au tarissement du transit sédimentaire et un fonctionnement paroxystique régulier (fig. 108). Il semble en fait que la période post-PAG soit marquée par une modification de la dynamique torrentielle dans la vallée de la Clarée marquée par une réduction du transit sédimentaire global mais pas du fonctionnement paroxystiques des torrents. Les changements environnementaux ont peu à peu conduit à limiter le volume sédimentaire mobilisé régulièrement par les torrents (cf. 2.4.4.). Cependant, la forte énergie du relief qui caractérise les bassins-versants torrentiels de la vallée de la Clarée, contribue à la survenue de crues lors des épisodes orageux.

La contraction des bandes actives torrentielles, qui apparaît comme une tendance séculaire, peut donc être ponctuellement contrariée lors des crues torrentielles (cf. 2.5.3.). Cette dichotomie qui caractérise des torrents qui paraissent peu actifs tout en restant susceptibles de générer des crues destructrices, ne sera pas sans conséquence en terme de perception de l'aléa torrentiel.

⁵⁴ Le recensement des crues torrentielles est biaisé par l'évolution des enjeux qui peut induire une sous-représentation des crues torrentielles pour la période la plus ancienne (cf. 3.2.2.1.).

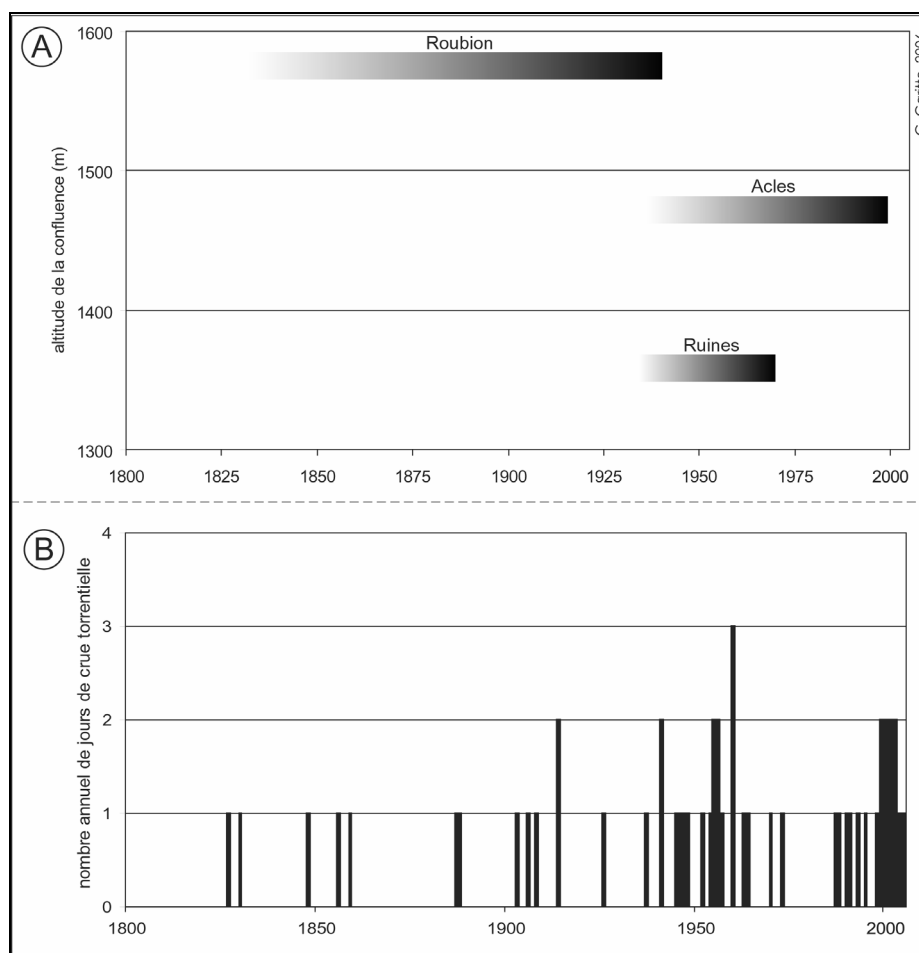


Figure 108 : comparaison entre ajustement morphologique des torrents et recensement des crues torrentielles

A : les différents rythmes de rétractions des bandes actives torrentielles

B : les crues torrentielles recensées en vallée de la Clarée

(source : RTM 05 et observations personnelles)

4.2.4.2. L'exemple du torrent des Acles

Situé sur la commune de Névache, le hameau de Plampinet est caractérisé par un habitat traditionnel longtemps resté implanté à distance respectable du torrent des Acles (fig. 109). Il faut dire que cet organisme a su préserver, pendant une bonne partie du 20^{ème} siècle, une large bande active sur son cône de déjection, entretenant du même coup l'image d'un torrent dangereux. Mais à partir des années 1980, le processus de réduction de l'emprise torrentielle s'engage plus nettement (cf. 2.3.2.2.). Il s'accompagne d'une extension du noyau villageois sur le cône de déjection des Acles qui va aboutir à la construction d'une habitation dans une zone délaissée par le torrent il n'y a guère plus d'un demi-siècle (fig. 109).

Certes, on est loin ici des enjeux présents dans une vallée très urbanisée comme celle de la Guisane (cf. 4.2.1.1.). Mais, cet exemple a l'avantage de montrer que la reconversion vers l'économie touristique n'est pas l'unique responsable de l'urbanisation des cônes de déjection. En renvoyant une image plus rassurante qu'auparavant, l'assagissement apparent des torrents contribue en fait à réduire la vigilance des communautés locales, vis-à-vis d'un milieu naturel pourtant toujours aussi contraignant.

La crue du torrent des Acles du 15 octobre 2000 est le dernier exemple en date illustrant la conséquence cindynique de la colonisation des cônes de déjection dans la vallée de la Clarée (Thénard et Garitte, 2005). Heureusement, la vulnérabilité du site est ici encore modeste. Mais l'engravement des terrains situés à proximité de la dernière maison construite (fig. 109) suffit à démontrer une nouvelle fois que l'anthropisation d'un cône de déjection ne peut dorénavant se passer d'une réflexion sur le fonctionnement des organismes torrentiels en tenant compte de leur évolution récente.

La prise de conscience et l'émoi suscités par la crue du 15 octobre 2000 ont abouti en 2004 à la mise en place de mesures de protection passive sur le cône de déjection dans le but de protéger la maison située à proximité du torrent. Le coût des travaux effectués sous la forme d'une imposante digue (2 100 m³ de terrassement et 365 m³ de maçonnerie) (photo. 37) s'est élevé à 64 600 €. Cette somme peut paraître importante lorsqu'il s'agit de sécuriser une seule habitation qui fut construite dans un secteur que l'on aurait pu considérer comme dangereux, car emprunté occasionnellement par le torrent des Acles il y a encore 60 ans.

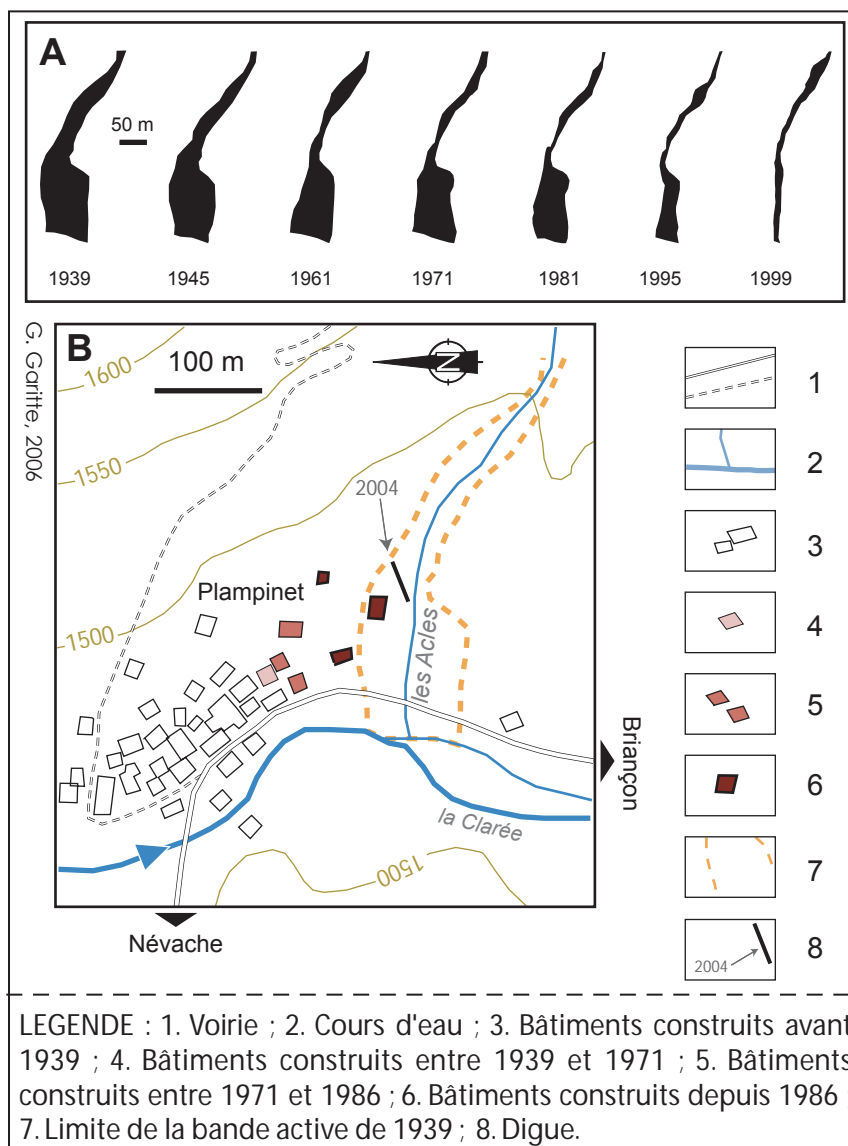


Figure 109 : conséquences cyndiniques de l'évolution du torrent des Acles,
 A : évolution de la bande active
 B : évolution l'habitat sur le cône de déjection
 (Modifié de Lahousse et al., 2005)



Photo. 37 : la digue de protection érigée en 2004 en rive droite du torrent des Acles (photographies, juillet 2005)

4.2.4.3. L'exemple de l'Isle du Rosier

Les organismes torrentiels sont des éléments à part entière des systèmes fluviaux de montagnes. A ce titre, ils sont en interaction directe avec la rivière principale de fond de vallée. Par exemple le niveau de base local représenté par la rivière principale a un effet direct sur l'incision des drains élémentaires dans leur cône de déjection (Friedman *et al.*, 1996). Inversement, les matériaux apportés par les torrents vont avoir des conséquences sur la morphologie de la rivière principale (Benda, 1990 ; Marston *et al.*, 1997 ; Cenderelli et Kite, 1998 ; Benda *et al.*, 2003). Ainsi, les phénomènes de rétraction de la bande active observés sur les torrents vont avoir une incidence sur la rivière principale. De fait, la Clarée a connu elle aussi une

métamorphose de son style fluvial et une évolution sensible de sa bande active caractérisée par l'incision et la contraction de sa bande active en réponse au tarissement des apports sédimentaires, dont la majeure partie provient des cours affluents que sont les torrents, et aux actions anthropiques (endiguements ponctuels) (Bravard et Peiry, 1993 ; Piégay *et al.*, 2000 ; Bravard, 2002 ; Thénard, 2002 ; cf. 2.4.4.1.).

Ce constat met en relief la nécessité d'analyser aussi le phénomène torrentiel dans sa globalité c'est-à-dire à l'échelle de la vallée. Il s'agit de tenir compte à la fois des conséquences de l'ajustement morphologique des torrents sur la rétraction de la rivière principale mais aussi des effets directs des torrents sur la rivière lors des crues, avec la probabilité d'une obstruction plus ou moins totale du cours de la Clarée (cf. 3.4.).

Dans le langage vernaculaire, le terme *isclé* correspond à île et se rapporte à des formes de sédimentation, des bancs de galets qui encombrant une rivière au style fluvial en tresses (Miramont *et al.*, 1998). Cette morphologie qui caractérise une large zone comportant des bancs plus ou moins mobiles, est bien visible sur l'extrait de la carte de Cassini (fig. 110). Le secteur de l'Isclé du Rosier comporte alors de nombreux chenaux et le figuré apposé sur la carte rappelle celui des zones humides. Sur le document de 1927, ce secteur est désormais au sec mais la présence d'une couverture forestière dans un espace propice à l'agriculture signifie que, comme dans le cas des bandes active torrentielles (cf. 2.3.), la zone a été colonisée par la végétation suite à la contraction du lit de la rivière. Sur le document le plus récent l'Isclé du Rosier apparaît, comme en 1927, sous la forme d'une vaste zone boisée en bordure de la Clarée. Pourtant, aujourd'hui ce secteur n'est plus délaissé comme auparavant mais a été aménagé pour recevoir deux terrains de campings.

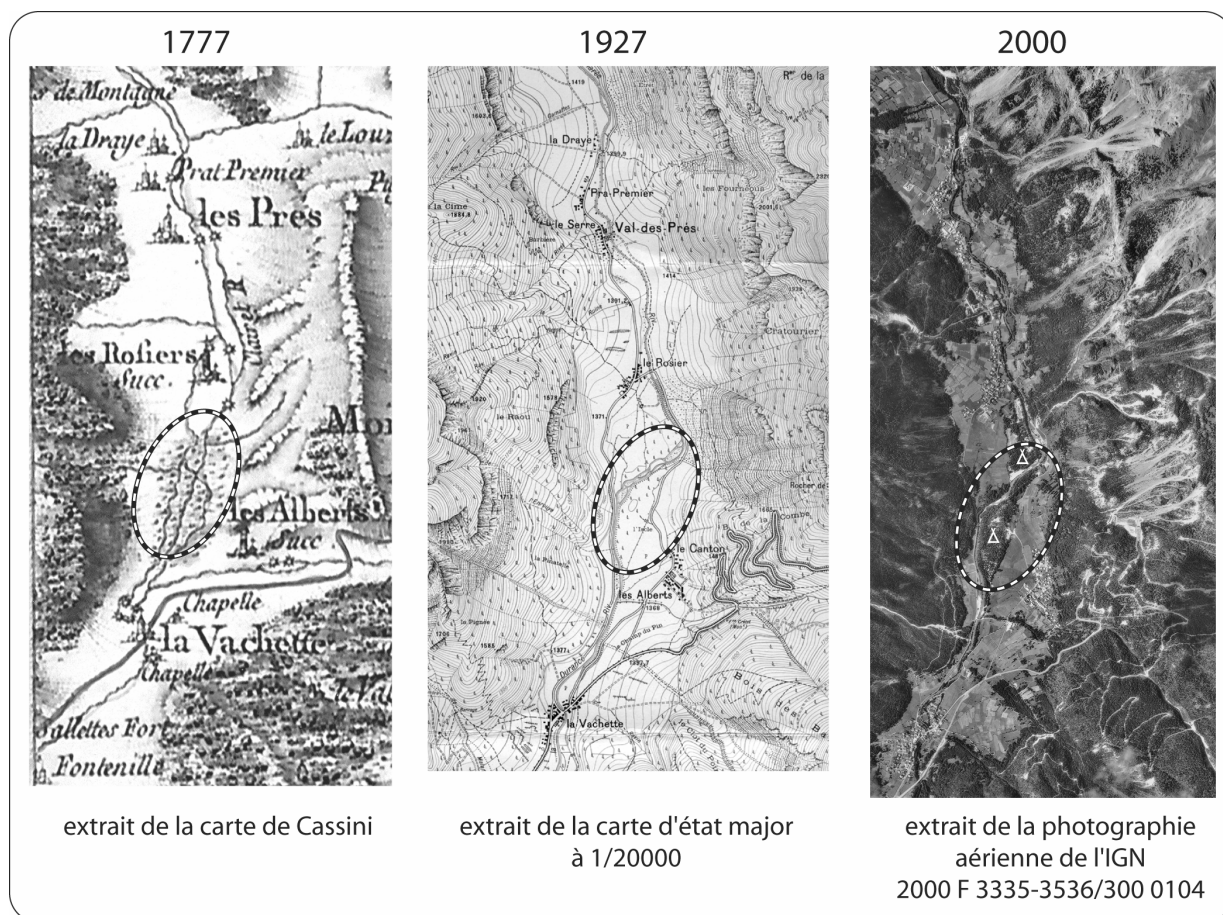


Figure 110 : évolution diachronique de l'Isle du Rosier

A une échelle de temps plus courte, l'évolution de la Clarée demeure caractérisée par une contraction de sa bande active. Les mesures de la largeur de la bande active effectuées à partir des photographies aériennes sur l'ensemble de la seconde moitié du 20^{ème} siècle permettent d'appréhender l'ampleur du phénomène (tableau 13). On constate que la rivière a connu une très nette contraction de sa bande active puisque que celle-ci passe d'une largeur moyenne de 29 m en 1952 à 18 m en 1999 dans le secteur étudié (Thénard, 2002). On remarque aussi que la rétraction n'a pas été régulière dans le temps, la crue BF-HM de 1957 a entraîné un élargissement de la bande active de la rivière, l'impact morphologique considérable de cette crue a, par ailleurs, été démontré dans la vallée du Guil, où la rivière a eu une réponse comparable à cet événement hydrométéorologique exceptionnel (Arnaud-Fassetta et Fort, 2004).

Années	1952	1961	1981	1999
Largeur de la bande active	100	110	90	62

Tableau 13 : valeurs de la rétraction de la bande active de la Clarée dans le secteur l'Isclé du Rosier [indice 100 pour 1952]
(d'après Thénard, 2002)

On constate que, paradoxalement, ce sont les zones les plus récemment libérées de l'emprise de la rivière qui sont désormais utilisées pour l'activité touristique. Il semble donc que le développement de l'accueil des touristes, qui correspond aujourd'hui à une source de revenu primordiale pour les communes de la vallée (Thénard, 2002), soit un des moteurs de l'évolution de la mise en valeur du territoire depuis la déprise des activités agricoles en fond de vallée. Néanmoins, ce constat est loin d'être isolé à la vallée de la Clarée, puisque à l'échelle des Alpes, de très nombreux terrains de camping sont situés en zone inondable⁵⁵.

On constate dans la vallée de la Clarée, une forte relation entre une dynamique naturelle –l'ajustement morphologique post-PAG– et un comportement social : l'aménagement des cônes de déjection. La contraction des bandes actives est souvent suivie d'une phase d'aménagement des secteurs récemment abandonnés par le cours d'eau. Ce qui tend à favoriser la mise en place d'ouvrages de correction torrentielle afin de limiter les effets d'une crue potentielle. Il faut aussi noter que ce phénomène ne se limite pas au cône de déjection torrentiel mais concerne aussi la rivière principale. Comme dans le cas des rivières de plaine, cela traduit une modification « dans la prise en compte du risque dans les stratégies d'occupation de l'espace et une augmentation de la vulnérabilité » (Scarwell et Laganier, 2004). La compréhension des facteurs explicatifs de l'émergence du risque torrentiel ne doit pas se limiter à une étude du cadre physique, mais intégrer aussi une approche des facteurs sociaux qui influencent la localisation des enjeux.

⁵⁵ En 2001, dans le département des Hautes-Alpes, sur 156 terrains de campings, 94 étaient en zones à risques dont 72 soumis à un risque de crue torrentielle (source : préfecture des Hautes-Alpes). Ce constat corrobore les observations de A. Peltier (2005) qui soulignent le dénie de la réalité du risque par de nombreux exploitants de terrain de camping dans le massif pyrénéen.

4.3. Quel mode de gestion du risque torrentiel pour la vallée de la Clarée ?

4.3.1. Le risque torrentiel : un exemple d'interface Nature-Société

La localisation actuelle des enjeux dans la vallée de la Clarée est déterminée par différents facteurs –géographiques ou socio-économiques– dont l'influence respective a évolué au cours du temps. Parmi eux, les facteurs géographiques peuvent, en partie, expliquer la localisation des aménagements (habitat permanent, accueil touristique) sur certains cônes de déjection. Par exemple, si l'on compare l'évolution de l'utilisation du sol sur les cônes de déjection des torrents du Creuzet et de Roubion, on constate de grandes différences (photo. 38).

Alors qu'en 1945 les deux cônes de déjection étaient en grande partie occupés par des terres agricoles, celui du torrent du Creuzet a subi une importante revégétalisation suite à la déprise agricole, contrairement au cône de déjection du torrent de Roubion sur lequel la colonisation végétale s'est limitée aux secteurs abandonnés par le torrent (cf. 2.3.1.2.). Ces deux évolutions distinctes illustrent le rôle joué par l'exposition des versants. La position en ubac du cône du torrent du Creuzet, offrait des conditions moins favorables à l'agriculture, ce qui explique que ce secteur fut le premier à être touché par la déprise agricole. De même, les nouvelles constructions qui ont fait suite à la reconversion de l'économie locale vers l'activité touristique, se sont surtout concentrées sur le versant le plus agréable, en position d'adret. C'est en effet sur le cône de déjection du Roubion, et au prix de la mise en place d'un important système de correction torrentielle (cf. 4.2.3.2.), que se sont installées les enjeux récents. Au contraire, le cône de déjection du Creuzet est resté vierge de tout aménagement.

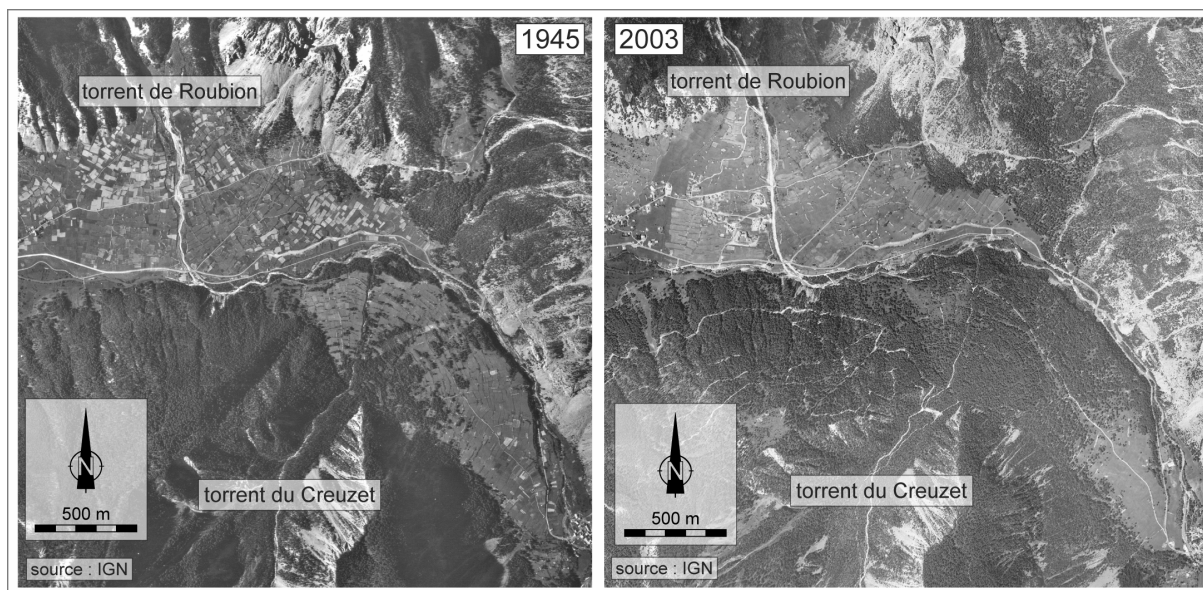


Photo. 38 : évolution comparée de l'utilisation du sol sur les cônes de déjection des torrents du Creuzet et de Roubion.

Mais d'autres paramètres liés aux comportements sociaux peuvent être à l'origine des choix déterminant l'aménagement de secteurs susceptibles d'être soumis à un aléa torrentiel. Les changements environnementaux profonds qui ont suivi de la péjoration climatique du PAG sont particulièrement visibles dans le paysage par la contraction des bandes actives torrentielles (cf. 2.3.). Au-delà de ces conséquences sur la dynamique torrentielle, ces changements environnementaux ont abouti à une évolution dans la représentation des torrents et de leur dangerosité chez la population locale. L'impact des changements environnementaux sur l'évolution de la localisation des aménagements dans la vallée de la Clarée peut être schématisé en quelques grandes étapes (fig. 111) :

- a) Suite à l'évolution climatique post-PAG et à la déprise agricole qui ont favorisé la stabilisation des sources sédimentaires, les bandes actives torrentielles entrent dans une phase de rétraction.
- b) La contraction des bandes actives, perçu comme un assagissement torrentiel, va induire chez les différents acteurs sociaux une réduction du risque torrentiel représenté. Dès lors, il devient concevable de s'installer à proximité du torrent, voire dans des secteurs que le torrent vient de délaisser, puisqu'il apparaît moins dangereux.
- c) Toutefois, la rétraction des bandes actives ne signifie pas un arrêt du fonctionnement paroxystique des torrents. Face à ce risque, il devient nécessaire de mettre en place un système de correction torrentielle. La revégétalisation (anthropique et spontanée) et la construction de barrages de sédimentation favorisent la réduction de transit sédimentaire dans le bassin-versant. Cela entretient l'ajustement

morphologique des torrents sur leur cône de déjection, ce qui peut modifier de nouveau la représentation que l'on se fait de la dangerosité du torrent et apporter un sentiment de sécurité propice à l'installation de nouveaux enjeux. La boucle se referme.

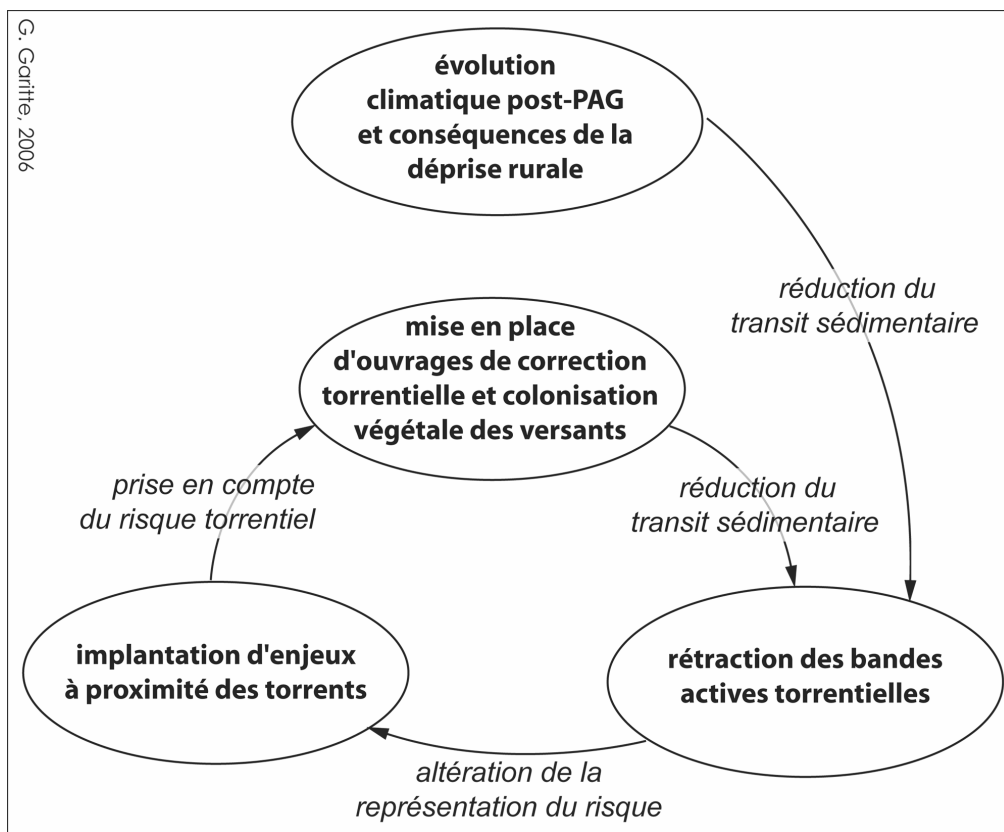


Figure 111 : diagramme conceptuel des interactions torrents-société

Ces relations entre la dynamique torrentielle et la progression des enjeux peuvent aussi être schématisées à l'échelle du cône de déjection, à partir des exemples vus dans la vallée de la Clarée (fig. 112). Pourtant, si ce raisonnement se limite à quelques étapes volontairement simplifiées, il est incontestable que le comportement des acteurs sociaux vis-à-vis du risque torrentiel soulève des interrogations (Garitte, 2006).

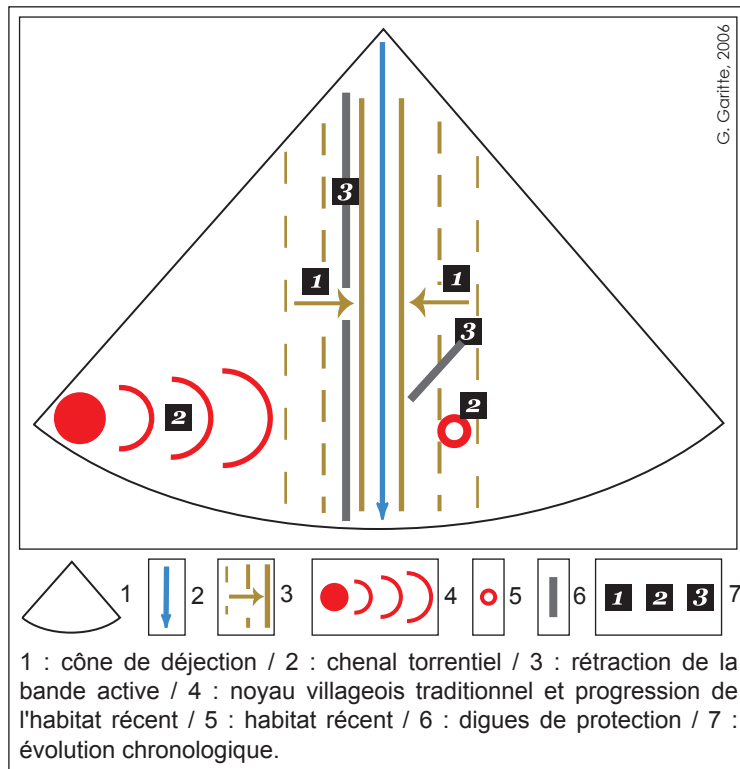


Figure 112 : représentation schématique de l'évolution des aménagements en réponse à la rétraction des bandes actives

La pression foncière apparaît plus forte aujourd'hui qu'il y a un siècle et demi, alors que la population était à l'époque deux fois plus nombreuse (cf. 2.4.2.). Ce constat est le signe de la profonde mutation socio-économique qu'a connu la vallée de la Clarée. Traditionnellement, les cônes de déjection étaient principalement utilisés pour les activités agricoles et la population se concentrait dans les noyaux villageois ; aujourd'hui ils se couvrent peu à peu de logements principalement destinés à l'accueil des touristes.

Peut-on expliquer ce qui conduit parfois les populations locales à s'installer à proximité des torrents ?

Pour apporter des éléments de réponses il convient de se rapprocher des sciences sociales (sociologie, psychologie...). Les relations entre la société et les torrents sont fortement influencées par la perception et la représentation⁵⁶ qu'en ont les différents acteurs sociaux : habitants, élus, services déconcentrés de l'Etat, vacanciers... (Slovic, 1987 ; Reyt, 2000a ; Duchêne et al., 2003 ; Lacambre et al., 2003 ; Plattner et al., 2006 *inter alii*). En fait « nos actions sont fondés sur l'apparence

⁵⁶ La représentation « consiste soit à évoquer des objets en leur absence, soit lorsqu'elle double la perception en leur présence, à compléter la connaissance perceptive en se référant à d'autres objets non actuellement perçus » Piaget et Inhelder in Debarbieux, 1998).

des choses et non sur les choses elles-même » (Bailly et Debarbieux, 1991). Or, la plupart des acteurs sociaux ont une perception biaisée du risque torrentiel. Leur perception du torrent se limite en effet à l'observation de leur environnement immédiat ce qui se réduit le plus souvent au cône de déjection. Ils n'ont pas une vision globale du fonctionnement d'un organisme torrentiel. De fait, certains auteurs déplorent que *« trop d'exemples catastrophiques témoignent de l'action de l'Homme pour urbaniser et aménager en ignorant la complexité du fonctionnement des milieux »* (Scarwell et Laganier, 2004). Pourtant, la majorité de la population locale permanente peut aisément se représenter le risque encouru lors d'une crue torrentielle, car la mémoire collective conserve les témoignages –plus ou moins justes– des événements les plus récents. Ainsi, Antoine et Desailly (1998) soulignent *« le rôle primordial de la mémoire des risques dans leur perception par les élus »*. De fait, les études sur la représentation sociale des risques naturels montrent que *« la diversité régionale du sentiment d'exposition aux risques naturels reflète globalement la distribution objective des différents types d'événement sur le territoire »* (Institut Français de l'Environnement, 2005). Pourtant, comme on le constate dans la vallée de la Clarée, les constructions d'habitations ou de bâtiments destinés à l'accueil du public à proximité des torrents ne sont pas exceptionnelles.

Cette contradiction, qui voit une population possédant une culture vernaculaire des risques naturels s'installer dans des zones potentiellement dangereuses, a pu être expliquée par certains auteurs grâce à des concepts utilisés en économie. Ainsi, le choix qui pousse un individu à construire son habitation dans une zone potentiellement dangereuse peut être motivé, par exemple, en fonction d'avantages esthétiques (meilleure exposition) ou financiers (prix du terrain moins élevé). Ce choix, qui est le fruit d'une comparaison entre les avantages et les inconvénients, a été rapproché du concept développé à l'origine en science économique : l'analyse coût-bénéfice (Brochot *et al.*, 2003 ; Grelot, 2004 ; Ganderton, 2005 ; Gamper *et al.*, 2006). Dans ce type d'analyse, les individus ou les collectivités locales peuvent décider de la constructions de logements si les coûts associés à l'aléa naturel (probabilité d'endommagement, coût financiers de la mise en place d'un système de correction torrentielle...) sont inférieurs aux bénéfices attendus (développement économique de la commune, environnement jugé plus agréable...). Cette approche souligne aussi le fait que l'individu a plus ou moins conscience du risque, sans pour autant que cela lui fasse renoncer à son choix. Certains éléments issus de l'approche psychosociologique permettent d'expliquer ce comportement.

La notion de dissonance cognitive développée à l'origine par l'américain L. Festinger, décrit la situation d'un individu dont le comportement est en contradiction, en dissonance, avec ses connaissances (Poitou, 1974). L'exemple classique est celui du fumeur qui sait pourtant que fumer est mauvais pour sa santé ; toutefois, cet exemple doit être pondéré par le fait que le choix du fumeur peut être

altéré par les effets de dépendance induits par les toxines contenues dans la cigarette. Dans le cas du risque torrentiel, il y aura dissonance cognitive par exemple, lorsqu'un individu, pourtant informé de la menace, résidera à la proximité immédiate d'un torrent. Un individu en proie à une telle dissonance cognitive va mettre en place des stratégies pour réduire cette dissonance. La plupart du temps, ces stratégies passent par une déresponsabilisation de l'individu : soit en minimisant le risque, soit en justifiant les risques encourus, soit en réduisant la dissonance par l'humour ou le fatalisme (Schoeneich et Busset-Henchoz, 1998). Cette déresponsabilisation se traduit aussi par un désengagement de l'individu qui s'en remet à l'Etat, qu'il considère garant de sa sécurité.

Ce constat de l'apparent paradoxe à protéger des enjeux installés à proximité de secteurs récemment libérés par les torrents, ne remet nullement en cause la compétence technique pour réguler la torrentialité. L'efficacité du service RTM a été largement démontrée sur des organismes autrement plus impressionnants que les torrents de la vallée de la Clarée, comme par exemple en Ubaye sur le torrent symbolique du Riou Bourdoux surnommé « le monstre » à l'époque des premières actions de correction torrentielle (Delsigne *et al.*, 2001). En fait, cette capacité à limiter l'impact des crues par la mise en place de systèmes de correction torrentielle, se rapproche de la notion de résilience sociale qui illustre l'aptitude de la société à tolérer une perturbation sans passer à un état qualitativement différent, ici en l'occurrence à s'adapter à un risque torrentiel mésestimé lors de l'installation près du torrent (Holling, 1973 ; Adger, 2000 ; Frazer *et al.*, 2003). Il semble donc que tant que la résilience sociale demeure forte, les acteurs sociaux seront plus enclins à accepter la proximité d'un vecteur de risque, puisque cette même société aura la capacité de réduire les effets néfastes d'une possible catastrophe. Au final, c'est sûrement la multiplication des messages à l'intention des individus, dans le but de les informer du risque réel qu'ils prennent, qui pourrait réduire ces comportements à risque. Mc Daniels *et al.* (1996) ont, en effet, mis en évidence que dans la perception des risques, les constructions mentales individuelles ont une grande influence sur les représentations sociales plus globales, car celles-ci sont elles-mêmes issues d'individus.

Le risque n'a pas de sens en soi, il doit nécessairement être contextualisé c'est-à-dire situé dans une société, un territoire, une période donnée (Duchêne et al., 2003). En d'autres termes, le risque torrentiel tel qu'on peut tenter de l'estimer aujourd'hui dans la vallée de la Clarée est en grande partie déterminé par l'histoire et surtout par les contextes sociaux, politiques, économiques et culturels de la vallée

(Alcántara-Ayala, 2002). La gestion du risque torrentiel et les moyens mis en place pour le réduire doivent donc intégrer cette dimension sociale qui explique en grande partie la localisation des enjeux. Les interrelations fortes constatées entre évolution de la morphologie torrentielle et comportement sociaux, permettent de faire émerger la notion de « système torrent-société ». C'est ce système, qui évolue à la fois en fonction de facteurs spontanés et anthropiques, qui est le siège du risque torrentiel.

4.3.2. Contribution au zonage du risque torrentiel dans la vallée de la Clarée

De nombreux auteurs utilisent les systèmes d'informations géographiques (SIG) pour élaborer des cartographies des risques naturels (Manche, 2000 ; He *et al.*, 2003 ; Chau et Lo, 2004 ; Chen *et al.*, 2004 ; Melelli et Taramelli, 2004 ; Yiu *et al.*, 2006 *inter alii*) . En effet, en gérant différents types d'informations (contexte géologique, paramètres morphométriques des torrents, morphologie des cônes de déjection, recensement des crues, inventaires des ouvrages de correction, localisation des différents enjeux...) les outils géomatiques offrent la possibilité d'établir des croisements entre de nombreux paramètres influençant la dynamique torrentielle et les risques qui lui sont associés. Toutefois, le problème de collecte des données qui sont dispersées entre différents services étatiques ou leur coût financier élevé ainsi que l'absence d'institution locale susceptible de gérer et de mettre à jour cette base de données a limité l'opportunité d'élaborer un tel SIG dans notre travail de thèse. Ce paragraphe n'a donc pas pour ambition de proposer un zonage définitif du risque torrentiel à l'échelle de la vallée de la Clarée ; il vise à présenter succinctement les résultats d'observations et de réflexions sur la définition des enjeux et leur localisation par rapport aux zones potentiellement soumises aux épandages torrentiels. En dépit du caractère simplificateur de la décomposition du risque entre aléa et vulnérabilité (Pigeon, 2005 ; cf. Introduction), cette approche méthodologique de la délimitation du risque torrentiel a été privilégiée car elle permet de distinguer les facteurs dépendant uniquement des sociosystèmes, des facteurs dépendants de la dynamique torrentielle (qui est le fruit de l'interaction de nombreux paramètres, cf. 1.6.).

4.3.2.1. *Les enjeux soumis aux crues torrentielles dans la vallée de la Clarée*

L'aléa torrentiel concerne en particulier les cônes de déjection qui, comme nous l'avons défini en introduction correspondent à « l'espace du risque torrentiel ». Or, les berges de la rivière principale et surtout les cônes de déjection torrentiels concentrent la majorité des enjeux humains ou économiques. Les enjeux présents sur les cônes de déjection torrentiels de la vallée de la Clarée sont très divers. Il peut s'agir à la fois de zones agricoles couvrant de vastes surfaces, d'axe de communication ayant une emprise linéaire ou encore d'enjeux ponctuels comme par exemple des habitations ou des pylônes de lignes électriques (fig. 113).

En plus de ces enjeux dont le coût financier en cas d'endommagement est évident, la rivière principale constitue elle-même un enjeu particulier. La menace d'un comblement partiel ou total du lit de la Clarée par des matériaux apportés par une crue torrentielle fait de la rivière principale à la fois un enjeu et un vecteur de risque (cf. 3.4.). L'obstruction latérale de la rivière pourrait entraîner un débordement sur la rive opposée, voire dans le cas extrême d'un comblement total, une rupture d'embâcle qui menacerait les infrastructures situées sur les berges et les marges des cônes de déjection à l'aval (fig. 113). Si l'on tient compte de cette éventualité l'espace indirectement soumis à l'aléa torrentiel s'en trouve élargie. La forêt présente sur les cônes de déjection peut aussi constituer un enjeu à part entière. Non pas que ces boisements, souvent issus d'une colonisation spontanée suite à la déprise agricole, aient une forte valeur socio-économique mais comme cette couverture forestière peut contribuer à réduire l'impact des crues torrentielles en fond de vallée, sa destruction pourrait faciliter le transit de la charge grossière jusqu'à la rivière principale rendant alors plus prégnant le risque d'embâcle.

Alors que l'ensemble des infrastructures accueillant du public tels que les habitations ou les services collectifs (école, gendarmerie...) et dont l'endommagement pourrait entraîner des victimes ou entraver le fonctionnement des services de secours, peuvent être considérées comme ayant une forte vulnérabilité au même titre que les ouvrages de correction torrentielle ; la plupart des enjeux ont le plus souvent une vulnérabilité variable. Par exemple, la vulnérabilité des axes de communication varie en fonction de leur importance (type de voie, localité desservie, intensité du trafic...) et de l'existence ou non d'une autre route permettant de maintenir le trafic routier en cas de coupure. En fait, la variabilité saisonnière de la vulnérabilité est très forte dans vallée de la Clarée. L'importance de la fréquentation touristique estivale entraîne une hausse de la vulnérabilité des infrastructures destinées à l'accueil des touristes (résidences secondaires, locations, terrains de camping...) et des axes de communications (cf. 4.2.1.2.).

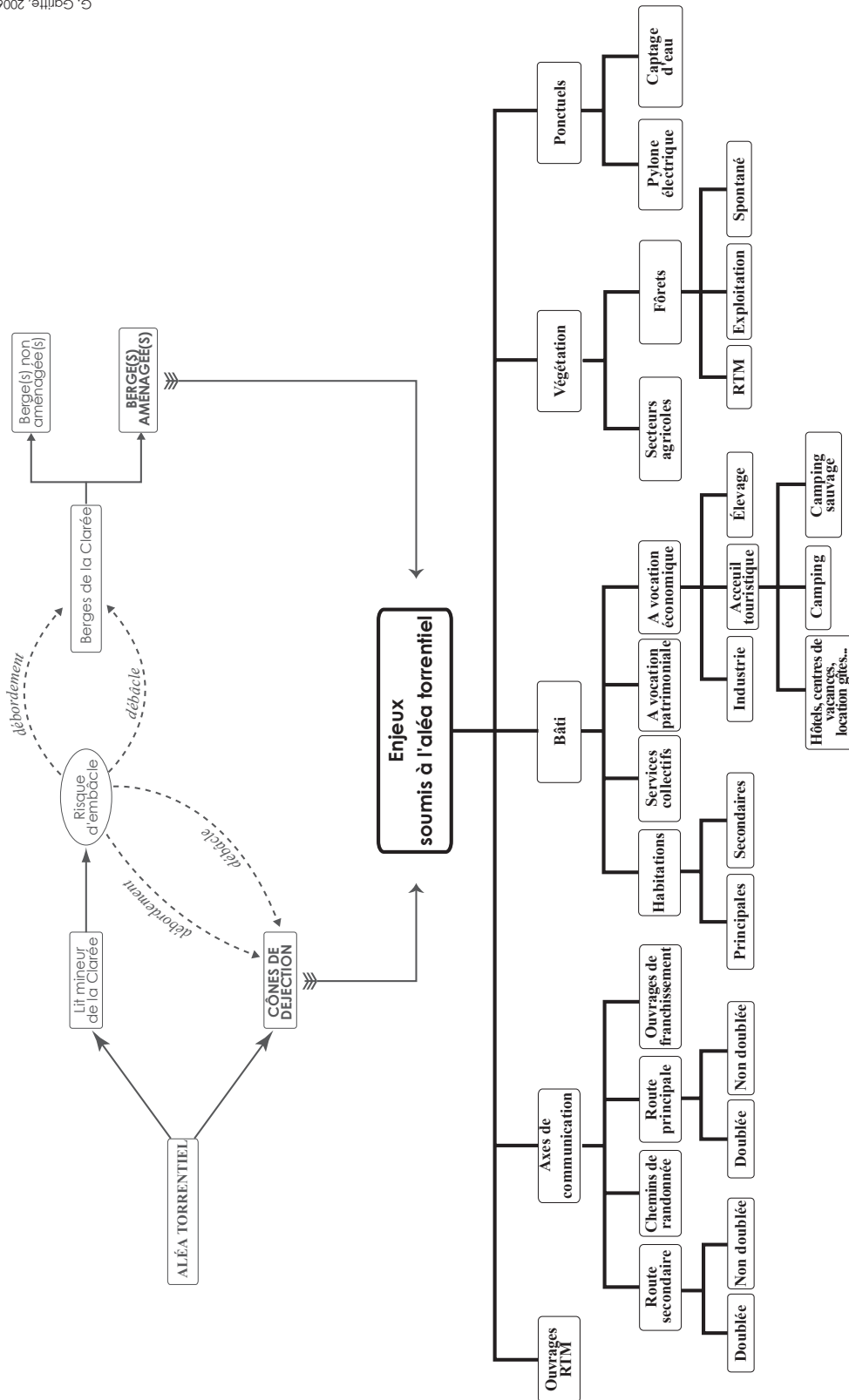


Figure 113 : les conséquences cyndiniques du risque d'embâcle de la rivière principale et les différents enjeux soumis à l'aléa torrentiel en Clarée

Par ailleurs, les dommages consécutifs à un aléa naturel sont de deux types distincts : les dommages directs et les dommages indirects (UNDP, 2004 ; Nöthiger et Elsasser, 2004). Si l'on retranscrit cette distinction dans le cadre du risque torrentiel, les dommages directs correspondent aux coûts (financiers ou socio-économique) directement imputables à l'aléa torrentiel. Il peut s'agir de dommages structurels qui touchent l'intégrité des infrastructures en place. Dans la vallée de la Clarée, ce sont surtout les axes de communication, ainsi que quelques aménagements récemment construits, qui sont directement soumis aux crues torrentielles, mais les dommages directs peuvent aussi être liés à des victimes qui elles-mêmes sont associées à des procédures d'indemnisation. Car, même s'il peut sembler amoral de chiffrer une vie humaine, en cas de catastrophe les montants considérés peuvent s'avérer très élevés. Les indemnisations versées aux familles des 23 victimes de la catastrophe du Grand Bornand (14/07/1987) se sont élevées à l'époque à 6,4 millions de francs soit l'équivalent de 1 250 000 € (Cojean *et al.*, 2002).

Les dommages indirects représentent quant à eux l'ensemble des perturbations causées par l'aléa naturel. Ces dommages indirects regroupent à la fois les coûts d'évacuation des populations sinistrées et les dommages fonctionnels provoqués par la coupure de route ou de réseaux d'alimentation (eaux, électricité), souvent préjudiciables à de nombreux secteurs économiques. Dans le cas de la vallée de la Clarée, et compte tenu que l'activité paroxystique des torrents est essentiellement estivale, c'est surtout le manque à gagner pour le secteur économique du tourisme qui pourrait représenter un coût financier important. Une crue torrentielle qui ferait d'importants dégâts, voire des victimes, bénéficierait d'une couverture médiatique qui pourrait altérer l'image de la vallée et entraîner une baisse de la fréquentation touristique. Ainsi, alors que les coûts des dommages directs sont relativement rapidement quantifiables *a posteriori*, l'impact des dommages indirects peut avoir des conséquences à plus long terme (Hubert et Ledoux, 1999).

Il faut aussi constater que les coûts financiers consécutifs à des dommages directs sont la plupart du temps pris en charge par des mécanismes d'assurances. En revanche, les dommages indirects, dont les coûts financiers sont difficiles à chiffrer précisément, sont rarement pris en charge par les assurances et restent donc à la charge des collectivités locales et des particuliers.

À l'échelle de la vallée de la Clarée, les enjeux actuels immédiatement menacés par une crue torrentielle apparaissent relativement limités. En effet, en dehors des aménagements construits dans les bandes actives abandonnées depuis le PAG (torrent des Acles) ou sur les berges de certains torrents (torrents des Ruines et du Roubion) et des axes de communication, peu d'infrastructures sont actuellement directement menacées par l'éventualité d'une crue torrentielle. En fait, la vallée de la Clarée apparaît comme un espace en devenir. En effet, si la mutation socio-économique a entraîné une évolution de la mise en valeur du territoire, d'ores et

déjà visible par la colonisation de certains cônes de déjection, ce sont les choix des politiques d'aménagement à venir qui vont déterminer la localisation des futurs enjeux. Ce constat apparaît comme une limite à l'évaluation précise de la vulnérabilité et ce d'autant plus si l'on tient compte de la variabilité saisonnière de l'occupation dans la vallée. Dès lors, il apparaît essentiel de pouvoir déterminer *a priori* les secteurs potentiellement soumis aux crues torrentielles.

4.3.2.2. *La détermination de l'emprise des torrents sur leur cône de déjection*

Face au manque de données fiables concernant les crues torrentielles passées, il apparaît difficile d'établir un événement de référence qui servirait de base à la délimitation de la zone d'emprise des torrents (cf. 3.2.2.1.). En effet, pour déterminer cet événement de référence on ne peut se fonder uniquement sur le recensement historique des crues à cause du manque de données sur les secteurs les plus récemment occupés. De même, les différentes méthodes visant à estimer le volume de matériaux susceptible d'être mobilisé par une crue torrentielle n'offrent pas de résultats satisfaisants et directement applicables (cf. 3.2.3.2.). En fait, le concept d'événement de référence suppose des conditions constantes dans le bassin de réception et la zone de dépôt du phénomène, ce qui est rarement le cas (Meissl *et al.*, 2001 cité par Peltier, 2005). Dans ce contexte, la détermination de l'emprise des torrents sur leur cône de déjection prend tout son sens. La méthode de zonage de l'aléa torrentiel choisie est fondée sur une analyse croisée de documents iconographiques (photographies aériennes et obliques), du recensement des crues torrentielles (offrant un aperçu de l'emprise des torrents depuis la dernière crise morphodynamique) ainsi que sur des documents et des mesures topométriques renseignant sur la morphologie de différents cônes de déjection de la vallée.

Sur certains organismes pour lesquels on dispose d'une information très riche (archives, observations de terrain, photographies aériennes et obliques), il est possible de déterminer sur le cône de déjection différentes zones plus ou moins sensibles à l'aléa torrentiel. Il s'agit, à partir des différentes sources d'informations disponibles, de délimiter 3 secteurs distincts sur le cône de déjection :

- Un secteur correspondant à la bande active du torrent. Ce zonage se fonde en particulier sur l'analyse des photographies aériennes les plus récentes.
- Un secteur où le l'aléa torrentiel est avéré, celui-ci est déterminé à partir des zones d'épandage des crues torrentielles depuis le PAG. Ce zonage se base d'une part sur l'analyse diachronique de documents iconographiques, tels

que les photographies aériennes ou obliques, qui permettent de déterminer avec précision les zones touchées par les crues torrentielles au cours des 50 dernières années, et d'autre part, sur une analyse géomorphologique qui consiste à retrouver *in situ* les indices de crues torrentielles et, le cas échéant, de les dater par dendrométrie.

- un secteur où l'épandage des crues torrentielles est possible. Sa délimitation est fondée sur une approche morphologique du cône de déjection à partir, entre autres, des levés topométriques effectués sur différents torrents et d'une carte à échelle fine du fond de la vallée⁵⁷.

Les exemples de la détermination de l'emprise d'un torrent sur son cône de déjection pour quatre des bassins-versants de la vallée de la Clarée offrent des résultats contrastés (fig. 114). Il apparaît que selon que l'on utilise une méthode historique basée sur l'étude de la trajectoire et des zones de dépôts des crues contemporaines ou une méthode morphologique prenant uniquement en compte la forme du cône de déjection, on obtient des résultats parfois très dissemblables.

L'analyse de la morphologie du cône de déjection, définit une zone très large. La vallée de la Clarée comporte, en effet, plusieurs torrents qui ont formé des cônes de déjection au profil bombé sur lequel divaguent les écoulements (cf. 1.4.3.). Dans ce cas, c'est quasiment l'ensemble du cône de déjection qui pourrait être touché par une crue torrentielle, du fait même de la dynamique des écoulements torrentiels qui peuvent changer subitement de trajectoire. En fait, ce type de zonage ne permet de déterminer qu'un secteur potentiellement soumis à un aléa torrentiel.

L'analyse géo-historique, basée quant à elle sur l'étude des indices de crues torrentielles, définit une zone moins étendue qui correspond au secteur où l'aléa torrentiel est avéré. Cependant, comme elle ne se fonde que sur la détermination des secteurs touchés par des crues plus ou moins anciennes, cette analyse historique n'est donc représentative que de la dynamique passée et ne reflète pas forcément le comportement actuel du torrent. La correction torrentielle entreprise par le service RTM ou le reboisement spontané des versants, peuvent avoir considérablement modifié la dynamique du torrent à l'image de la contraction post-PAG des bandes actives. A l'inverse, certains organismes peuvent avoir connu une longue période d'accalmie donnant alors une image faussement rassurante du torrent. De plus, la délimitation précise de la zone où l'aléa torrentiel est avéré peut parfois se confronter à un manque de données. Ainsi, dans le cas du torrent des Ruines

⁵⁷ Il s'agit d'une carte au 5 000^{ème} dressée en 1973 à partir de levés photogrammétriques. Cette carte, commandée par la DDE, se limite au fond de vallée mais permet toutefois d'avoir une vision très précise de la morphologie de la plupart des cônes de déjection (équidistance des courbes de niveau 5 m).

plusieurs comptes-rendus attestent de dépôts de matériaux sur le cône de déjection lors de plusieurs crues ; toutefois, l'exploitation agricole qui s'est maintenue dans ce secteur a effacé la plupart des traces *in situ*, rendant alors moins précis le zonage effectué.

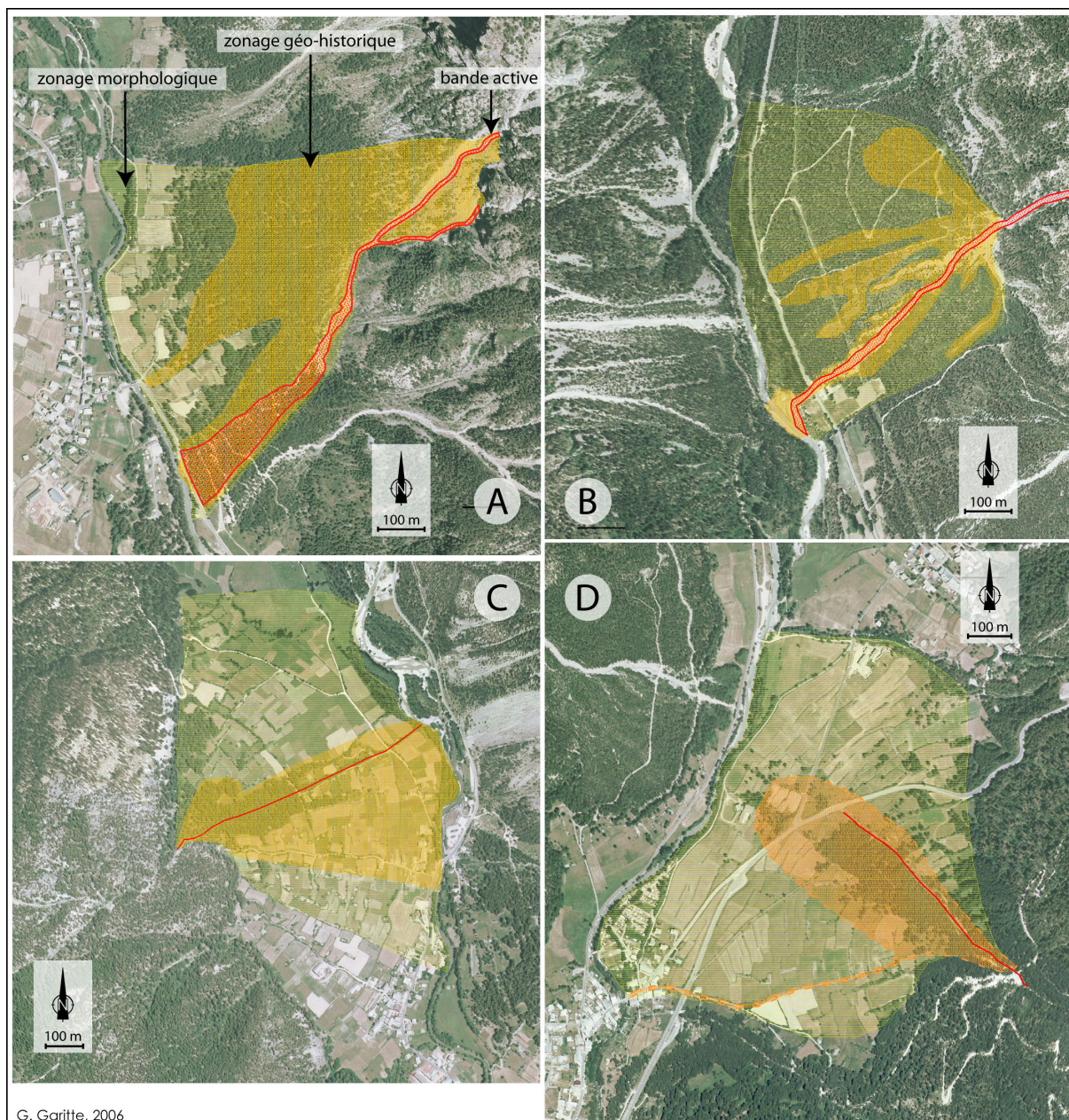


Figure 114 : diagnostic de l'emprise de torrents de la vallée de la Clarée sur leur cône de déjection

A : Ravin de Combal, B : Ravin des Sables, C : Torrent des Gamattes, D : Torrent des Ruines
[enveloppe jaune : zonage morphologique ; enveloppe orangée : zonage géo-historique ;
enveloppe rouge : bande active torrentielle ; photos : IGN BD Ortho® 2003]

Ces applications du diagnostic de l'emprise des torrents sur leur cône de déjection mettent en évidence l'importance des secteurs susceptibles d'être soumis à l'aléa torrentiel, et ce en particulier sur les cônes de déjection de morphotype divagants. Or, ce sont les torrents associés à ce morphotype de cône de déjection qui sont les plus représentés dans le recensement des crues torrentielles dans la vallée de la Clarée (cf. 3.5.).

4.3.2.3. *Les limites au zonage du risque torrentiel dans la vallée de la Clarée*

L'intérêt d'un zonage du risque intégrant une analyse quantitative de la vulnérabilité et de l'aléa est limité dans le cas de la vallée de la Clarée. En effet, une large partie de la vallée ne comporte quasiment aucun enjeu, hormis la rivière principale, et apparaît comme un territoire en devenir. Or, la délimitation des secteurs plus ou moins sensibles aux crues torrentielles à partir d'une approche croisant analyse morphologique et géo-historique permet une spatialisation de l'aléa pouvant aboutir à déterminer les secteurs les moins favorables à l'installation d'infrastructures.

Il ressort de cette approche qu'il est possible, parmi les cônes de déjection torrentiels n'ayant pas fait l'objet de vaste projet de correction torrentielle, de faire la distinction entre différentes situations :

- D'une part, entre des cônes de déjection sur lesquels les crues torrentielles ont balayé de larges surfaces et des cônes de déjection dont la zone délimitée par l'analyse géo-historique se limite à un secteur qui borde la bande active actuelle.
- D'autre part, entre des organismes torrentiels susceptibles de transiter jusqu'à la rivière principale et ceux dont les dépôts de crue sont contenus sur le cône de déjection.

Cette approche visant à une spatialisation de l'aléa torrentiel pourrait contribuer à la prévention du risque en limitant la mise en place d'enjeux dans des secteurs sensibles. En effet, des cônes de déjection comme ceux des torrents des Ruines et de Gamattes offrent des opportunités de développement sur leurs marges ne nécessitant pas la mise en place d'importants systèmes de correction torrentielle (cf. 4.5.).

Pourtant, bien que le zonage des zones soumises à un aléa torrentiel soit une préoccupation majeure des aménageurs, et ce d'autant plus que les mutations

socio-économiques des vallées alpines accroissent la pression foncière, la détermination du risque acceptable demeure un choix politique qui ne résulte pas uniquement d'une démarche scientifique (Hubert et Reliant, 2003). Ainsi, dans le cadre de l'établissement des Plans de Prévention des Risques naturels (PPR), « *tout ce passe comme si les limites envisagées sur des fondements scientifiques ne constituaient qu'une base de négociation et que la délimitation matérialisait les résultats d'un arbitrage fondé non plus sur la réalité du risque, mais sur l'acceptabilité sociale de celui-ci* » (Billet, 2001). Or, l'acceptabilité du risque torrentiel, puisque le « *risque peut être accepté en raison des bénéfices que l'on peut attendre de lui* » (Heiderich, 2005), dépend tout d'abord de la perception qu'en ont les différents acteurs sociaux. Si l'on tient compte du fait que la population estivale – période la plus propice aux crues torrentielles – est principalement constituée de touristes, (qui représentent jusqu'à 660% de la population permanente), cela signifie que la majeure partie de la population soumise à l'aléa torrentiel n'a qu'une perception et une représentation très limitée du phénomène. Si certaines actions de sensibilisation sont menées par des associations locales auprès de l'ensemble de la population estivale, les touristes demeurent en général peu préoccupés par les risques naturels sur leur lieu de villégiature. La plupart des touristes n'ont pas conscience de la probabilité de survenue d'une crue torrentielle, car inconsciemment « *il est intolérable, voire indécent, de mourir pendant les vacances* » (Heiderich, 2005). De fait, ce manque d'information des populations concernées, qui peut parfois conduire à des comportements à risque, amènent certaines institutions ayant en charge la gestion du risque torrentiel à déplorer que : « *le courage d'afficher le risque accepté manque : quelle que soit l'efficacité du zonage effectué, la qualité des travaux de protection, il existera toujours un risque résiduel. Il faut avoir le courage de dire aux citoyens qu'un tel risque existera* »⁵⁸. Ce constat est d'autant plus préjudiciable que le « *refus du risque, la dénégation de la catastrophe en tant que futur possible est un frein à l'instauration de politiques de prévention efficaces et durables* » (Vinet et Defossez, 2006).

Une autre limite du zonage de l'aléa torrentiel réside dans le fait qu'il possède un côté « figé dans le temps » alors qu'il se doit de prendre en compte de nombreux phénomènes susceptibles d'évoluer. Différents paramètres agissant directement sur la dynamique torrentielle, comme la couverture végétale ou l'état de charge du lit torrentiel, peuvent changer plus ou moins rapidement. Les zonages de l'aléa torrentiel fondés sur l'extension des crues recensées posent un problème de représentativité temporelle. Ces zonages prennent en compte l'ensemble des crues répertoriées qui décrivent, avec un manque certain d'exhaustivité, le comportement paroxystique des torrents depuis au mieux le 15^{ème} siècle dans la

⁵⁸ Citation d'Y. Cassayre, délégué national RTM lors de son audition du 3 avril 2002 pour le *Rapport d'information du Sénat fait au nom de la mission commune d'information chargée de dresser un bilan de la politique de la montagne*

vallée de la Clarée (cf. 3.2.2.1.). Or, cela ne correspond pas forcément au comportement actuel de certains torrents.

Par exemple, on ne retrouve pas de traces de crue du torrent de Granon dans les archives avant le 5 mai 1973. Cela ne signifie pourtant pas que cet organisme soit resté inactif, car compte tenu de la faiblesse des enjeux présents sur son cône de déjection, certaines crues ont pu passer inaperçues. Néanmoins, l'étude des photographies aériennes confirme que le torrent de Granon est resté peu actif durant une longue période. En effet, sur le cliché de 1939, le chenal du torrent est quasiment imperceptible (fig. 115), le torrent s'écoule sous une couverture forestière dense qui occupe une grande partie du cône de déjection.

Le 22 juillet 1988, à la suite d'un orage localisé⁵⁹, le torrent de Granon a émis une lave torrentielle qui a détruit une partie du peuplement de mélèzes (*Larix decidua*) et de pin sylvestre (*Pinus silvestris*) qui occupait son cône de déjection. De nombreux arbres ont été sectionnés lors de la crue et l'on retrouve maintenant d'imposantes souches dans le lit du torrent (fig. 115). L'âge des arbres détruits par cette crue, évalué par dendrochronologie, est supérieur à 88 ans. Ce qui confirme que le torrent de Granon a connu une période d'accalmie suffisamment longue pour permettre la croissance de ces arbres. Grâce à l'utilisation du tachéomètre nous avons pu mesurer précisément les effets de cet épisode paroxystique. Ainsi, cette crue a mis en place des bourrelets latéraux dont la hauteur dépasse parfois 4 m, par ailleurs les débordements sur plusieurs dizaines de mètres en rive droite du chenal, comportent de nombreux blocs dont le volume dépasse 1 m³ (fig. 115). Mais surtout, cette crue qui a déposé 20 000 à 30 000 m³ de matériaux sur le cône de déjection et à la confluence avec la Clarée, a eu pour effet de canaliser les écoulements qui sont désormais circonscrits entre les deux bourrelets torrentiels. Cette chenalisation du torrent peut avoir de nombreuses conséquences sur la dynamique du torrent puisque la charge sédimentaire va désormais transiter jusqu'à la confluence plutôt que de s'épandre sur le cône de déjection (cf. 1.4.2.).

⁵⁹ Les stations pluviométriques de Névache et Briançon n'ont pas enregistré de précipitations significatives (respectivement 0 et 0,2 mm).

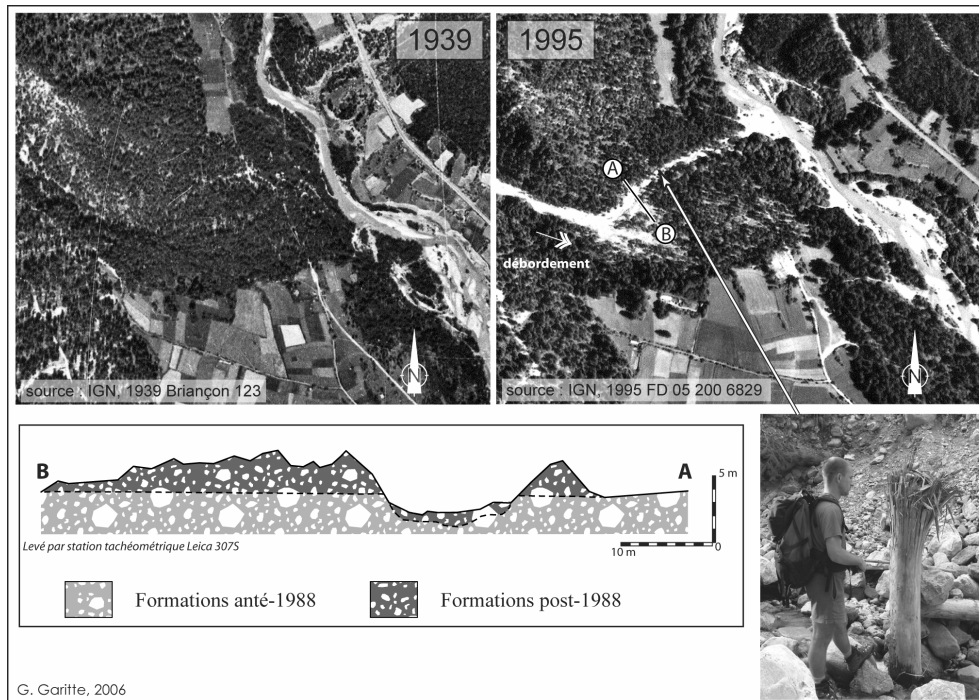


Figure 115 : le caractère exceptionnel de la crue du torrent de Granon du 22 juillet 1988

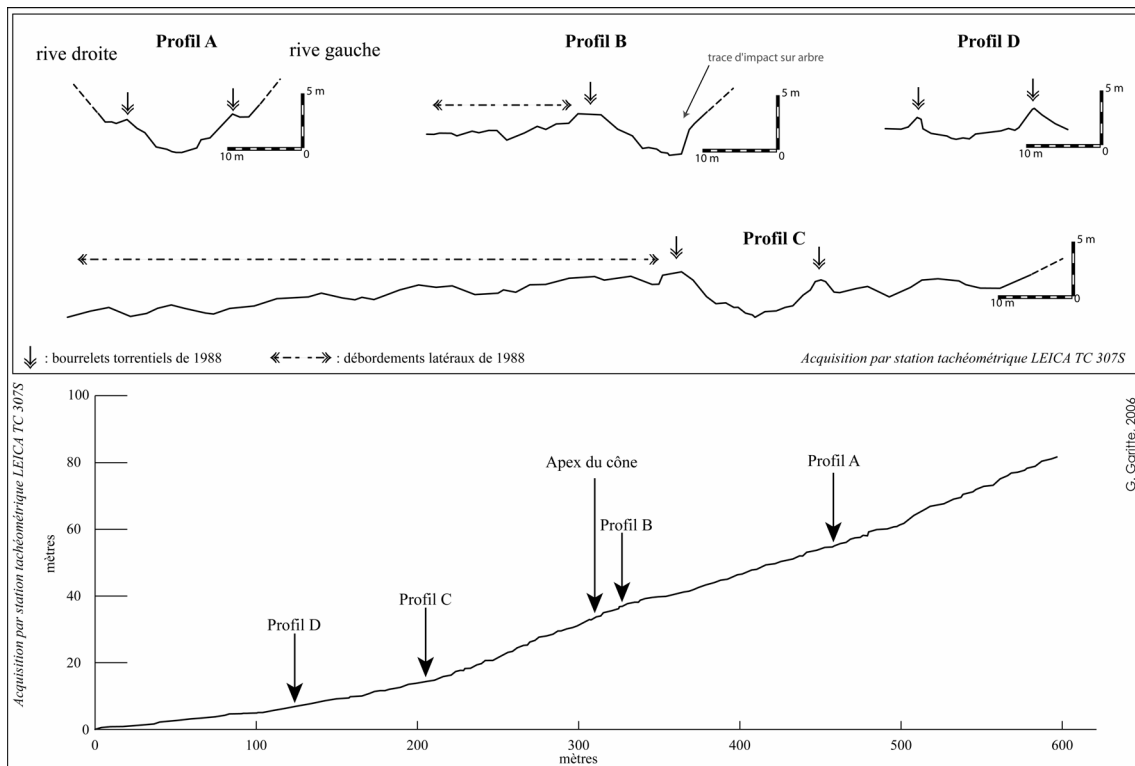


Figure 116 : Torrent de Granon, conséquences morphogènes de la crue du 22 juillet 1988

De même, la crue du Ravin des Sables du 24 juillet 1995 (cf. 3.4.1.) a pu paraître exceptionnelle puisque le cône de déjection de ce torrent possédait, lui aussi, une couverture forestière bien établie⁶⁰ attestant d'une longue période d'accalmie torrentielle.

Était-ce suffisant pour considérer ces organismes comme inactifs ? À l'évidence non, d'autant que certains indices morphologiques sur le cône de déjection du Ravin des Sables démontrent, qu'en dépit du recensement des crues torrentielles, ce torrent a connu une activité régulière au cours des deux derniers siècles (cf. 2.3.1.2.).

De fait, un zonage n'a de réel sens qu'au moment de son élaboration alors que son utilisation peut se prolonger durant de nombreuses années dans le cadre des Plans de Prévention des Risques⁶¹. Ce manque de représentativité temporelle est d'autant plus flagrant que, comme nous l'avons démontré précédemment, nous sommes dans un environnement changeant. L'évolution de la mise en valeur du territoire et surtout le contexte actuel de réchauffement global pourraient impliquer de profondes mutations environnementales avec des répercussions sur la dynamique des torrents. Lorsqu'il s'agit de prendre en compte aujourd'hui, les conséquences probables du réchauffement global qui se feront pleinement ressentir à l'échelle d'un siècle ou deux, on se trouve confronté au fait que « *les échelles auxquelles se réfèrent les scientifiques ne concordent pas toujours avec celles des acteurs sociaux* » (Baudelle et Régnaud, 2004).

Le zonage de l'aléa torrentiel est une donnée précieuse pour les différents acteurs en charge de l'aménagement du territoire, il demeure toutefois un exercice complexe. Selon que l'on cherche à dresser une représentation spatiale de l'extension de l'aléa qui relève du « champ du possible » ou du « champ du probable », les surfaces considérées sont très distinctes. Toutefois, s'il est possible de déterminer l'emprise du torrent sur son cône de déjection à partir d'analyses géo-historiques et morphologiques, la « décision de gestion du risque d'inondation est

⁶⁰ Les prélèvements dendrométriques effectués sur des arbres touchés par les crues du torrent de Granon et du Ravin des Sables, démontrent que les axes empruntés lors de ces événements n'ont pas connu de perturbations majeures durant une longue période. Sur le cône de déjection du torrent de Granon, les arbres détruits par la crue de 1988 avaient plus de 80 ans, tandis que ceux touchés par la crue du Ravin des Sables en 1995 étaient, pour certains, âgés de plus de 140 ans (Romelé, 1999).

⁶¹ Le décret n°95-1089 du 5 octobre 1995 relatif aux plans de prévention des risques naturels prévoit néanmoins la possibilité de modifications partielles ou totales du PPR.

avant tout politique, et les arguments de nature technique ou socio-économique ont simplement un rôle d'aide à la décision » (Hubert et Ledoux, 1999).

4.4. Les modifications envisageables de la dynamique torrentielle dans le contexte du réchauffement global

Comme nous l'avons constaté, les changements socio-économiques que la vallée de la Clarée a connu au cours du 20^{ème} siècle, ont conduit à d'importantes modifications de l'usage des territoires marquées par l'extension des enjeux à proximité des torrents. Parallèlement, les modifications environnementales ont aussi largement contribué au changement de la physionomie des torrents sur leur cône de déjection. En effet, la deuxième partie de ce travail, consacrée à l'ajustement morphologique des torrents depuis le PAG, souligne les liens étroits qui existent entre contexte climatique et dynamique torrentielle. C'est pourquoi dans la situation actuelle de réchauffement global annoncé, de très nombreuses études se focalisent sur les effets des modifications climatiques en particulier dans les milieux de montagne (Prudent Richard, 2006⁶²). De fait, pour permettre la meilleure gestion possible du risque torrentiel il apparaît primordial d'appréhender quelles pourraient être les modifications du comportement des systèmes torrentiels en réponse aux modifications environnementales à venir.

4.4.1. La question du réchauffement global

Le réchauffement de l'atmosphère à l'échelle planétaire est maintenant une thèse défendue par une grande partie de la communauté scientifique (IPCC, 2001a). Toutefois, certains auteurs critiquent les prévisions alarmistes des « néoclimatologues »⁶³ qui sont uniquement basées sur des modèles informatiques et néanmoins largement médiatisées par les lobbies environnementalistes (Vigneau, 2005). La réalité même du caractère exceptionnel du réchauffement de l'atmosphère annoncé par le GIEC est parfois remise en question. Ce désaccord est parfaitement illustré par le débat qui oppose Mann, Bradley et Hughes à McIntyre et

⁶² Il s'agit d'un recensement qui répertorie pas moins de 53 études, menées par différents chercheurs et organismes de recherches français et européens, concernant spécifiquement les effets du réchauffement climatique sur les espaces de montagne.

⁶³ La « néoclimatologie » désigne la science qui se propose d'étudier non plus l'état stationnaire du climat mais plutôt sa tendance (Veyret et Vigneau, 2004).

McKittrick (Mann *et al.*, 1998 et 2004 ; McIntyre et McKittrick, 2003 et 2005). Finalement, il apparaît que certains scientifiques regrettent que « *le scénario du global warming est aujourd'hui proclamé et non démontré* » (Leroux, 2002). Quoiqu'il en soit, différents indices démontrent que nous sommes dans un environnement changeant. Dans le Briançonnais, cette variabilité est aisément perceptible à travers l'ajustement morphologique des torrents (cf. 2.3.), l'évolution de la dynamique des coulées de débris (Jomelli *et al.*, 2004) ou les fluctuations récentes des glaciers (Garitte et Lahousse, 2000 ; Cossart *et al.*, 2006). Au final, il apparaît impossible d'ignorer l'hypothèse du réchauffement global car les mutations environnementales que pourrait entraîner au niveau local cette modification annoncée du climat, sont d'ores et déjà la source de nombreuses inquiétudes (Bessat, 2003 ; Lorenzoni *et al.*, 2005), pour certains le réchauffement climatique apparaît comme un nouveau paradigme expliquant la fréquence des catastrophes hydrométéorologiques (Peltier, 2005). Dans ce contexte, la prise en compte de l'éventualité d'une modification de l'environnement apparaît indispensable, surtout depuis l'émergence des principes de précaution et de développement durable ; en effet : « *la dimension climatique, présente dans tous les secteurs d'activité, doit être prise en compte dans toute réflexion traitant du développement durable* » (Carrega *et al.*, 2004).

4.4.2. Des modèles climatiques globaux aux modèles climatiques régionaux

Un réchauffement climatique global est observé depuis maintenant plus d'une vingtaine d'années (fig. 117). Les mécanismes qui conditionnent ce réchauffement de l'atmosphère sous l'action des gaz à effets de serre sont connus depuis le début du 20^{ème} siècle grâce, entre autres, aux travaux du chimiste suédois Svante Arrhenius [1859-1927] (Bard, 2004). Mais, c'est en 1988, pour répondre aux préoccupations que soulèvent ce brusque changement d'une composante essentielle de notre environnement, que l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unis pour l'Environnement (PNUE) ont décidé conjointement la création du Groupe d'expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC ou en anglais : *Intergovernmental Panel on Climate Change* = IPCC). Ce groupe, qui associe des chercheurs d'une centaine de pays, a pour but de déterminer l'ampleur des changements climatiques à venir, leurs causes ainsi que leurs conséquences environnementales et socio-économiques.

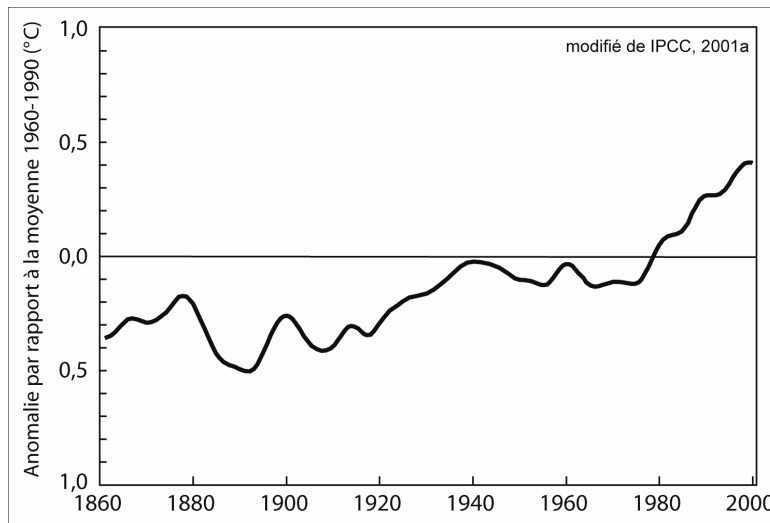


Figure 117 : évolution de la température globale (surfaces continentales) par rapport à la moyenne 1960-1990

Les prévisions à échelle globale de l'évolution future du climat sont basées sur l'utilisation d'un grand nombre de simulations informatiques qui utilisent pour la plupart les résultats des modèles de la circulation climatique générale. Les différentes simulations sont fondées sur plusieurs hypothèses de départ qui définissent la part et l'évolution des différents agents de forçages. Ces scénarii se divisent en quatre familles (A1, A2, B1, B2) selon les hypothèses d'évolutions des facteurs qui influencent l'émission de gaz à effet de serre (*i.e.* augmentation de la population mondiale, développement économique et technologique, inégalité de développement...) (IPCC, 2001a). Ces modélisations informatiques proposent un aperçu du climat planétaire à la fin du 21^{ème} siècle. Même si la résolution des modèles climatiques utilisés et la résolution temporelle des données analysées sont des éléments déterminants, qui influencent largement le résultats des calculs (Planton *et al.*, 2005), ces différents scénarii prévoient une tendance à l'augmentation des températures moyennes et extrêmes (fig. 118) ainsi qu'un accroissement du volume global des précipitations (IPCC, 2001a).

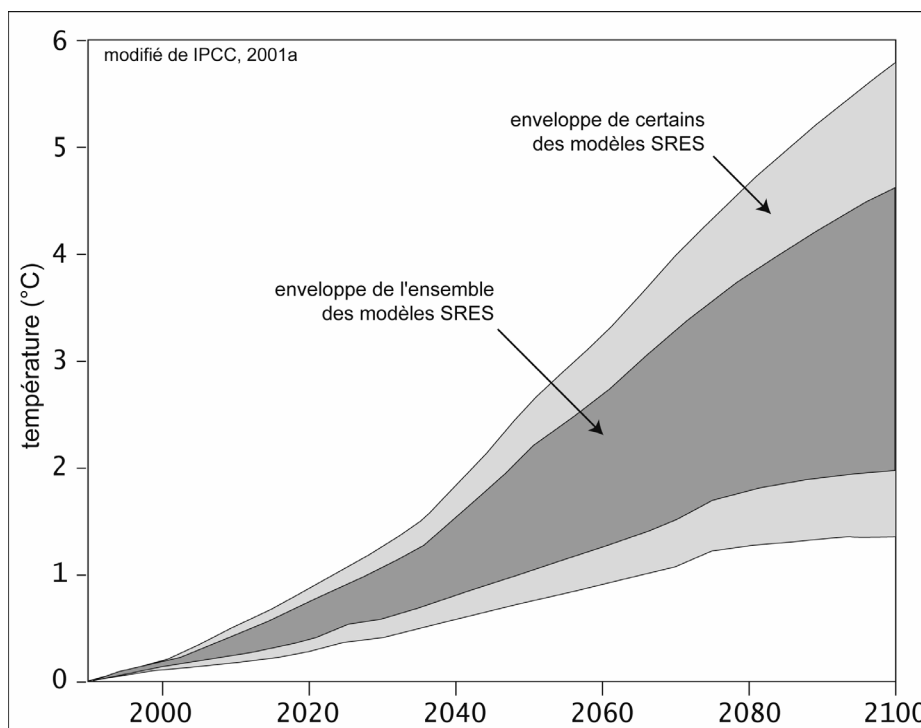


Figure 118 : modélisation de l'évolution future de la température de l'atmosphère à l'échelle planétaire ; les modèles climatiques dits SRES (Special Report on Emissions Scenarios) sont ceux exploités dans le cadre du GIEC

Par ailleurs, l'accroissement du volume des précipitations à échelle globale devrait très probablement (probabilité de 90 à 99%) s'accompagner d'une intensification des précipitations (IPCC, 2001b). Certains modèles prévoient que les valeurs extrêmes des précipitations convectives seront plus fréquentes durant la période 2071-2080 que durant la période 1981-1990 (Brinkop, 2001 in IPCC, 2001a).

Pourtant, dans le même temps, des études récentes ont permis de déterminer qu'au moment où le climat passe d'une « période froide » à une « période chaude », la fréquence des années extrêmement sèches double (Yiou et Masson-Delmotte, 2005). Cela signifie qu'à échelle globale, l'évolution climatique devrait se traduire par une augmentation du volume des précipitations annuelles moyennes caractérisée par une intensification des événements pluviométriques extrêmes mais avec une grande variabilité interannuelle.

Les progrès effectués depuis les premières tentatives de modélisation du climat futur permettent aujourd'hui de proposer des simulations à échelles régionales. Il s'agit de modèles climatiques régionaux qui sont emboîtés dans les modèles climatiques globaux. Les modèles climatiques régionaux tels que ceux employés

dans le cadre de l'ONERC⁶⁴, prévoient pour un scénario envisageant un doublement du taux de CO₂, que le climat des Alpes sera caractérisé par des hivers plus doux et humides qu'à l'heure actuelle et des étés plus chauds et secs (IPCC, 2001b). L'évolution des précipitations devrait être plus marquée durant l'hiver et l'été que durant les saisons de transitions que sont l'automne et le printemps (fig. 119).

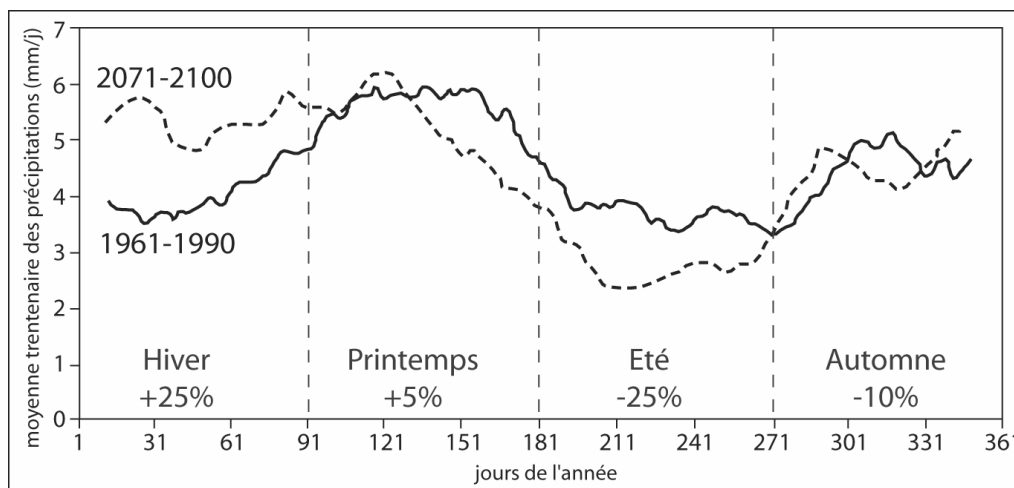


Figure 119 : évolution des précipitations dans les Alpes, moyennes sur 30 ans des précipitations journalières (d'après Beniston, 2005)

Mais la répartition géographique des modifications climatiques annoncées par les modèles est loin d'être uniforme sur l'ensemble du massif alpin. Une étude basée sur une approche statistique (*statistical-dynamical downscaling*), propose des estimations d'une grande précision (résolution de 20 km) du changement climatique pour les températures et les précipitations estivales pour la période 2071-2100 (Heimann et Sept, 2000). Ainsi, les modifications attendues sur le volume des précipitations estivales à la fin du 21^{ème} siècle devraient se manifester par une importante hausse dans la plaine du Pô et une baisse dans le couloir rhodanien (fig. 120). Dans le Briançonnais, selon cette modélisation, les changements devraient être faibles.

En ce qui concerne l'évolution de la température estivale, les modèles prévoient aussi une certaine hétérogénéité spatiale (fig. 121). Selon eux, à la fin du siècle, la vallée de la Clarée devrait connaître une importante hausse des températures estivales moyennes, avec une augmentation de l'ordre de 4,5°C.

⁶⁴ L'Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique (ORNEC) compile les résultats de simulations à l'échelle de la France et propose d'observer l'évolution de différents paramètres (température, humidité, pluviométrie...) d'ici la fin du siècle pour de nombreuses villes de France. www.onerc.gouv.fr (consulté le 30/06/06)

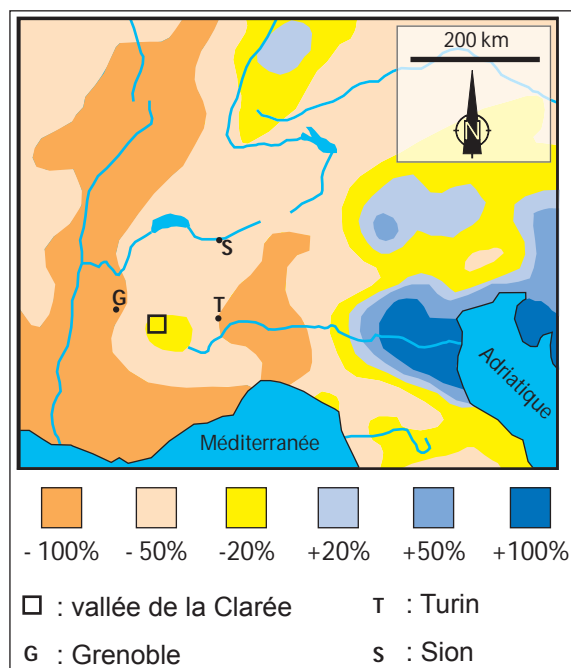


Figure 120 : évolution probable des précipitations estivales dans les Alpes, comparaison entre les précipitations estivales moyennes de 1971-2000 et 2071-2100 (modifié de Heimann et Sept, 2000)

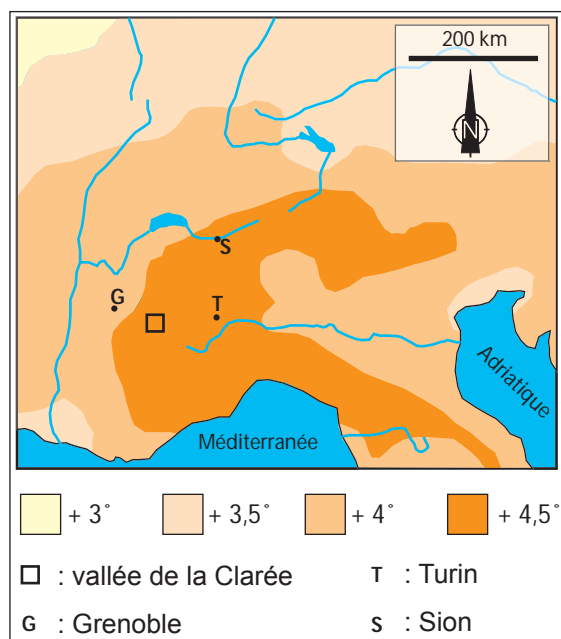


Figure 121 : évolution probable des températures estivales dans les Alpes, comparaison entre les températures estivales moyennes de 1971-2000 et 2071-2100 (modifié de Heimann et Sept, 2000)

Si la précision et la résolution des simulations informatiques du climat prévues à la fin du siècle sont de plus en plus précises, cela ne reste à l'heure actuelle que des estimations. Celles-ci permettent pourtant de dégager les grandes tendances du

climat à venir. Néanmoins, la complexité et l'interdépendance de l'environnement montagnard et du système socio-économique posent des problèmes dans les études de l'impact de ces changements climatiques (Beniston *et al.*, 1997). Malgré cela, si ces modifications climatiques prévues se confirmaient, elles auraient en tout état de cause un impact sur la dynamique des organismes torrentiels tout comme ce fut le cas durant la péjoration climatique du PAG.

4.4.3. L'évolution récente du climat local dans le secteur étudié

Les données de la station de Briançon montrent une légère tendance à l'augmentation de la température durant la décennie 1980-1990 par rapport à la moyenne 1961-2001 (fig. 122). Mais ces observations ne suffisent pas bien sûr à déterminer quelle sera l'évolution future du climat local.

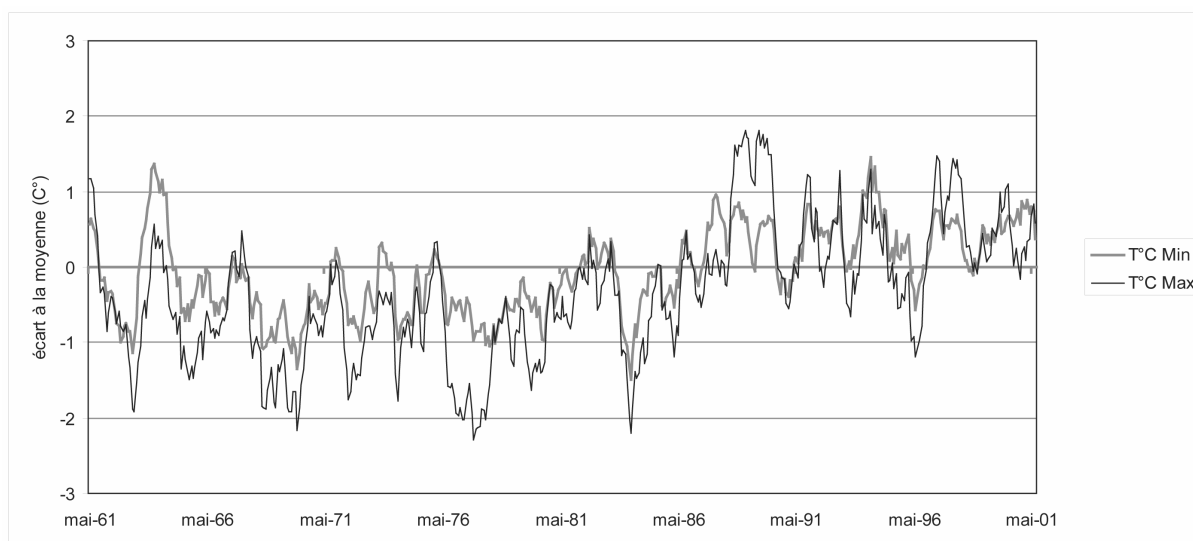


Figure 122 : évolution de la température mensuelle à Briançon
(moyenne mobile sur 10 mois des écarts à la moyenne)
source : MétéoFrance (1961-2001)

De leur côté, les données pluviométriques disponibles pour la vallée de la Clarée ne montrent pas de tendance bien nette (fig. 123).

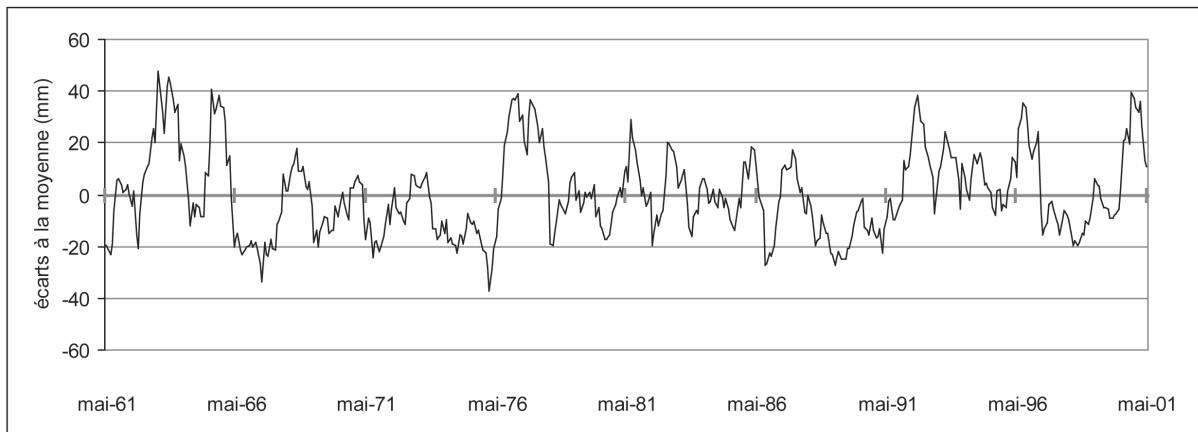


Figure 123 : évolution des précipitations mensuelles à Briançon
(moyenne mobile sur 10 mois des écarts à la moyenne)
source : Météo France (1961-2001)

Par ailleurs, contrairement à ce qui a été observé ailleurs dans les Alpes⁶⁵, on ne constate pas d'accroissement important du nombre annuel de jours de pluie supérieure à 30 mm/j qui pourrait être le signe d'une intensification des précipitations pour la période la plus récente (fig. 124). L'analyse des précipitations journalières de 1974 à 2003 pour les stations de Névache et Briançon, présente une grande irrégularité et ne met pas en évidence d'augmentation de la fréquence des épisodes pluvieux supérieur à 30 mm/j.

Toutefois, il convient de pondérer les effets directs de l'accroissement prévu des précipitations intenses sur la fréquence des crues torrentielles dans le secteur étudié. Nous avons en effet démontré que le déclenchement des crues torrentielles dans la vallée de la Clarée est plus lié aux précipitations orageuses estivales qu'aux épisodes pluvieux supérieurs à 30 mm/j⁶⁶. Néanmoins, le rôle des épisodes pluvieux intenses reste important dans le fonctionnement des torrents, ceux-ci peuvent largement participer à la recharge des lits torrentiels.

⁶⁵ Différentes études soulignent l'accroissement de la fréquence des précipitations extrêmes dans les Alpes durant le 20^{ème} siècle (Rebetez *et al.*, 1997 ; Brunetti *et al.*, 2001 ; Jomelli *et al.*, 2004).

⁶⁶ L'analyse croisée des données pluviométriques et du recensement des crues torrentielles montre que les épisodes pluvieux supérieurs à 30 mm/j surviennent principalement en septembre, octobre et novembre alors que les jours de crues torrentielles se concentrent surtout en juin et juillet, période la plus propice aux précipitations orageuses (cf. 3.2.2.2.).

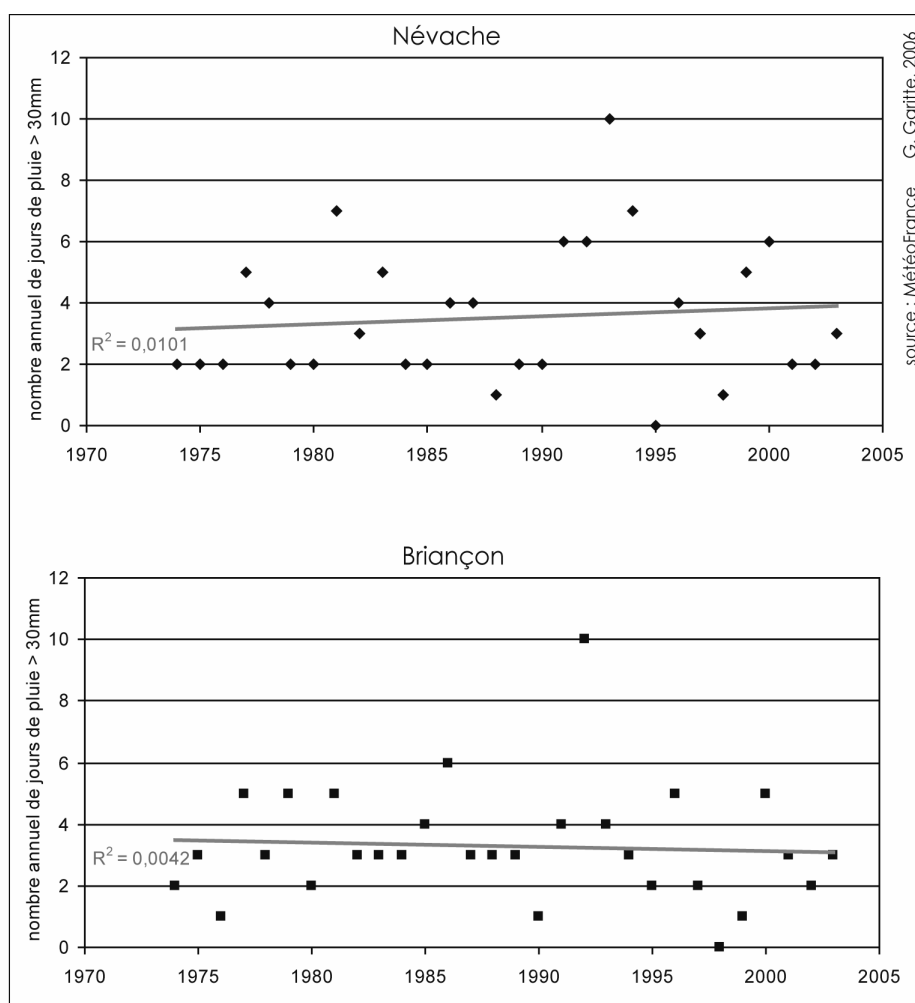


Figure 124 : évolution du nombre annuel de jours de pluie supérieure à 30 mm 1974-2003 ; source : Météo France

L'analyse de l'évolution de la fréquence des précipitations orageuses, dont le rôle est démontré dans le déclenchement des crues torrentielles, ne permet pas de faire ressortir une tendance. Le relevé de l'occurrence des orages à Briançon montre en fait une grande variabilité interannuelle (fig. 125). Cependant, ces données ne renseignent que sur la fréquence des orages mais ni sur leur intensité ni sur le volume précipité.

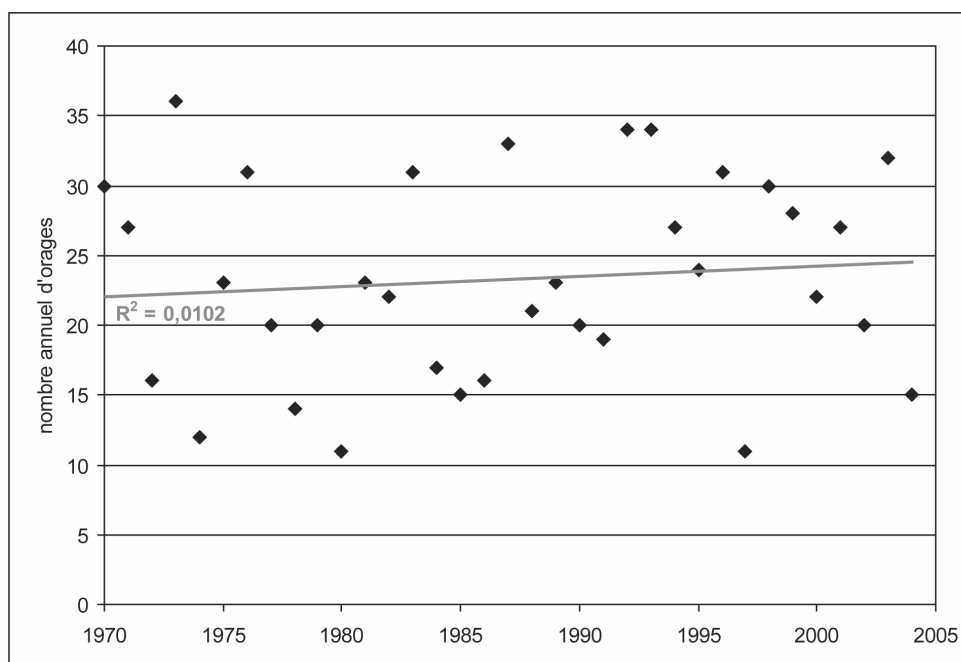


Figure 125 : évolution du nombre annuel d'orages à Briançon 1970-2004 ; source : CEMBREU

Bien que l'on constate de franches évolutions environnementales dans la vallée de la Clarée, il n'apparaît pas possible de faire ressortir une tendance nette concernant l'évolution du climat local depuis une trentaine d'années. Toutefois, ces observations limitées à deux stations météorologiques ne préjugent nullement des évolutions futures du climat local.

4.4.4. Impacts envisageables du réchauffement climatique annoncé sur le cycle de l'eau

→ Les modifications du volume des précipitations neigeuses

Dans les Alpes, les chutes de neige représentent la majeure partie des précipitations hivernales. La hausse de la température pourrait largement modifier le volume et le rythme des précipitations neigeuses en augmentant la part des précipitations liquides, en particulier au printemps. De façon schématique, pour chaque augmentation de la température moyenne de 1°C, la limite pluie/neige s'élève de l'ordre de 150 m. Cependant, l'augmentation des températures minimales a plus d'incidence que la hausse des températures maximales (Keller et Goyette, 2005). La hausse des températures aurait pour résultats : moins d'accumulation de neige aux basses altitudes mais plus de neige au dessus de la limite pluie/neige du fait de l'augmentation prévue des précipitations hivernales (IPCC, 2001b). Les différentes modélisations disponibles prédisent toutes une baisse

de la durée annuelle du manteau neigeux⁶⁷. Cette réduction de la durée de la couverture neigeuse, calculée pour plusieurs stations des Alpes autrichiennes, pourrait atteindre 34 à 46% pour une augmentation de la température européenne moyenne de 1°C (Hantel *et al.*, 2000), plus de 66 jours pour un site à 1550 m d'altitude dans les Alpes françaises avec doublement du CO₂ (Martin *et al.*, 1997). Cette modification dans le volume et la répartition de la neige pourrait avoir plusieurs conséquences sur le cycle de l'eau. On pourrait ainsi observer une hausse des débits hivernaux à cause de l'augmentation relative des précipitations liquides, et une baisse correspondante des débits printaniers à cause de la baisse du stock global de neige suite à l'élévation de la limite pluie/neige.

Par ailleurs, l'accroissement des températures pourrait aussi entraîner une augmentation du risque de déclenchement d'une crue torrentielle en cas de fonte rapide du manteau neigeux au printemps. Ces crues liées à une fonte rapide du manteau neigeux sont actuellement rares dans la vallée de la Clarée, mais le rôle de la neige dans le déclenchement des crues torrentielles a été observé aux hautes latitudes (Decaulne *et al.*, 2005) et dans les Alpes suisses (Bardou *et al.*, 2002 ; Bardou et Delaloye, 2004). Par ailleurs, ce type de situation météorologique peut être à l'origine de crues très importantes comme par exemple celle de juin 1957 dans le Briançonnais et le Queyras (Tricart, 1960).

→ L'accroissement des précipitations intenses

Les modélisations prévoient que le réchauffement global s'accompagnera d'une intensification des précipitations dans la région alpine. Or, les observations menées en Italie du nord sur la période 1834-1998 montrent déjà que la tendance à l'augmentation du volume annuel des précipitations s'accompagne d'une augmentation du nombre de jours de pluie dans la classe d'intervalle la plus élevée –nombre de jours de pluie compris entre 25 et 50 mm et supérieur à 50 mm/j– (Brunetti *et al.*, 2000). D'autres études, menées dans le même secteur, confirment ces résultats et concluent que l'accroissement de l'intensité des précipitations est dû à une augmentation des événements pluviométriques extrêmes et à une baisse des événements non extrêmes (Brunetti *et al.*, 2001). Ces résultats ont été réaffirmés pour des stations météorologiques proches de la vallée de la Clarée : Jomelli *et al.* (2004) ont constaté une augmentation significative des événements pluvieux supérieurs à 30 mm par jour depuis 1980. Et comme le déclenchement des crues torrentielles n'est pas lié aux précipitations moyennes mais bien aux événements extrêmes, cela signifie que si cette tendance se confirme, on pourrait observer à l'avenir une augmentation de la fréquence des précipitations susceptibles de déclencher des crues torrentielles.

⁶⁷ Au-delà de ses conséquences sur le cycle de l'eau, la baisse de la durée annuelle du manteau neigeux pourrait avoir des implications économiques fortes sur les activités touristiques hivernales (Loubier, 2004).

In fine, il reste difficile de déterminer avec précision quelle sera l'évolution future de l'intensité et de la fréquence des précipitations extrêmes à partir de l'analyse de séries météorologiques anciennes, d'autant que les effets du réchauffement climatique apparaissent plus importants dans les dernières décennies (IPPC, 2001b). Par ailleurs, les simulations informatiques tentent de prévoir le climat à venir, or le climat désigne l'état habituel de l'environnement climatique que l'on décrit par la moyenne des caractéristiques météorologiques sur une période de référence (normale climatique = 30 ans), ces modélisations apparaissent donc peu adaptées pour prévoir les événements ponctuels (Jacques et Le Treut, 2004). De fait, le troisième rapport du GIEC souligne dans ses conclusions que « les événements extrêmes sont plus difficiles à modéliser et à caractériser que les climats moyens » (traduit de IPCC, 2001b ; p. 955). Le manque de résolution dans la modélisation des événements extrêmes (Planton *et al.*, 2005) et l'absence de prévision de l'évolution de la fréquence et de l'intensité des précipitations orageuses –qui constituent les principaux événements hydrométéorologiques déclenchant les crues torrentielles– apparaissent donc comme une limite à la prévision de la dynamique torrentielle dans le futur.

4.4.5. Impacts envisageables du réchauffement climatique annoncé sur la végétation

Il est probable que les changements climatiques, prévus par les modèles informatiques, modifient le paysage végétal des vallées alpines. Mais ces évolutions, qui touchent à la fois l'extension et la composition des peuplements végétaux, interviendraient à des échelles de temps différentes. Dans un premier temps des évolutions chorologiques –c'est-à-dire dans la répartition des espèces végétales– pourraient avoir lieu, et ce, en fonction de l'intensité et de la vitesse du changement climatique. En ce qui concerne l'évolution de l'extension de la couverture forestière, des changements pourraient aussi intervenir, mais à un rythme plus lent compte tenu de la vitesse de croissance des espèces ligneuses. Par ailleurs, ces modifications dépendent ici à la fois de facteurs climatiques et anthropiques.

→ L'évolution de la limite de l'arbre

Une des conséquences attendues de l'augmentation de la température annuelle moyenne pour la végétation de montagne est l'élévation de la limite de la végétation (Theurillat et Guisan, 2001). Cependant, au-delà des tendances moyennes, ce sont les températures extrêmes qui constituent les principaux facteurs déterminant la localisation des espèces végétales. La température minimale, qui détermine la survenue du gel, limite la croissance végétale ; alors que la

température estivale a un rôle majeur dans l'évapotranspiration (Körner *et al.*, 1993 et Guisan *et al.*, 1995 in Arques, 2005). L'étagement biologique est fortement dépendant du gradient de décroissance thermique, mais dépend aussi de conditions stationnelles (exposition, position d'abri), ce qui signifie que certaines particularités locales peuvent contredire les tendances régionales (Didier et Brun, 1998).

Les études paléo-écologiques ont permis de retracer les grandes étapes de l'évolution de l'extension et de la composition des formations végétales au cours de l'Holocène. Dans le passé, la végétation établie sur les versants a déjà largement évolué, tant en altitude qu'en composition. Au cours de l'Holocène, durant les périodes les plus chaudes et les plus propices à l'extension de la végétation, la limite supérieure de l'arbre dans la région étudiée se situait environ 250 à 300 m au dessus de sa position actuelle (Talon *et al.*, 1998 ; Carnelli *et al.*, 2004).

Or, l'évolution de la limite altitudinale de certains végétaux a déjà été observée au cours du 20^{ème} siècle. Des études menées dans les Alpes suisses (Grabherr *et al.*, 1994), ont permis de constater que depuis le début du 20^{ème} siècle près de 70% des espèces de flores alpines étudiées ont connu une migration en altitude avec des vitesses extrêmes supérieures à 4m par décennie pour une moyenne inférieures à 1m par décennie. Si l'on rapporte ces vitesses à l'augmentation de la température depuis le début du 20^{ème} –de l'ordre de 1 à 2°C– cela signifie que si les plantes répondaient immédiatement à la hausse de la température, une migration de 15 m par décennie pourrait être atteinte (Keller *et al.*, 2000 a). Néanmoins, l'élévation de la température prévue par les modèles ne signifie pas forcément une extension de l'aire de répartition de l'ensemble des espèces végétales. Une étude modélisant l'évolution probable des aires de répartition de 62 espèces végétales de l'étage montagnard à l'étage alpin, montre au contraire, que la majorité d'entre elles vont connaître une réduction de leur aire de répartition voire une extinction et ce quel que soit le scénario de réchauffement utilisé (Guisan et Theurillat, 2000). Beniston (2003) souligne en effet l'individualisme de la réponse des espèces végétales à l'évolution des températures et des précipitations.

A l'heure actuelle, les résultats concernant l'élévation de la localisation des espèces ligneuses sont tout aussi contrastés. Les études menées en Suisse sur la zone de contact entre pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) et pin cembro (*Pinus cembra*) n'ont montré aucun changement notable et ce malgré une hausse de la température estivale moyenne de 0,8°C depuis 30 ans (Hättenschwiler et Körner, 1995).

Comme on le voit, l'accroissement possible de la couverture forestière par la remontée de la limite supérieure de l'arbre suite à l'augmentation de la température annuelle moyenne doit être pondéré. La présence de nombreux secteurs asylvatiques, comme les versants où la pente est forte (>40°) réduit l'extension

possible de la forêt. Ces secteurs en forte pente peuvent aussi jouer le rôle de barrière et empêcher la migration de la végétation vers l'amont (Theurillat et Guisan, 2001). De plus, l'absence de sol –au sens pédologique– aux hautes altitudes implique une certaine inertie avant l'établissement d'une végétation forestière climacique (Didier et Brun, 1998) ; selon P. Ozenda (1985), il faut au moins 200 ans pour que se forme un sol évolué de type podzol, qui éliminera les espèces pionnières.

Enfin, il faut aussi noter que les changements dans la limite altitudinale de l'arbre dépendent aussi de facteurs anthropiques. La persistance de vastes alpages peut être une limite à l'extension altitudinale des peuplements forestiers. Pour les communes de Névache et Val-des-Prés la location des alpages, qui occupaient en 1997 plus de 11 500 ha, correspond à une activité économique importante. Le développement de la végétation dans ces secteurs qui se situent actuellement majoritairement au dessus de la limite de l'arbre⁶⁸, se trouverait freiné par la concurrence avec l'activité pastorale.

→ Le problème de stress hydrique posé par les changements dans le cycle de l'eau et l'augmentation de l'évapotranspiration

L'évolution prévue du cycle de l'eau, suite au réchauffement climatique, va avoir des effets directs sur le développement de la végétation. La réduction de la durée de la couverture neigeuse va menacer les espèces végétales qui se développent dans les combes à neige et les dépressions humides (Ozenda et Borel, 1991 in Beniston, 2003). Elle peut aussi avoir des conséquences néfastes pour certaines espèces ligneuses comme le pin mugo (*Pinus mugo*) dont la croissance dépend de conditions climatiques continentales avec une longue période de couverture neigeuse (Second National Communication on Climate, 1997).

De plus, la hausse des températures a tendance à modifier le cycle saisonnier des végétaux. On observe ainsi un allongement de la durée végétative annuelle au niveau européen de l'ordre de 10,8 jours entre 1959 et 1993 (Menzel et Fabian, 1999 ; Keller *et al.*, 2000 b). Il apparaît, en effet, que parmi la végétation des Alpes suisses, de très nombreuses espèces connaissent un développement printanier de plus en plus précoce en raison de l'augmentation de la température (Studer *et al.*, 2005). Cet allongement de la période végétative va entraîner un accroissement de l'évapotranspiration annuelle (Beniston, 2003). Ajouté à la baisse prévue du volume des précipitations estivales, ce phénomène engendre un risque de stress hydrique dont les conséquences pourraient être délétères pour certaines espèces ligneuses, en particulier au cours de la reproduction, lors de la période critique de la germination.

⁶⁸ Actuellement la limite supérieure de l'arbre se situe entre 2100 et 2200 m sur les versants en adret.

De fait, des taux de mortalité particulièrement élevés ont été observés sur des peuplements de pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) dans les Alpes Suisses (Rebetez et Dobbertin, 2004). Les auteurs attribuent directement cette hausse de la mortalité à l'augmentation de l'évapotranspiration en particulier durant les années sèches, telles que 1998, qui engendrent un stress hydrique important. En France aussi, des taux de mortalité élevés ont été constatés chez les pins sylvestres des Alpes du sud (DGFAR, 2004). Cette surmortalité est parfois attribuée aux effets de la sécheresse associée à la canicule d'août 2003 ou de juillet 2006. Et si ces événements exceptionnels ne sont pas forcément directement liés au réchauffement global, certains y voit néanmoins un aperçu des futurs effets des changements climatiques en cours (Beniston, 2004 ; Beniston et Diaz, 2004 ; Schär *et al.*, 2004).

Une autre conséquence de cet accroissement du stress hydrique est l'augmentation du risque d'incendie. La vallée de la Clarée regroupe plusieurs facteurs susceptibles de favoriser les feux de forêts : larges peuplements de conifères, forte fréquentation touristique estivale et relief accidenté qui entrave le travail des pompiers. Même si des mesures sont prises pour limiter le déclenchement des incendies, par exemple en interdisant tous feux de camps, ce risque est bien réel. Durant l'été 2003, plusieurs incendies de forêts ont touché le Briançonnais (l'Argentière-la-Bessée, Vallouise). Or, ces feux de forêt peuvent largement influencer le déclenchement et la magnitude des crues torrentielles. Les incendies apparaissent comme un agent hydrologique et géomorphologique efficace. Ils agissent directement en provoquant une météorisation des roches affleurantes (Shakesby et Doerr, 2006), et indirectement en détruisant la végétation et la litière, ce qui entraîne une réduction de l'infiltration et favorise le ruissellement (Conedera *et al.*, 2003). Les bassins-versants torrentiels récemment incendiés sont donc plus sensibles aux précipitations intenses (Cannon et Reneau, 2000 ; Cannon *et al.*, 2001).

→ Les effets du changement climatique sur le développement des parasites

La hausse attendue des températures hivernales entraîne une autre menace pour les peuplements forestiers alpins. Il a été démontré dans les Alpes suisses que la douceur hivernale favorise le développement des coléoptères xylophages (Rebetez et Dobbertin, 2004). La hausse des températures hivernales est aussi déterminante dans l'augmentation de l'extension et l'intensité du développement du gui (*Viscum album ssp. austriacum*) qui parasite de plus en plus d'arbres dans les Alpes suisses (Dobbertin *et al.*, 2005). Néanmoins, la prolifération des parasites ne peut impliquer, à elle seule, le dépérissement de certains peuplements forestiers, mais c'est bien la conjugaison des différents facteurs susnommés qui explique cet affaiblissement.

→ Changement dans la composition des formations végétales

L'ensemble des conditions défavorables à la croissance des espèces ligneuses autochtones devrait conduire à une mutation lente mais importante de la composition des peuplements forestiers alpins. Ainsi, il a déjà été observé dans les Alpes suisses que, sur une parcelle donnée, la probabilité de trouver des espèces adaptées aux conditions plus chaudes a augmenté depuis 1930 tandis que celle de trouver des espèces préférant les conditions fraîches a baissé (Keller *et al.*, 2000 b).

Dans la basse vallée de la Clarée, les forêts sont principalement composées de pin à crochet (*Pinus incinata*) et de pin sylvestre (*Pinus sylvestris*). La haute vallée, quant à elle, comporte surtout des peuplements de mélèze (*Larix decidua*). Ces forêts pourraient connaître d'importants changements dans leur composition. A l'étage subalpin, la compétition entre les espèces ligneuses en réponse aux modifications environnementales pourrait favoriser les essences caducifoliées au détriment des conifères (Theurillat et Guisan, 2001). Les espèces adaptées aux conditions fraîches laisseraient progressivement place à des espèces caducifoliées telles que le chêne pubescent (*Quercus pubescens*) mieux adapté au type de climat prévu par les modèles (Rebetez et Dobbertin, 2004).

4.4.6. Impacts envisageables du réchauffement climatique annoncé sur les processus morphoclimatiques

Comme les processus géomorphologiques sont largement influencés par le climat, le réchauffement global et ses répercussions sur les caractéristiques climatiques locales devraient avoir des conséquences sur plusieurs processus influençant la dynamique torrentielle (Eybergen et Imeson, 1989).

L'augmentation attendue des températures moyennes devrait entraîner une remontée de l'altitude de la cryosphère avec des conséquences directes sur l'aire d'efficacité de processus tels que la gélifraction ou la gélifluxion. Une baisse du nombre de jours de gel a d'ailleurs été observée dans le Briançonnais : à Monêtier-les-Bains celui-ci a connu une baisse l'ordre de 14% depuis le début des années 1980 (Jomelli *et al.*, 2004). Compte tenu des nombreux facteurs qui déterminent la fracturation des roches par la gélifraction, il est difficile de prévoir quelle sera la portée de la remontée de la cryosphère sur la production globale de gélifractions. En effet, l'intensité de la gélifraction ne va pas seulement dépendre de la température de l'air, mais aussi de conditions stationnelles, telles que l'insolation, la disponibilité en

eau, les propriétés de la roche (*i.e.* porosité, fissuration, conductivité...)(Francou, 1993).

L'accroissement du volume annuel des précipitations pourrait avoir un effet sur l'activité des versants en glissement. Il est envisageable que les conditions étant *a priori* plus favorables, cela entraînerait une augmentation des mouvements de terrains actifs (IPCC, 2001b). Pourtant, les rares études traitant spécifiquement de l'impact du changement climatique sur les mouvements de terrains dans les Alpes ne permettent pas de conclure si l'occurrence de réactivation des mouvements de terrain sera sensiblement plus forte à l'avenir (Dehn et Buma, 1999 ; Buma et Dehn, 2000). Toutefois, ces mêmes études soulignent aussi l'incertitude de leurs résultats car l'activité des mouvements de terrains dépend du climat local qu'il est difficile d'appréhender à partir de modèles à échelle globale. Les glissements de terrain présents dans la vallée de la Clarée sont, pour la plupart, peu ou pas actifs. Ils sont néanmoins susceptibles d'alimenter en matériaux plusieurs organismes torrentiels à la faveur d'une réactivation locale en particulier dans les talwegs torrentiels (cf. 3.2.1.2.).

4.4.7. Impacts envisageables du réchauffement climatique annoncé sur la dynamique torrentielle : les limites de la prospective

La prospective est la discipline qui se propose d'étudier les évolutions futures des systèmes sociaux et naturels (Berger G., 1960). Cependant, imaginer les futurs possibles de la dynamique torrentielle peut paraître une gageure tant les paramètres à prendre en compte sont complexes et interagissent ensemble.

L'impact du réchauffement climatique se fait déjà ressentir sur la dynamique de la végétation à l'étage alpin ; si ces modifications environnementales se confirmaient, elles pourraient changer le rapport entre flux solides et flux liquides, affectant de fait la dynamique des cours d'eau. Cependant, déterminer l'impact des changements environnementaux sur la dynamique torrentielle est un exercice difficile. Il ne s'agit pas de dire si dans cinquante ans l'activité des torrents sera plus ou moins intense qu'à l'heure actuelle en ne se fondant que sur des modélisations climatiques. Pourtant, il est possible de déterminer si les changements environnementaux auront un impact plutôt favorable ou défavorable à l'activité torrentielle. Il réside encore une difficulté majeure qui est de quantifier la part respective de chaque facteur dans l'activité torrentielle. Si les effets du réchauffement climatique sur la dynamique torrentielle sont particulièrement

difficiles à prévoir, il est néanmoins possible d'échafauder plusieurs scénarii selon la vitesse du changement climatique attendu.

4.4.7.1. Dans l'hypothèse d'un changement climatique lent

Tout d'abord, si la vitesse du changement climatique est modérée, il est probable que les nouvelles conditions climatiques soient globalement défavorables à l'activité torrentielle. Bien que l'intensification des précipitations soit un paramètre particulièrement favorable à l'activité torrentielle, elle pourrait aussi entraîner une augmentation du transit sédimentaire et aboutir à terme, à une réduction des stocks sédimentaires. De plus, plusieurs modifications environnementales pourraient contrecarrer les effets de l'intensification des précipitations sur la dynamique torrentielle.

L'augmentation du taux de CO₂ dans l'atmosphère devrait avoir un effet positif sur la productivité végétale à échelle globale. Cette croissance pourrait même s'accompagner de augmentation de 20 à 30% des rendements agricoles dans certaines régions du globe (FAO, 1997). Dans les Alpes, l'augmentation du taux de CO₂ dans l'atmosphère devrait favoriser la croissance des arbres dont certaines espèces de conifères comme le mélèze (*Larix decidua*) (Keller *et al.*, 2000 b), et, conjugué aux effets de l'augmentation de la température, permettre une extension des zones sylvatiques. Ce développement de la couverture forestière contribuerait à réduire l'érosion et le transit des matériaux sur les versants. De plus, la remontée en altitude de la cryosphère pourrait conduire à une réduction de la météorisation sur les versants d'altitude. En fait, l'augmentation annoncée de la température pourrait aboutir, toutes proportions gardées, à des conditions environnementales proches de celles qui prévalaient durant le stade Atlantique (8000-5000 BP), parfois qualifié d'Optimum Climatique Holocène (Leroux, 2002), même si à l'époque la concentration en CO₂ de l'atmosphère était relativement faible, de l'ordre de 280 p.p.m. contre environ 380 p.p.m. aujourd'hui (Guiot *et al.*, 1999). A cette époque, les conditions climatiques étaient globalement plus chaudes –de l'ordre de 2 à 3°C en Europe occidentale– et plus sèches à cause d'une plus forte évapotranspiration (Prentice *et al.*, 1999), et ont permis, au terme de plusieurs siècles, un large développement de la végétation. En effet : « *la reconquête forestière s'affirme dès le Tardiglaciaire et trouve son apogée au cours de la période Atlantique. Des sols forestiers profonds et évolués se développent jusqu'au sommet de l'étage subalpin dont la limite supérieure est plus élevée qu'aujourd'hui* » (Jorda et Provansal, 1996). Dans le secteur étudié, durant cette période, le lac de Cristol (2250 m, haute vallée de la Clarée), se trouvait sous la limite de l'arbre. La couverture forestière était alors principalement constituée par des peuplements de bouleau (*Betula*) avant

l'apparition de mélèze (*Larix decidua*) puis de pin cembro (*Pinus cembra*) (Fauquette et Talon, 1995 ; Nakagawa *et al.*, 2000). Selon Theurillat et Guisan (2001), si la température augmentait de plus de 2°C et se maintenait pendant plusieurs siècles, il serait possible que la forêt se développe à des altitudes supérieures à ce qui a été observé depuis la dernière glaciation. Donc, même si l'extension de la couverture forestière est subordonnée à l'émergence d'une période de stabilité climatique, on est bien loin des visions catastrophistes liées au réchauffement de l'atmosphère puisque l'Optimum Climatique Holocène est une période associée à une accalmie torrentielle marquée à l'échelle des Alpes (Ballandras, 1997).

Pourtant, cette baisse probable de l'activité torrentielle au niveau régional doit être interprétée avec circonspection. La présence d'une couverture forestière dense est un facteur qui tend à réduire l'érosion et le transit sédimentaire sur les versants (Rey, 2002 ; Andréassian, 2002), toutefois elle ne garantit pas pour autant la stabilité des versants. En 1996, dans le nord de l'Italie, un violent épisode hydrométéorologique a déclenché de très nombreuses coulées et glissements superficiels sur des versants pourtant occupés par une forêt de châtaignier (d'Amato-Avanzi *et al.*, 2004). Par ailleurs, les analyses chronostratigraphiques menées dans les Alpes du sud ont clairement démontré que même au cœur de l'Optimum Climatique Holocène les torrents demeuraient le siège d'épisodes de laves torrentielles (Flez et Lahousse, 2004b). Enfin, même si l'augmentation de la couverture végétale et la remontée de la cryosphère contribuent à réduire le transit sédimentaire sur les versants et donc le volume de matériaux mobilisables par les torrents, compte tenu de l'intensification prévue des précipitations, les conditions nécessaires au déclenchement régulier des crues torrentielles devraient toujours être réunies dans le cas des torrents les plus abrupts (coefficient de Melton > 0,8 ; cf. 1.6.) tels que le Ravin de l'Enrouye ou le Ravin de Combal.

4.4.7.2. Dans l'hypothèse d'un changement climatique rapide

Comme dans le scénario d'un changement climatique lent, l'intensification annoncée des précipitations va jouer un rôle majeur dans la future dynamique torrentielle en cas de forte modification des conditions climatiques locales. De plus, si le réchauffement global attendu est brusque et intense, marquant ainsi une rupture climatique, il est probable que les sylvosystèmes actuels subissent une mortalité importante. Les peuplements forestiers dans la vallée de la Clarée sont principalement composés de conifères : pin sylvestre (*Pinus sylvestris*), pin à crochet (*Pinus uncinata*) et mélèze (*Larix decidua*), qui sont des essences mal adaptées à un stress hydrique prolongé. Par ailleurs, l'inertie des espèces ligneuses vis-à-vis du changement climatique implique que, si le réchauffement est intense et brutal, les

peuplements forestiers en particulier auront du mal à s'adapter. Un rapide changement climatique pourrait donc se traduire par une période de transition caractérisée par une réduction de la couverture forestière. Cette phase de transition serait comprise entre le dépérissement de certaines espèces actuelles qui subiraient pleinement les modifications climatiques, et la colonisation des secteurs abandonnés par des espèces mieux adaptées aux nouvelles conditions de température et d'humidité en particulier.

Dans l'hypothèse d'une évolution rapide du climat, il apparaît difficile de déterminer si les impacts du réchauffement global sur l'environnement seront favorables ou non à l'activité torrentielle. Il y a une incertitude quant à l'évolution du volume de matériaux qui transite sur les versants. Certains facteurs comme l'augmentation de la température ou la remontée des zones sylvatiques prédisent une baisse de l'érosion et du transit de matériaux sur les versants. D'un autre côté, le stress hydrique, qui pourrait affecter les peuplements de conifères, risque d'accroître les conditions favorables à l'érosion et au transit sur les versants. Quoiqu'il en soit, les différents éléments réunis laissent penser qu'il est probable que l'activité torrentielle se trouverait renforcée durant la période de transition. La durée de cette phase est difficile à prévoir, celle-ci dépend avant tout du temps que mettront les peuplements végétaux et forestiers à s'adapter aux nouvelles conditions climatiques et aussi des mesures qui pourraient être entreprises pour maintenir, entretenir ou renouveler les peuplements forestiers.

4.4.7.3. *Les limites de l'approche prospective*

Comme nous l'avons vu précédemment, les torrents sont particulièrement sensibles aux fluctuations de leur environnement (cf. 2.5.3.). Or, les modifications climatiques et leurs conséquences peuvent être multiples. De ce fait les résultats de l'approche prospective se montrent ambigus (fig. 126).

- L'accroissement prévu de la fréquence des précipitations intenses pourrait conduire à une plus grande occurrence des conditions favorables au déclenchement des crues torrentielles. Dans le même temps, ces fortes précipitations pourraient aussi faciliter un transit sédimentaire régulier dans les bassins-versants torrentiels et ainsi réduire la constitution de stocks de matériaux indispensables au déclenchement des laves torrentielles de forte magnitude.

- L'augmentation de la température moyenne devrait conduire à une élévation de la limite supérieure de l'arbre et à un accroissement de la surface végétalisée, à l'échelle d'un ou deux siècles, laissant présager une stabilisation des sources sédimentaires. Pourtant, à plus court terme, l'intensification de l'évapotranspiration suite à l'augmentation de la température moyenne, conjuguée à la réduction de la durée saisonnière du manteau neigeux, pourrait s'avérer néfaste pour les peuplements forestiers actuels. Une hausse importante de la mortalité chez les espèces végétales autochtones faciliterait le transit sédimentaire sur les versants, avant le développement d'une couverture végétale mieux adaptée aux nouvelles conditions climatiques.

- En ce qui concerne les processus morphologiques, la remontée en altitude de la cryosphère, suite à l'augmentation de la température moyenne, devrait conduire à une baisse de la production de gélifracts. Néanmoins, ces matériaux ne constituent qu'une fraction de l'ensemble des matériaux mobilisables dans les systèmes torrentiels. Par contre, l'accroissement de l'intensité des précipitations pourrait se traduire par une possible réactivation des glissements de terrain qui sont aujourd'hui inactifs ainsi qu'une augmentation du ruissellement et du transit sédimentaire sur les versants.

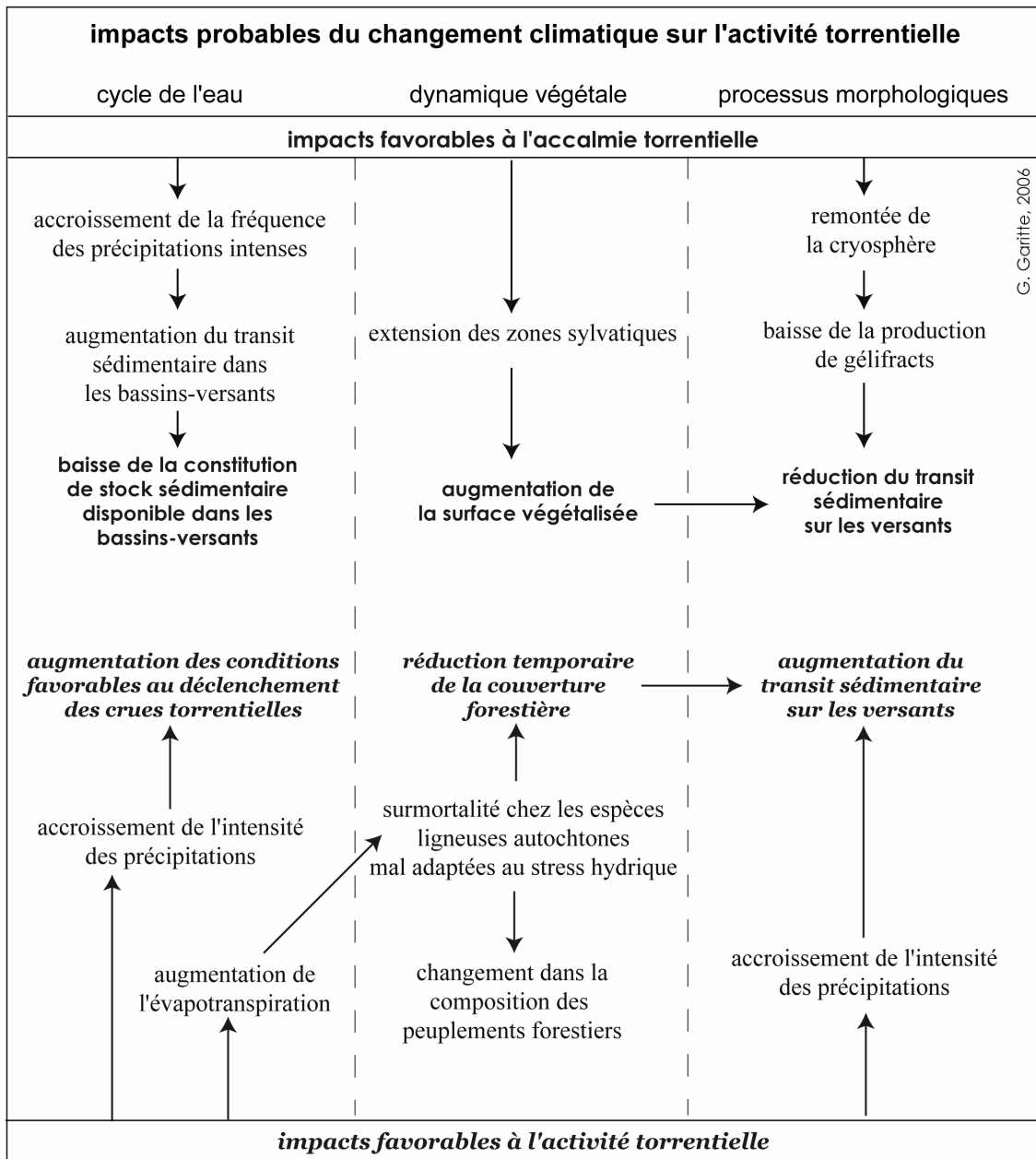


Figure 126 : les impacts probables du changement climatique sur l'activité torrentielle : les limites de l'approche prospective.

Il existe donc une grande incertitude quant à l'évolution prochaine de la dynamique torrentielle. Selon la vitesse et l'intensité des changements climatiques prévus, leurs conséquences sur l'activité torrentielle seraient différentes. Dans le cas de changements environnementaux réguliers, on observerait une tendance à l'accalmie sur la plupart des organismes torrentiels, à l'exception des torrents associés à des bassins-versants abrupts. Cependant, si les changements environnementaux sont rapides, cela pourrait se marquer par une réactivation temporaire de l'activité torrentielle qui marquerait alors une rupture avec une

tendance séculaire à la rétraction des bandes actives torrentielles entamée dès la fin du 19^{ème} siècle (cf. 2.3.).

Le Réchauffement Global et ses conséquences sur le climat local devraient sans aucun doute modifier l'environnement avec donc des conséquences sur la dynamique torrentielle. Les périodes de transitions apparaissent souvent comme des périodes d'instabilité. Néanmoins, la nature exacte et l'ampleur de ces modifications sont difficiles à prévoir d'autant qu'elles sont dépendantes de l'intensité et de la rapidité des changements climatiques annoncés. Mais comme « il est peu probable que les futurs changements associés au Réchauffement Global observé actuellement soient réguliers » (traduit de Lockwood, 2001), il est vraisemblable que l'impact du Réchauffement Global sur la dynamique des torrents soit important.

Cette grande incertitude quant à l'évolution future de la dynamique torrentielle, devrait conduire l'ensemble des acteurs qui participent à l'aménagement des vallées alpines à tenir compte d'une certaine prudence dans leurs politiques d'aménagement. En effet, l'intensité de l'impact du réchauffement global va dépendre à la fois de l'amplitude du changement climatique et de la capacité de la société à s'adapter (Niemeyer et al., 2005).

4.5. Vers une gestion durable du risque torrentiel

4.5.1. Comment appliquer les principes de développement durable pour qu'émerge une gestion durable du risque torrentiel ?

Bien qu'elle connaisse depuis un peu plus de trente ans une mutation socio-économique qui conduit à l'extension des enjeux à proximité des torrents, la vallée de la Clarée est encore peu urbanisée en comparaison de certaines vallées occupées par de vastes stations touristiques, comme Serre-Chevalier par exemple. Cela renforce l'intérêt d'un diagnostic précoce des paramètres qui influencent le risque torrentiel.

La notion de développement durable se définit comme étant la capacité de rendre le développement durable en s'assurant que la satisfaction des besoins présents ne compromettent pas la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins⁶⁹ (fig. 127).

Depuis 1980 et l'émergence du principe de développement durable dans la sphère écologique et de protection de la nature (UICN, 1980), celui-ci s'est étendu jusque dans la politique nationale d'aménagement du territoire en 2000⁷⁰ (Scarwell et Laganier, 2004). De même, la loi dite « loi montagne » de 1985 reconnaît la spécificité des régions de montagne et précise qu'elles « nécessitent la définition et la mise en oeuvre d'une politique spécifique de développement ». Si à l'époque le législateur ne parle pas encore explicitement de développement durable, cette notion y sera clairement intégrée lors de la modification de la loi en 2005⁷¹.

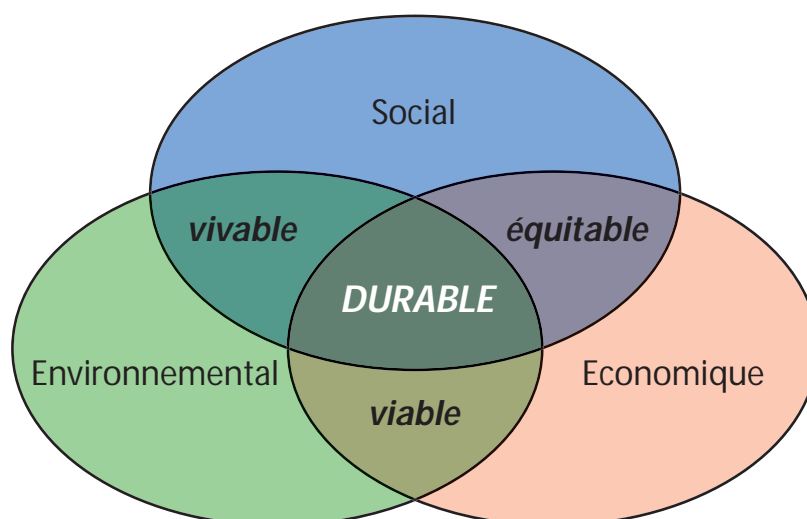


Figure 127 : représentation graphique de la définition du développement durable

⁶⁹ La définition la plus généralement admise du développement durable est celle établie dans le cadre du rapport des Nations Unis préparatoire à la conférence de Rio : « *Humanity has the ability to make development sustainable to ensure that it meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs* » (Bruntland et al., 1987).

⁷⁰ La loi n°2000-1208 du 13 décembre 2000, relative à la solidarité et au renouvellement urbains, dite loi SRU, met en place les plans locaux d'urbanisme (PLU) auxquels sont associés des plans d'aménagement et de développement durable (PADD) qui ont, entre autres, pour objectifs la protection de l'environnement et l'amélioration du cadre de vie, ce qui intègre les risques et leur gestion (Veyret et Vigneau, 2004).

⁷¹ La loi n°2005-157 du 23 février 2005, qui modifie celle de 1985, précise que « *La République française reconnaît la montagne comme un ensemble de territoires dont le développement équitable et durable constitue un objectif d'intérêt national en raison de leur rôle économique, social, environnemental, paysager, sanitaire et culturel.* »

Pourtant, la définition de la notion de développement durable reste relativement floue, ce qui n'est pas sans poser des problèmes d'application. Par exemple, de quel type de développement parle t-on ? D'un développement économique, social ou humain ? Et qu'entend t-on par durable ? 25 ans, un siècle, pour toujours ? En fait, « *les défis concrets du développement durable sont au moins aussi hétérogènes et complexes que la diversité des sociétés humaines et des écosystèmes naturels autour du monde* » (traduit de Kates et al., 2005).

La gestion durable du risque torrentiel suppose de tenir compte à la fois des coûts (financiers et environnementaux) à long terme des choix actuels de politiques d'aménagement, mais aussi de prendre en considération l'hypothèse du réchauffement climatique global impliquant des modifications de la dynamique des torrents (Mc Michael et Kjellstrom, 2002). Le but étant que les choix actuels de gestion du risque torrentiel, n'induisent pas une augmentation du risque ou des coûts de mitigation pour les générations futures.

4.5.2. Contribution à la gestion durable du risque torrentiel dans la vallée de la Clarée

Il existe plusieurs stratégies visant à la réduction des risques. Il est ainsi possible de réduire ou de confiner l'aléa, d'anticiper la gestion des catastrophes ou enfin de réduire la vulnérabilité (Dauphiné, 2001). En ce qui concerne les mesures structurelles, on distingue d'une part, les stratégies de défense active qui consistent à réduire l'intensité de l'aléa torrentiel en agissant sur les foyers d'érosion et leurs causes et, d'autre part, les stratégies de défense passive qui visent à limiter les conséquences de l'aléa. Toutefois ces différentes stratégies ne sont pas toutes applicables dans le cadre de la gestion durable du risque torrentiel dans la vallée de la Clarée. Le coût financier, l'impact environnemental et l'efficacité diffèrent largement selon les modes de défense envisageables face aux écoulements torrentiels (tableau 14).

	Défense active permanente	Défense passive permanente	Défense passive temporaire
Type d'actions	- reboisement, revégétalisation - modification de l'écoulement (dérivation) - consolidation du lit et des berges (barrages, seuils)	- déviation, canalisation (galerie, digue, canal surélevé) - freinage (obstacle, dent, ouvrage essoreur) - arrêt (digue) - stockage (plage de dépôt) - zonage (PPR) - adaptation (renforcement des bâtiments)	- réglementaire (évacuation) - automatique (système d'alerte, feux rouges, signalisation)
Niveau de sécurité	Bon si bien conçu, bien adapté au contexte et bien entretenu	Bon si bien conçu	Insuffisant pour des habitats, mais adapté pour des routes
Investissement	Très élevé	Elevé à très élevé	Faible
Coûts d'entretien	Elevé	Faible à élevé	Très faible
Avantages(s)	Techniques solides et éprouvées	Large éventail de solutions technique	Facilité de mise en œuvre, rapport qualité/prix
Inconvénient(s)	Pérennité, efficacité parfois incertaine (fragilité), entretien pénalisant pour le maître d'ouvrage	Insertion dans le site, curage, parfois facteur aggravant (flottants, stock de matériaux en cas de rupture, risque de déstabilisation du lit à l'aval)	Temps de propagation des écoulements torrentiels parfois trop courts pour une mise en alerte efficace

Tableau 14 : les stratégies de défense contre les écoulements torrentiels (d'après Ancey, 2004)

- o Les mesures structurelles passant par la mise en place d'importants systèmes de protection passive contre les crues torrentielles sous forme de digues, ou encore la construction de barrages de sédimentation, sont des moyens de mitigation de l'aléa torrentiel très efficaces (Besson, 1996 ; cf. 3.3.3. et 3.3.8.3.). Pourtant, la stratégie consistant à favoriser la multiplication des enjeux à l'abri d'importants systèmes de protection et de correction torrentielle n'est pas forcément rentable à long terme. La sécurisation d'un cône de déjection permet d'étendre les enjeux à proximité du torrent. En effet, l'impression de sécurité, induite par la mise en place d'ouvrages de correction, favorise l'urbanisation de zones potentiellement à risques (White, 1974 ; Bailly, 1998). Cela implique des coûts d'entretien constants pour garantir l'efficacité des ouvrages de protection à long terme. Surtout, ce mode d'aménagement ne tient pas compte de l'incertitude quant à l'évolution prochaine de la dynamique torrentielle qui pourrait sensiblement modifier le comportement des organismes torrentiels.

- La gestion du risque torrentiel peut aussi se fonder sur la mise en place de réseaux de surveillance destinés à prévoir le déclenchement des crues torrentielles. La mise en place de seuils d'alerte météorologique vise à réduire la vulnérabilité des enjeux soumis aux crues torrentielles grâce à des mesures d'évacuation préventive. De nombreux auteurs à travers le monde ont déterminé, pour différentes régions, la relation qui existe entre intensité et durée des précipitations dans le déclenchement des laves torrentielles (Crosta et Frattini, 2000 ; Bacchini et Zannoni, 2003 *inter alii* ; cf. 3.2.2.). Dans la vallée de la Clarée, les crues torrentielles sont majoritairement déclenchées par des orages de convection (Baraille, 2001 ; cf. 3.2.2.2.). Toutefois, l'analyse des données pluviométriques n'a pas permis de déterminer le seuil de précipitations à partir duquel se déclenchent les crues dans les différents torrents étudiés. Nous avons en effet démontré que les précipitations relevées dans les stations météorologiques de Névache et Briançon ne sont pas représentatives de la situation pluviométrique locale dans la vallée de la Clarée. La mise en place d'un réseau d'alerte efficace nécessiterait l'installation de pluviographes au sein même des bassins-versants torrentiels et surtout une période d'observation plus ou moins longue avant de pouvoir déterminer le seuil pluviométrique d'alerte *ad hoc* pour les différents types de torrent de la vallée.
- Si actuellement l'opportunité de prévoir précisément les situations météorologiques pouvant déclencher les crues torrentielles est limitée, il est toutefois possible de détecter directement les crues lors de leur transit dans le torrent. Plusieurs types de détecteurs de crue torrentielle ont été élaborés pour le suivi et l'étude du fonctionnement torrentiel (Tecca *et al.*, 2003 ; Arattano et Marchi, 2005 ; LaHusen, 2005 ; Itakura *et al.*, 2000 et 2005 ; Galgaro *et al.*, 2005). Ces détecteurs (sismographes, capteurs à ultrasons) peuvent être intégrés à des réseaux d'alerte. Cependant, même si ces détecteurs sont efficaces, leur utilisation dans les systèmes torrentiels élémentaires de la vallée de la Clarée se trouve confrontée au court laps de temps qui séparerait le déclenchement de l'alerte de l'arrivée de la crue sur le cône de déjection. En tenant compte des estimations de vitesses généralement admises pour les laves torrentielles –de l'ordre de 1 m/s⁻¹ à 15 m/s⁻¹ (Besson, 1996 ; Bardou, 2002), et de 1,5 m/s⁻¹ à 7,2 m/s⁻¹ dans le cas de la crue du Ravin des Sables de 1995 (Lahousse et Romelé, 2000)– le temps de transit maximal, calculé entre l'amont du chenal et la confluence avec la rivière principale, est par exemple compris entre moins de 3 min et 41 min pour le torrent de Roubion. Alors que pour les organismes les plus courts (Ravin de l'Enrouye, Ravin de la Pinatelle, Ravin de Combal, Ravin des Sables), le

temps de transit se réduit encore puisqu'il est compris entre 1 min 30 sec et 25 min selon la vitesse d'écoulement retenue. Les temps de réaction particulièrement courts en ce qui concerne les systèmes torrentiels élémentaires, limitent de fait l'opportunité de mettre en place des réseaux de surveillance et d'alerte efficaces.

- Il est aussi possible de gérer durablement le risque torrentiel en limitant la vulnérabilité à proximité des torrents. Le risque torrentiel est la conjugaison d'une dynamique naturelle et d'une dynamique anthropique, cependant « *la vulnérabilité face aux catastrophes est fonction dans une large mesure de l'activité (ou de l'inactivité) et du comportement des êtres humains* » (UNDP, 2004). Cela signifie que l'accroissement de la vulnérabilité est en grande partie la conséquence de pratiques de développement ne tenant pas compte de la sensibilité aux risques naturels. Comme l'ont souligné des études sur les zones inondables des rivières, une gestion raisonnée des inondations implique que les vulnérabilités des lits majeurs s'adaptent aux aléas (Scarwell et Laganier, 2004 ; Givone, 2005). En d'autres termes, la gestion durable du risque torrentiel nécessite que l'aménagement des cônes de déjection tienne avant tout compte de l'aléa torrentiel au lieu de gérer le risque uniquement en adaptant les moyens de mitigation en fonction de la vulnérabilité. De plus, la limitation de la vulnérabilité exposée à l'aléa torrentiel peut aussi permettre de limiter les coûts associés à la mise en place et à l'entretien de systèmes de correction torrentielle. Bien sûr, il ne s'agit pas de condamner le développement économique de la vallée en proscrivant tout aménagement sur l'ensemble des cônes de déjection. Mais, une meilleure prise en compte du morphotype des cônes de déjection pourrait permettre de concentrer les aménagements futurs dans les secteurs les moins soumis à l'aléa torrentiel.

La gestion durable du risque torrentiel dans la vallée de la Clarée peut, tout d'abord, se traduire par une limitation des enjeux sur les cônes de déjection des systèmes torrentiels les plus actifs. Elle peut aussi consister à encourager la dynamique naturelle des systèmes torrentiels en tenant compte du morphotype de leur cône de déjection. Par exemple, en favorisant la sédimentation sur certains des cônes de déjection de morphotype divagant et chenalisé par des bourrelets torrentiels⁷². En encourageant le ralentissement dynamique sur les cônes de déjection, il serait possible de réduire le transit de la charge sédimentaire vers la rivière principale et donc de limiter le risque d'embâcle de la Clarée.

⁷² cf. Annexes : Proposition de gestion du risque torrentiel sur les cônes de déjection des torrents de la vallée de la Clarée.

Pour favoriser le peignage des matériaux sédimentaires lors des crues torrentielles, il convient de renforcer les capacités de résilience et d'adaptation des forêts afin de protéger les peuplements forestiers qui couvrent les cônes de déjection concernés des conséquences du réchauffement global (Mortier, 2001 ; cf. 4.4.5.). De fait, les forêts possédant une fonction protectrice doivent être considérées comme de véritables protections exigeant la mise en place de stratégies d'entretien (Berger et Rey, 2004). C'est pourquoi, il apparaît nécessaire d'effectuer un suivi de l'état phytosanitaire des essences actuellement présentes pour, le cas échéant, recourir à l'introduction d'essences arborées mieux adaptées aux conditions climatiques prévues par les modèles informatiques (cf. 4.4.2.). Le meilleur garant de l'adaptabilité des peuplements forestiers étant le maintien de la plus grande diversité possible des essences (Meiller et Vannier, 1995). Ces reboisements devraient être effectués précocement, puisqu'il faut tenir compte de l'inertie inhérente à la vitesse de croissance des végétaux ligneux. Par ailleurs, ces boisements en essences ligneuses adaptées au futur climat ne concerneraient pas forcément l'ensemble du bassin-versant mais pourraient se limiter à quelques secteurs clefs. Les études effectuées sur des ravines élémentaires dans les Alpes du sud (Rey *et al.*, 2002, 2003 et 2004), démontrent en effet, que l'efficacité du piégeage des sédiments par la végétation dépend surtout de la position de la couverture végétale plutôt que de son extension. De plus, les parcelles ainsi reboisées pourraient servir de bases de départ pour favoriser la dissémination biologique dans les secteurs alentours. Enfin, le peignage par la forêt et la sédimentation sur les cônes de déjection peut être renforcé par la mise en place de digues de gabions transversales afin de réduire l'énergie des crues sur les torrents les plus menaçants (Ravin de Combal par exemple).

Toutefois, pour être accepté par les populations locales, la gestion durable du risque torrentiel ne doit pas proscrire toute possibilité d'aménagement. La prise en compte du morphotype du cône de déjection, tel que nous l'avons défini dans la première partie, peut constituer la base d'un diagnostic préliminaire permettant de distinguer les secteurs de la vallée les plus sensibles à l'emprise torrentielle. Sur les cônes de déjection de morphotype incisé, l'entaille dans le cône de déjection réduit la menace d'un débordement destructeur⁷³. Le risque torrentiel réside alors principalement dans l'hypothèse d'un embâcle au niveau des ouvrages de franchissement. C'est sur les cônes de déjection de morphotype divagant, ou chenalisé par des bourrelets torrentiels, que l'emprise des torrents est la plus forte. Dans la plupart des cas, ces cônes de déjection n'offrent donc pas d'opportunité rentable d'aménagement. Toutefois, certains de ces cônes de déjection relativement plus vastes et moins pentus comme ceux des torrents des Ruines ($P_{cd} : 6^\circ$; $S_{cd} : 0,43 \text{ km}^2$) ou des Gamattes ($P_{cd} : 6,9^\circ$; $S_{cd} : 0,59 \text{ km}^2$), pourraient

⁷³ cf. Annexes : Proposition de gestion du risque torrentiel sur les cônes de déjection des torrents de la vallée de la Clarée

ponctuellement faire l'objet d'un aménagement sur leurs marges. Les cônes de déjection de ces deux torrents, qui se situent à proximité de secteurs d'ores et déjà aménagés, peuvent constituer des secteurs privilégiés du futur développement de la partie inférieure de la vallée. De plus, ces cônes de déjection comportent de larges zones où l'aléa torrentiel n'est pas avéré pour la période la plus récente (cf. 4.3.2.2.). Or, si l'on se contente de chercher à sécuriser une partie du cône de déjection, des infrastructures de génie civil relativement légères pourraient suffire. C'est pourquoi nous proposons de réduire la sensibilité aux crues torrentielles d'un tiers latéral du cône de déjection par la mise en place de digues de gabions. Les digues seraient complétées par l'implantation de bandes de végétation arborée favorisant le peignage des matériaux sédimentaires susceptibles de déborder, et limitant l'impact esthétique de ces mesures structurelles (fig. 128).

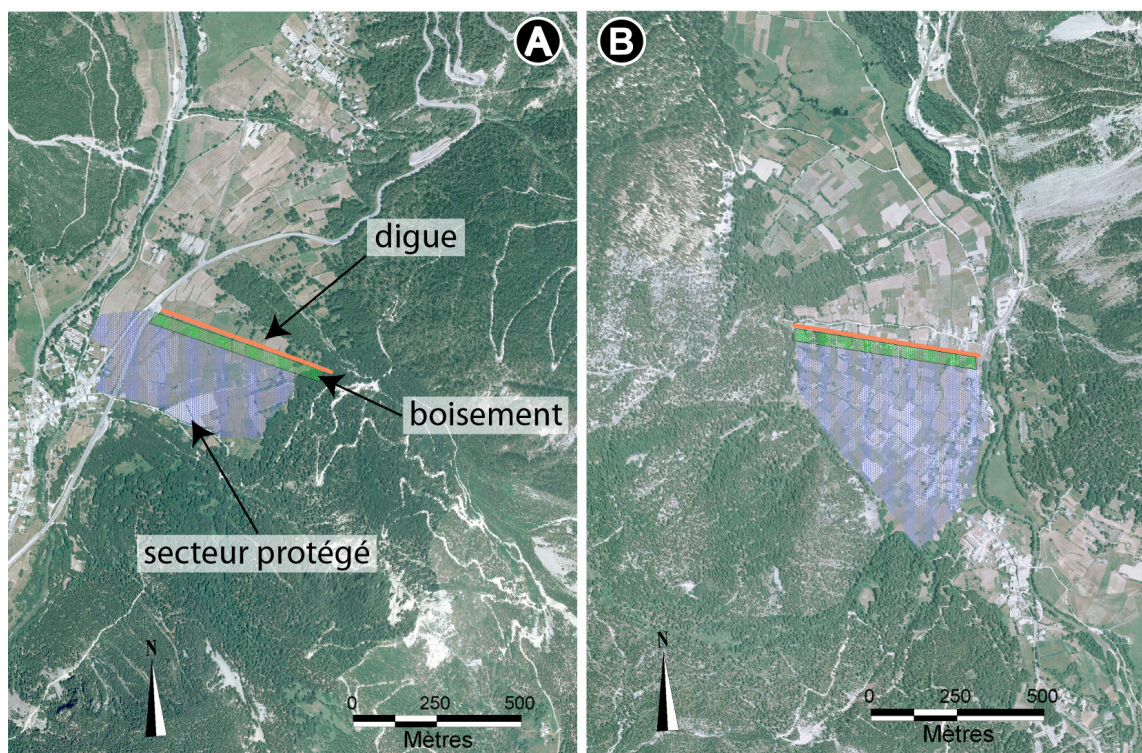


Figure 128 : exemples de propositions de gestion du risque torrentiel
 A : torrent des Ruines ; B : torrent des Gamattes
 fond photographique : IGN BD Ortho®, 2003

Sur les deux autres tiers des cônes de déjection –qui constitueraient des zones d'épandages privilégiées en cas de crue torrentielle– il conviendrait de limiter l'implantation de nouvelles infrastructures. En outre, le coût de ce type de protection passive visant à limiter l'impact des probables crues torrentielles sur une portion des cônes de déjection des torrents des Gamattes ou des Ruines s'avère relativement

réduit –de l'ordre de 150 000 à 200 000 €⁷⁴– comparé aux sommes engagées pour protéger des enjeux parfois imprudemment érigés à proximité des torrents (cf. 4.2.3.1.).

Au final, la principale contribution de la gestion durable du risque torrentiel réside dans la volonté d'une localisation raisonnée des enjeux. Dès lors, pour limiter les coûts de protection, il convient de mettre en place un mode de gestion du risque torrentiel prônant une limitation des ouvrages de correction et une rationalisation de l'aménagement des secteurs soumis à l'emprise des crues torrentielles. Pourtant, au niveau local, la question du choix de mode de gestion des risques naturels demeure problématique. D'une part, à cause du grand nombre d'acteurs en charge de la gestion des risques naturels (préfectures, communes, RTM, DDE, DDAF), et dont les intérêts et les buts sont parfois divergents (Pottier *et al.*, 2004 ; Peltier, 2005). D'autre part, car le choix de mode de gestion des risques voit souvent s'opposer les partisans d'aménagements lourds aux défenseurs d'une approche plus environnementale, comme c'est par exemple le cas dans le Queyras à propos de la gestion du risque d'inondation du Guil après la crue de 2000 (Arnaud-Fassetta *et al.*, 2005).

Les solutions à apporter en vue de gérer durablement le risque torrentiel, consistent d'une part à limiter l'accroissement des enjeux sur les cônes de déjection les plus menaçants (i.e. cônes de morphotype divagant et chenalisé par des bourrelets torrentiels) ; d'autre part, à contrôler l'épandage de la charge transportée lors des crues torrentielles. Si l'on tient compte des nombreuses incertitudes qui subsistent quant à l'évolution de la dynamique torrentielle à moyen terme, cela devrait conduire les aménageurs à une certaine prudence dans leur politique d'aménagement. Cependant, si pour certains favoriser le fonctionnement naturel des organismes torrentiels peut s'apparenter à un renoncement face aux « caprices de la nature », ces solutions qui prennent en compte et défendent le caractère préservé de la vallée de la Clarée sont vraisemblablement plus rentables à moyen et long terme.

⁷⁴ L'estimation du coût se base sur la mise en place de digues de gabions électrosoudées de 2 m de haut et 2 m, de large, complétées par la plantation d'une bande de végétation arborée à une densité de 800 pieds à l'hectare.

4.6. Conclusion de la quatrième partie

Depuis les premières traces d'occupation humaine il y a plus de 6 000 ans, les relations entre la population locale et les torrents ont largement évolué dans la vallée de la Clarée. Alors que traditionnellement les populations locales avaient plus à craindre des crues de la rivière, depuis la mutation socio-économique débutée dans les années 1970 (*i.e.* avènement du tourisme, installation d'une population néo-rurale...), la menace des crues torrentielles apparaît plus présente.

On peut en effet observer un parallèle entre l'ajustement morphologique des torrents et la multiplication des enjeux sur certains cônes de déjection. Cet accroissement de la vulnérabilité à proximité des torrents a abouti à une modification de la prise en compte du risque torrentiel visible à travers l'évolution des politiques de correction torrentielle. Alors que les premières entreprises de correction torrentielle menées dès la fin du 19^{ème} siècle, visaient à protéger des enjeux menacés de longue date par les torrents ; depuis les années 1960-70, les ouvrages de correction torrentielle se concentrent sur des secteurs où les enjeux sont récents.

Aujourd'hui la vallée de la Clarée est encore peu « urbanisée » ce qui renforce l'intérêt de mettre en place une gestion durable du risque torrentiel tenant compte de la sensibilité de certains cônes de déjection et de l'évolution possible de la dynamique torrentielle ; et cela afin d'éviter d'aboutir à une situation comparable à celle de la vallée voisine de la Guisane. Dans cette vallée, où certains cônes de déjection sont totalement occupés, l'impact d'une modification possible de la dynamique torrentielle pourrait avoir des conséquences très préjudiciables (Flez et Lahousse, 2004 a).

Conclusion générale

Conclusion générale

Le point de départ de notre étude était de chercher à contextualiser et à singulariser le risque torrentiel existant dans la vallée de la Clarée. C'est-à-dire s'éloigner d'une approche purement phénoménologique centrée sur l'étude et la quantification des écoulements torrentiels, en plaçant l'analyse des systèmes torrentiels au centre d'une étude environnementale plus large. Le système torrent-société est déterminé par les interactions et les évolutions des contextes géo-dynamique (environnement morphoclimatique, biologique...) et socio-économique (histoire locale, émergence de l'économie touristique...) (cf. 4.3.1.). C'est en comprenant quels sont les facteurs à l'origine de la situation actuelle et en analysant les futurs changements de l'environnement qu'il est possible de mettre en place des stratégies visant à une gestion durable du risque torrentiel.

Les apports d'une approche géographique du risque torrentiel : la vallée de la Clarée

Notre étude des systèmes torrentiels de la vallée de la Clarée confronte différentes approches. Elle analyse d'une part l'évolution des éléments qui forment l'environnement des torrents et d'autre part les modalités de la prise en compte de l'aléa torrentiel par la société. Quatre grands enseignements peuvent être retenus.

- Différentes analyses ont permis de souligner la spécificité des organismes torrentiels de la vallée de la Clarée. Nous avons ainsi constaté qu'il est possible de distinguer, parmi les torrents de la vallée de la Clarée, deux types de systèmes torrentiels aux comportements différents. D'une part, des organismes torrentiels élémentaires associés à des bassins-versants abrupts qui connaissent régulièrement des crues de faible intensité. D'autre part, des systèmes torrentiels composites drainant de plus vastes bassins-versants, qui génèrent des crues moins fréquentes. Si dans le premier cas, la menace apparaît relativement évidente, dans le second cas, les longues périodes d'accalmie peuvent parfois être perçues comme le signe d'une « extinction » torrentielle. Or, nos travaux ont

clairement démontré que l'on ne peut se fonder uniquement sur des indices d'activité récente pour caractériser le comportement dynamique d'un torrent (cf. 4.3.2.3.). Il convient donc d'user avec prudence des analyses fréquentielles de l'aléa torrentiel fondées sur le recensement des crues. Par ailleurs, les résultats de cette approche réaffirment aussi l'importance des liens étroits qui unissent les caractéristiques du bassin-versant (morphologie, type et localisation des sources sédimentaires, extension de la végétation) et la dynamique du torrent. Ces liens sont particulièrement sensibles au niveau du morphotype des cônes de déjection qui est largement déterminé par l'influence des caractéristiques du bassin-versant sur le comportement du torrent.

- Ce travail de thèse a en outre démontré que la dynamique des torrents de montagne est particulièrement sensible aux fluctuations environnementales (fig. 129 A ; cf. 2.5.). Les modifications climatiques influent entre autres sur l'extension de la végétation sur les versants et sur l'aire d'efficacité des processus cryo-nivaux. En réduisant les productions et les transits sédimentaires sur les versants, les variations climatiques post-PAG eurent une influence majeure sur l'environnement géomorphodynamique. Cela a abouti à une importante mutation de la physionomie des torrents, marquée par l'ajustement morphologique des bandes actives sur leur cône de déjection. Les résultats obtenus démontrent que, contrairement aux modèles décrivant l'ajustement morphologique des rivières torrentielles de piémont, l'évolution des torrents de la vallée de la Clarée depuis la fin du 19^{ème} siècle est avant tout un phénomène spontané dans lequel le rôle des facteurs anthropiques apparaît marginal.
- La seconde moitié du 20^{ème} siècle est marquée par la mutation socio-économique de la vallée de la Clarée, caractérisée par l'abandon des activités agro-pastorales au profit d'une économie tournée vers le tourisme. Il en résulte une augmentation de la population permanente et surtout de celle liée à l'activité touristique. Cela renforce la demande immobilière et la pression foncière. En raison de l'ajustement morphologique des torrents, l'emprise torrentielle tend à être moins marquée visuellement dans le paysage (fig. 129 B). La pression foncière conjuguée à la rétraction des bandes actives torrentielles favorise l'accroissement de la vulnérabilité sur les cônes de déjection. Ce travail souligne l'importance de la perception du risque : l'image plus rassurante que renvoient les torrents de nos jours diminue fortement l'appréhension qu'ont les sociétés à coloniser leur proximité.

- En soulignant la sensibilité des systèmes torrentiels de montagne à la modification de leur environnement, l'analyse de l'ajustement morphologique des torrents en réponse aux changements environnementaux post-PAG soulève la question des conséquences que pourraient avoir le réchauffement global. Les résultats de l'étude des impacts prévisibles du changement climatique sur le comportement des torrents de la vallée de la Clarée sont relativement ambigus. Si les épisodes caniculaires d'août 2003 ou de juillet 2006 sont parfois considérés comme étant un aperçu des conséquences du changement climatique global (Beniston et Diaz, 2004), il convient d'attendre le prochain rapport du GIEC, prévu en 2007, pour connaître les progrès récents en terme de modélisation et de prévision des évolutions futures du climat global et régional. Pourtant, il est probable qu'à moyen terme et dans l'hypothèse d'une période de stabilité climatique qui favoriserait le développement de la végétation, le réchauffement global pourrait pérenniser le tarissement du transit sédimentaire observé depuis la fin du PAG. Les effets locaux des modifications climatiques annoncées pourraient alors se traduire par une relative accalmie torrentielle après le « petit âge de la torrentialité » (Bravard, 2000 cité par Liébault, 2003). Cependant, quelque soit l'importance des changements environnementaux, rien ne prédit un arrêt du fonctionnement paroxystique des torrents. Ils resteront intrinsèquement susceptibles de générer des crues importantes. A plus court terme, les conséquences d'un accroissement du stress hydrique pourraient affecter les sylvosystèmes actuels (cf. 4.4.5.). Celles-ci, conjuguées à l'intensification des précipitations annoncée par les modèles informatiques (cf. 4.4.4.), pourraient modifier le comportement des torrents et marquer une rupture avec une tendance séculaire à la contraction des bandes actives torrentielles.

L'Homme, principal facteur de l'émergence du risque torrentiel dans la vallée de la Clarée ?

A l'origine de cette thèse, nous cherchions à déterminer quels étaient les facteurs qui influencent le risque torrentiel dans une vallée de montagne peu urbanisée. Ce travail est fondé à la fois sur une analyse géo-historique, sur des observations *in situ*, sur un examen des données disponibles sur les crues torrentielles, ainsi que sur une approche prospective. Au terme de cette étude, il apparaît que

ce sont les stratégies d'aménagement et leurs conséquences sur la vulnérabilité qui ont le plus influencé la transformation de la prise en compte de l'aléa torrentiel dans la vallée de la Clarée.

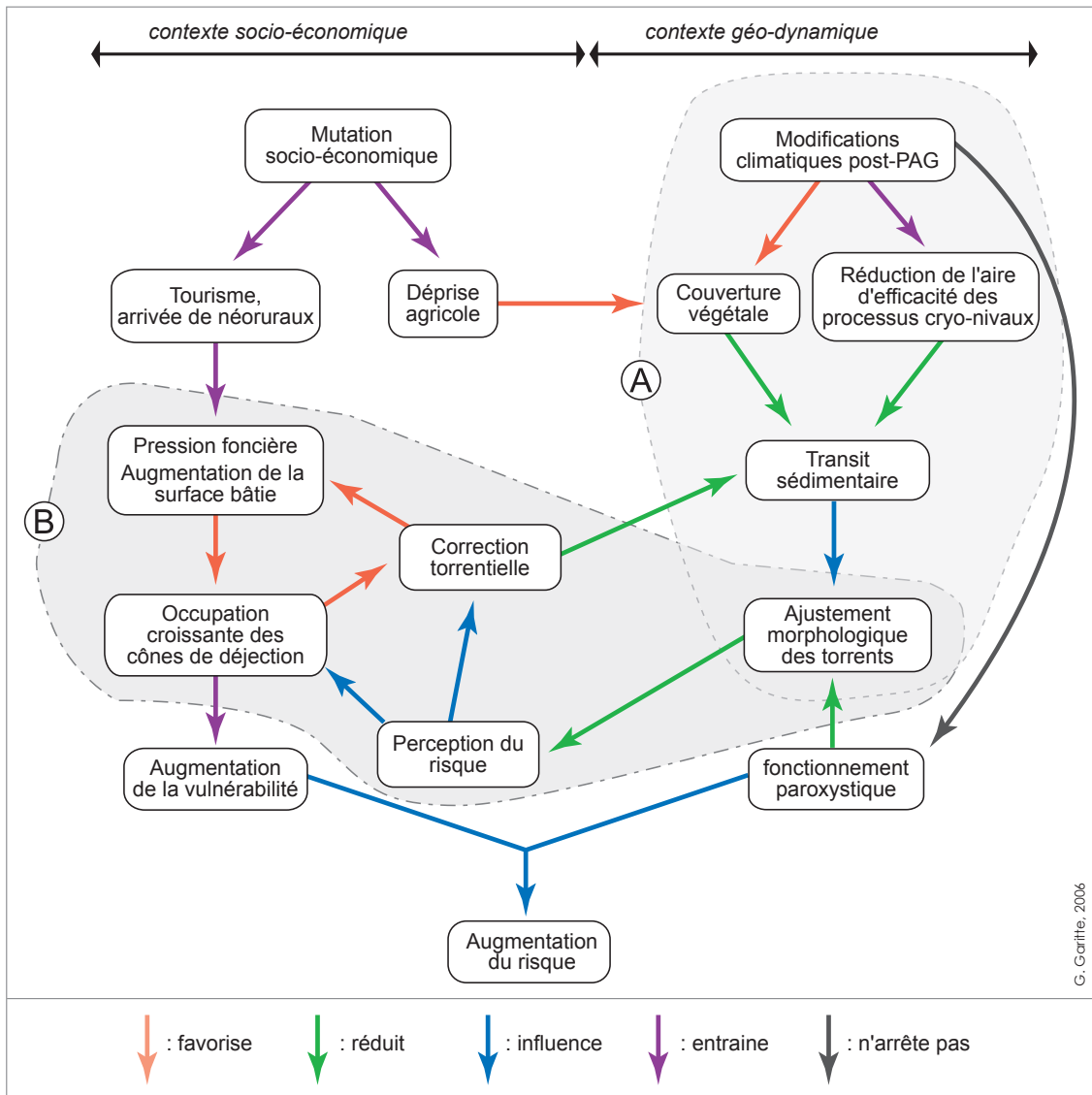


Figure 129 : synthèse graphique schématique du fonctionnement du système torrent-société dans la vallée de la Clarée
 A : les facteurs de l'ajustement morphologique des torrents
 B : un exemple de relation torrent-société

De fait, le 20^{ème} siècle a été une période charnière dans l'histoire de la vallée de la Clarée. Il s'agit d'une période de profonds changements environnementaux et sociaux :

- o la végétation a largement progressé en réponse aux modifications climatiques post-PAG, tant en fond de vallée que sur les versants, ce qui a conduit à la mutation des bandes actives torrentielles,

- dans le même temps, la population locale a connu une mutation socio-économique majeure marquée par l'abandon d'un mode de vie traditionnel agro-pastoral et l'avènement du tourisme.

Ce constat corrobore l'idée selon laquelle les mutations qui affectent géosystèmes et sociosystèmes ne sont pas linéaires (Hufschmidt *et al.*, 2005).

Cette étude démontre aussi que c'est presque exclusivement la conjonction de ces deux dynamiques qui a abouti à l'émergence du risque torrentiel dans la vallée de la Clarée (fig. 129). Le torrent à risque n'est alors pas forcément celui qui renvoie une image d'impétuosité, mais peut-être au contraire un organisme torrentiel relativement peu actif qui, perçu comme inoffensif, favorise l'implantation d'infrastructures à sa proximité.

L'accroissement de la vulnérabilité dans la vallée de la Clarée apparaît déterminant dans l'émergence du risque torrentiel au cours du 20^{ème} siècle. Il s'avère que c'est l'Homme en tant que gestionnaire de l'environnement qui, par ses choix de mise en valeur du territoire, va accroître ou limiter ce risque, en augmentant ou en réduisant son exposition à un aléa qui lui ne varie guère sur le court terme. Or, il est nécessaire de prendre en compte le futur développement de la vallée, ainsi que les conséquences que pourraient engendrer le réchauffement global sur la dynamique torrentielle. Notre travail de recherche corrobore très largement l'affirmation de U. Beck selon laquelle « *dans la société du risque, le passé perd sa fonction déterminante pour le présent. C'est l'avenir qui vient s'y substituer, et c'est alors quelque chose d'inexistant, de construit, de fictif, qui devient la "cause" de l'expérience et de l'action présentes. Aujourd'hui, nous devenons actifs pour éviter, atténuer, prévenir les problèmes ou les crises de demain ou d'après-demain* » (Beck, 2001). Le fossé qui existe entre le « temps des naturalistes » et le « temps des acteurs sociaux » devient la principale limite à la mise en place d'une gestion durable du risque torrentiel ; d'autant plus que « *les conséquences d'un mésusage de l'espace apparaissent à des intervalles de temps rarement compatibles avec la durée des mandats électoraux* » (Dagorne et Dars, 1999). Cela souligne l'impact de la société sur le risque. De fait, l'influence humaine dans l'origine des crues a été largement démontrée dans les bassins-versants fluviaux (Leblois, 1999).

Une gestion durable du risque torrentiel doit passer par l'étude de la morphologie des cônes de déjection. Car il est primordial de limiter l'implantation d'infrastructures dans des secteurs soumis à l'emprise des torrents. En se basant par exemple sur une approche géo-historique et topométrique à échelle fine telle que celle pratiquée dans la présente étude. Cette approche doit s'accompagner de l'information des différents acteurs sociaux. La sensibilisation des populations locales et des responsables de l'aménagement du territoire devrait permettre d'améliorer la prise en compte et la gestion de l'aléa torrentiel. L'éducation des acteurs de l'aménagement du territoire apparaît comme un élément de la prévention des

risques. En effet, la complexité des interactions entre les dynamiques socio-économiques, d'une part, et les changements climatiques et leurs conséquences morphodynamiques, d'autre part, en limite la prise en compte. Ces interactions s'effectuent à des niveaux scalaires différents. L'implication des évolutions sociales se concrétise à des échelles temporelles et spatiales réduites alors que les modifications climatiques s'inscrivent dans des dimensions temporelles et spatiales beaucoup plus larges. Ainsi, la colonisation des cônes de déjection s'observe à l'échelle du siècle contrairement aux modifications environnementales qui s'appliquent à l'ensemble de l'environnement alpin sur un pas de temps séculaire.

Les perspectives d'avenir

Cette étude locale apporte des éléments essentiels et originaux concernant notamment l'ajustement morphologique post-PAG des torrents de la vallée de la Clarée. En cela elle constitue une analyse jusqu'alors inédite dans le Briançonnais. Nos résultats viennent en complément d'autres analyses dans les Alpes françaises (Miramont *et al.*, 1998 ; Warner, 2000 ; Liébault, 2003 ; Marston *et al.*, 2003 ; Thévenet *et al.*, 2003 ; Arnaud-Fassetta et Fort, 2004 ; Flez et Garitte, 2006 *inter alii*). Nos travaux contribuent donc à une analyse de ce phénomène à échelle régionale. De même, cette approche localisée pourrait aussi s'enrichir de l'analyse d'autres secteurs d'études sur des aspects concernant la dynamique étudiée. En effet, nous avons démontré par l'exemple de la vallée de la Clarée, que les caractéristiques climatiques, géomorphodynamiques et topographiques, l'histoire locale ou encore les évolutions socio-économiques sont autant d'éléments qui permettent de comprendre et d'expliquer l'état actuel du système torrent-société. La transposition de cette méthode globale à d'autre contexte enrichirait les résultats déjà acquis. Cette démarche a déjà débuté dans d'autres sites des Alpes françaises, par exemple dans la « fenêtre » de Barcelonnette en Ubaye où des observations ont d'ores et déjà démontré la présence de différents morphotypes de cônes de déjection (Garitte, 2000 ; Flez et Garitte, 2006) ; ou encore dans des vallées ayant connu un développement socio-économique différent, comme la vallée voisine de la Guisane où s'est développée la station de Serre-Chevalier (Lahousse *et al.*, 2003).

D'un point de vue technique, le suivi topométrique mené sur plusieurs chenaux torrentiels de la vallée a permis de déterminer les grandes caractéristiques du fonctionnement des torrents. Pour autant, la durée de ce suivi ne suffit pas à rendre compte du fonctionnement sur le long terme des torrents de la vallée de la Clarée. La dynamique torrentielle est en effet caractérisée par un fonctionnement temporel non linéaire. Aux périodes de fonctionnement « normal », que nous avons pu

appréhender grâce à l'analyse topométrique, succèdent des phases de rupture dont la prise en compte est indispensable dans l'évaluation de l'aléa torrentiel. Ainsi, l'ensemble des levés topométriques et les très nombreuses photographies réalisées lors de cette thèse peuvent être le point de départ d'un suivi sur le plus long terme. Nos observations peuvent en effet constituer les prémices d'une base de données à référence spatiale apte à permettre un *monitoring* des systèmes torrentiels. Celui-ci pourrait être complété par la mise en place de pluviographes au sein de certains bassins-versants torrentiels permettant de déterminer le volume et l'intensité des événements pluviométriques déclencheurs, ces données restant encore inexistantes au niveau local. Ce *monitoring* prendrait alors tout son sens puisqu'il d'analyserait les systèmes torrentiels et leur évolution dans une période clef de changement environnementaux. L'instrumentation de bassins-versants ou la multiplication des données concernant le déclenchement et la propagation des crues torrentielles sont autant d'éléments déterminants permettant de mieux cerner les caractéristiques de l'aléa torrentiel.

Notre travail a aussi démontré que l'Homme apparaît comme le principal facteur de l'émergence du risque torrentiel depuis le début du 20^{ème} siècle. Les mécanismes à l'origine des comportements sociaux sont complexes et leur interprétation peut apparaître comme une des limites de notre travail. En effet, la problématique du risque implique que les objets étudiés se situent à l'interface nature-société ce qui nécessite l'emploi de certaines méthodes d'analyse sortant du strict champ de compétences du géographe (psychologie, sociologie, économie...) et ce notamment lorsqu'il s'agit d'apprécier l'impact de la perception et de la représentation du risque sur l'évolution de la mise en valeur du territoire.

Aujourd'hui, le risque torrentiel dans la vallée de la Clarée se matérialise le plus souvent par des perturbations sur les axes de communication mais il ne s'est jusqu'alors jamais concrétisé par une catastrophe⁷⁵ ; la faible densité des aménagements l'explique. Toutefois, face au désir de développement des petites communes de montagne, c'est le futur aménagement de la vallée qui déterminera l'intensité du risque torrentiel à venir. Si les choix de gestion du risque torrentiel reviennent aux différents acteurs en charge des politiques d'aménagement, il importe de prendre en compte les recherches menées tant par les sciences dites exactes que par les sciences humaines. Une approche historique est nécessaire pour comprendre le bon état de conservation de la forêt dans la vallée de la Clarée (cf. 2.4.1.2.). L'approche sociologique est elle aussi nécessaire pour appréhender au mieux le concept de risque dans lequel l'influence des représentations et des comportements sociaux est primordiale (cf. 4.3.1.). En outre, des études

⁷⁵ Seuls quatre événements hydrométéorologiques ont abouti à des arrêts de catastrophe naturelle pour les communes de Névache et Val-des-Prés (22/07/1988 ; 03/08/1990 ; 24/07/1995 ; 15/10/2000). Toutefois, les perturbations et dégâts occasionnés par ces crues se sont principalement limités aux axes de communication, et si plusieurs évacuations de campeurs ont eu lieu, aucune victime n'a été à déplorer.

biogéographiques et botaniques peuvent aider à estimer l'âge des accrus forestiers ou contribuer à prévoir les réactions des sylvosystèmes en réponse aux effets locaux du réchauffement global (cf. 4.4.5.). Ces diverses approches complètent les recherches qui se concentrent plus volontiers sur la dynamique des torrents et qui cherchent à comprendre et à prévoir le déclenchement, les modalités de transport et l'extension des crues torrentielles (Bonnet-Staub, 1998 ; Bardou *et al.*, 2003 ; Hübl et Steinwendtner, 2001 ; Laugier et Cojean, 2001 ; Arattano et Franzini, 2003 ; Berti et Simoni, 2005 ; Pudasaini *et al.*, 2005 *inter alii*).

Ainsi, le risque torrentiel est à la convergence de multiples domaines d'étude et doit donc être appréhendé par une approche transdisciplinaire. Par ses compétences, le géographe peut et doit y occuper une place de choix, mais il doit aussi travailler avec d'autres spécialistes. Le travail d'équipe est nécessaire pour progresser dans la compréhension simultanée de l'aléa torrentiel et de l'évolution de la vulnérabilité et donc, *in fine*, pour permettre une meilleure gestion du risque torrentiel. C'est dans ce but que cette thèse a cherché à contribuer à une approche plus ouverte de l'analyse du risque torrentiel.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- ACOT P., 2003. *Histoire du climat*. Editions Perrin ; 309 p.
- ADGER W.N., 2000. Social and ecological resilience: Are they related? *Progress in Human Geography*, vol. 24, n° 2 ; pp. 347-364.
- ALEOTTI P., 2004. A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology*, vol. 73 ; pp. 247-265.
- ALCANTARA-AYALA I., 2002. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, n°47 ; pp. 107-124.
- AMELOT F., DELANNOY J.J., NICOUD G., 2003. L'édification des cônes de déjection en zone de montagne : intérêts paléoenvironnementaux et hydrogéologique, contribution typologique. *Quaternaire*, vol. 14, n°4 ; pp., 253-263.
- AMOROS C., PETTS G.E., 1993. *Hydrosystèmes fluviaux*. Masson – Paris ; 300 p.
- ANCEY C., 2004. *Une introduction à la dynamique des avalanches et des écoulements torrentiels*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne ; 66 p.
- ANDREASSIAN V., 2002. *Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie ; 781 p.
- ANDREASSIAN V., 2004a. Couvert forestier et comportement hydrologique des bassins versants. *La Houille Blanche*, n°2 ; pp. 31-35.
- ANDREASSIAN V., 2004b. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, n°291 ; pp.1-27.
- ANTOINE J.-M., DESAILLY B., 1998. Le risque naturel, l'écu et l'ingénieur dans les Pyrénées ariégeoises, *Revue de Géographie Alpine*, T. 86, n°2 ; pp. 63-76.
- ANTOINE J.-M., DESAILLY B., 2001. Habitat, terroirs et cône de déjection torrentiels dans les Pyrénées commingeoises. In : BERTHE et CURSENTE (éd), *Villages pyrénéens. Morphogenèse d'un habitat de montagne*, Université Toulouse-Le Mirail ; pp. 27-44.
- ARATTANO M., MARCHI L., 2000. Video-derived velocity distribution along a debris flow surge. *Physic and Chemistry of the Earth (B)*. vol. 25, n°9 ; pp. 781-784.

- ARATTANO M., FRANZI L., 2003. On the evaluation of debris flows dynamics by means of mathematical models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, n°3 ; pp. 539-544.
- ARATTANO M., FRANZI L., 2004. Analysis of different water-sediment flow processes in a mountain torrent. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 4 ; pp. 783-791.
- ARATTANO M., MARCHI L., 2005. Measurements of debris flow velocity through cross-correlation of instrumentation data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, n°5 ; pp. 137-142.
- ARNAUD-FASSETTA G., FORT M., 2004. La part respective des facteurs hydro-climatiques et anthropiques dans l'évolution récente (1956-2000) de la bande active du Haut-Guil, Queyras, Alpes françaises du sud. *Méditerranée*, tome 102 ; pp. 143-146.
- ARNAUD-FASSETTA G., COSSART E., FORT M., 2005. Hydro-geomorphic hazards and impact of man-made structures during the catastrophic flood of June 2000 in the Upper Guil catchment (Queyras, Southern French Alps). *Geomorphology*, n°66 ; pp. 41-67.
- ARQUES S., 2005. *Géodynamique, colonisation végétale et phytodiversité des talus d'éboulis dans le massif de la Grande Chartreuse (Préalpes françaises du Nord). Caractéristiques géo-écologiques et sensibilité aux changements environnementaux*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble 1 ; 431 p. + annexes.
- AVOCAT C., 1979. *Montagnes de lumière*. Imprimerie Fayolles ; 680 p.
- BACCHINI M., ZANNONI A., 2003. Relations between rainfall and triggering of debris-flow : case study of Cancia (Dolomites, Northeastern Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, n°3 ; pp. 71-79.
- BAILLY A., DEBARBIEUX B., 1991. Géographie et représentation spatiale. In : BAILLY (Dir.), *Les concepts de la géographie humaine*, Masson ; pp. 153-160.
- BAILLY A., 1998. La géographie des risques. In : BAILLY (Dir.), *Les concepts de la géographie humaine*, Masson ; pp. 241-247.
- BALLANDRAS S., 1997. *Contributions à l'étude des bassins versants torrentiels alpins : stratigraphies, morphodynamique, paléoenvironnements de bassins versants depuis 15000 BP*. Thèse de doctorat, Université de Savoie, 2 tomes ; 552 p.
- BALLANDRAS S., 1998. Le « Remblaiement Historique » dans les bassins versants torrentiels des Alpes françaises. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n°1 ; pp.65-77.
- BARAILLE S., 2001. *Les crues dommageables dans le bassin de la Haute Durance (Hautes Alpes, France) : recensement depuis le 14ème siècle, signification climatique, facteurs météorologiques et prévision*. Thèse de doctorat, Université de Savoie ; 604 p.
- BARAILLE S., 2003. Prévision des crues graves en Haute Durance : typologie des situations météorologiques à risque. *Cahiers de Géographie*, n°1, collection EDYTEM, Université de Savoie ; pp. 215-222.

- BARD E., 2004. Greenhouse effect and ices ages: historical perspective. *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 336 ; pp. 603-636.
- BARDOU E., 2002. *Méthodologie de diagnostics des laves torrentielles sur un bassin versant alpin*. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne ; 188 p.
- BARDOU E., DELALOYE R., 2004. Effects of ground freezing and snow avalanche deposits on debris flows in alpine environments. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, n°4 ; pp. 519-530.
- BARDOU E., ANCEY C., BONNARD C., VULLIET L., 2003. Classification of debris-flow deposits for hazard assessment in alpine areas. In : RICKENMANN & CHEN (Eds), *Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*. Milpress, Rotterdam ; pp. 799-808.
- BARDOU E., MARQUIS F. X., NIGGLI M., MUSY A., 2002. The role of snow's accumulation caused by avalanche in the generation flood and solid transport in small alpine watersheds. *International Conference for Flood Estimation*, Bern. CHR report II-17, 8 p.
- BARFETY J.C., LEMOINE M., DE GRACIANSKY P.C., TRICART P., MERCIER D., 1995. *Notice explicative de la carte géologique de Briançon à 1/50000*. Editions du BRGM ; 180 p.
- BARNIKEL F., 2004. The value of historical documents for hazard zone mapping. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, n°4 ; pp. 599-613.
- BARNIKEL F., BECHT M., 2003. A historical analysis of hazardous events in the Alps – the case of Hindelang (Bavaria, Germany). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, n°3 ; pp. 625-635.
- BARNIKEL F., BECHT M., 2005. Regional historical analysis of natural hazards in the Alps. The HANG Project. *Zeitschrift für Geomorphologie/Supplement*, vol 138 ; pp. 27-36.
- BATALLA R.J., DE JONG C., ERGENZINGER P., SALA M., 1999. Field observations on hyperconcentrated flows in mountain torrents. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 24 ; pp. 247-253.
- BAUD P., BOURGEAT S., BRAS C., 1995. *Dictionnaire de géographie*. Hatier ; 431 p.
- BAUELLE G., REGNAULD H., 2004. *Echelles et temporalité en géographie*. SEDES, Paris ; 174 p.
- BECK U., 2001. *La société du risque. Sur la voie d'une autre modernité*. Editions Flammarion ; 521 p.
- BELGRAND E., 1854. De l'influence des forêts sur l'écoulement des eaux. *Annales des Ponts et Chaussées*, n°61 ; pp. 1-27.
- BELINGARD C., TESSIER L., EDOUARD J.L., 1998. Reboisement et dynamique naturelle dans les forêts sub-alpines (Haut-Verdon, Alpes du sud, France). *Géographie Physique et Quaternaire*, vol. 52, n°2 ; pp. 1-10.

- BENDA L., 1990. The influence of debris flows on channel and valley floors in the Oregon Coast Range, U.S.A. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 15 ; pp. 457-466.
- BENDA L., VELDHUISEN C., BLACK J., 2003. Debris flows as agents of morphological heterogeneity at low-order confluences, Olympic Mountains, Washington. *Geological Society of American Bulletin*, vol. 115, n°9 ; pp. 1110-1121.
- BENISTON M., 2003. Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts. *Climatic Change*, n°59 ; pp. 5-31.
- BENISTON M., 2004. The 2003 heat wave in Europe: a shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations. *Geophysical Research Letters*, vol. 31, n°2 ; pp. 1-4.
- BENISTON M., 2005. Changement climatique et impacts possibles dans la région alpine. *Revue de Géographie Alpine*, n°2 ; pp. 13-24.
- BENISTON M., 2006. Mountain weather and climate: A general overview and a focus on climatic change in the Alps. *Hydrobiologia*, vol. 562, n°2 ; pp. 3-16.
- BENISTON M., DIAZ H., 2004. The 2003 heat wave as an example of summers in a greenhouse climate? Observations and climate model simulations for Basel, Switzerland. *Global and Planetary Change*, vol. 44 ; pp. 73-81.
- BENISTON M., DIAZ H. F., BRADLEY R.S., 1997. Climatic change at high elevation sites: an overview. *Climatic Change*, vol. 36 ; pp. 233-251.
- BENISTON M., STEPHENSON D.B., 2004. Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions. *Global and Planetary Change*, n°44, pp. 1-9.
- BENIZRI C., 2000. *L'aménagement d'une vallée préservée des Alpes du sud : la vallée de la Clarée*. Mémoire d'IEP, Université de Bordeaux 4 ; 223 p.
- BERGER G., 1960. L'attitude prospective. *Prospective*, n°1 ; pp. 1-10.
- BERGER F., REY F., 2004. Mountain protection forests against natural hazards and risk: new French developments by integrating forest in risk zoning. *Natural Hazards*, vol. 33 ; pp. 395-404.
- BERTI M., GENEVOIS R., LAHUSSEN R., SIMONI A., TECCA P.R., 2000. Debris flow monitoring in the Acquabona watershed on the Dolomites (Italian Alps). *Physic and Chemistry of the Earth (C)*, Vol. 25, n°9 ; pp. 707-715.
- BERTRAN P., FRANCOU B., TEXIER J.P., 2004. Eboulisation, éboulement. In : BERTRAN P. (dir.), Dépôts de pente continentaux, dynamique et faciès. *Quaternaire*, Hors-série, n°1 ; pp. 29-43.
- BESSAT F., 2003. Risque, environnement et société : le cas du réchauffement climatique. In : MORINIAUX V. (dir.), *Les risques*. Editions du Temps ; pp. 222-237.

- BESSAT H., GERMI C., 2001. *Les noms du paysage alpin. Atlas toponymique – Savoie, Vallée d'Aoste, Dauphiné, Provence*. Editions Ellug, Université Grenoble 3 ; 324 p.
- BESSION L., 1996. *Les risques naturels en montagne : traitement, prévention, surveillance*. Editions Artès-Publialp, Grenoble, 438 p.
- BILLET P., 2001. La territorialisation juridique des risques naturels : du droit des limites aux limites du droit. *Actes du colloques Risques et Territoires – Lyon 16-18 mai 2001, UMR CNRS 5600*, tome 2 ; pp. 189-197.
- BLAIS J.P., 1978. *Hydrologie et hydrogéologie du bassin versant de la Clarée (Hautes-Alpes)*. Thèse de doctorat, Université scientifique et médicale de Grenoble ; 301 p.
- BLAIS J.P., 1979. Comportement hydrogéologique des différentes formations géologiques du bassin versant de la vallée de la Clarée (Hautes-Alpes). *Revue de Géographie Alpine* ; pp. 161-172.
- BLANCHARD R., 1945. *Les Préalpes françaises du sud*. Arthaud – Paris ; 959 p.
- BLANCHARD R., CŒUR D., RAVANAT F., 2006. *Etude historique préalable à une cartographie informative des phénomènes naturels à risques*. Service RTM des Hautes-Alpes, Rapport inédit ; 100 p.
- BONNET STAUB I., 1998. *Mécanismes d'initiation des laves torrentielles dans les Alpes françaises, contribution à la maîtrise des risques*. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2 volumes ; 391 p.
- BONNET STAUB I., 2001. Une méthodologie d'analyse et de cartographie de l'aléa « initiation de laves torrentielles » - application au torrent du Bragousse (France). *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, n°59 ; pp. 319-327.
- BONTE M., ERGENZINGER P., RAUEN A., 2000. Geomorphological, hydrological and sedimentary control of an artificially induced debris flow. *Physic and Chemistry of the Earth (B)*, vol. 25, n°9 ; pp. 745-749.
- BOTTINO G., CRIVELLARI R., 1998. Analisi di colate detritiche connesse con l'eventi alluvionale del 5-6 Novembre 1994 nell'antiteatro morenico di Ivrea. *Congress on hydrogeological risk, countermeasures and use of the Canavese territory*. Ivrea, Italy ; pp. 36-46.
- BOVIS M., JAKOB M., 1999. The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity. *Earth Surface Processes and Landforms*, n°24 ; pp. 1039-1054.
- BRAVARD M., 1947. L'émigration récente en France de quelques communes du Briançonnais. *Revue de Géographie Alpine*, tome 35 ; pp. 747-758.
- BRAVARD J.-P., 1994; L'incision des lits fluviaux, du phénomène morphodynamique naturel et réversible aux impacts irréversibles, *Revue de Géographie de Lyon*, vol.69, n°1, pp.5-10.
- BRAVARD J.-P., 2002. Les réponses des systèmes fluviaux à une réduction des flux d'eau et de sédiments sous l'effet du reboisement en montagne. *La Houille Blanche*, n°3 ; pp. 68-71.

- BRAVARD J.-P., PEIRY J.-L., 1993. La disparition du tressage fluvial dans les Alpes françaises sous l'effet de l'aménagement des cours d'eau (19-20^{ème} siècle). *Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl.* Bd 88 ; pp. 67-79.
- BRAVARD J.-P., PETIT F., 1997. *Les cours d'eau. Dynamique d'un système fluvial.* Colin ; 221 p.
- BRAVARD J.-P., AMOROS C., PAUTOU G., BORNETTE G., BOURNAUD M., CREUZE DES CHATELLIERS M., GIBERT J., PEIRY J.L., PERRIN J.F., TACHET H., 1997. River incision in the South-East France: morphological phenomena and ecological effects. *Regulated Rivers: Research & Management*, vol. 13 ; pp. 75-90.
- BRAVARD J.-P., LANDON N., PEIRY J.L., PIEGAY H., 1999. Principles of engineering geomorphology for managing channel erosion and bedload transport, examples from French rivers. *Geomorphology*, vol. 31 ; pp. 291-311.
- BRIOT F., 1884. *Etude sur l'économie pastorale des Hautes-Alpes.* Paris, Bureaux de la Revue de Eaux et Forêts ; 144 p.
- BRIOT F., 1995. *Le régime pastoral à Val-des-Prés (en 1887).* Editions Transhumances (réédition de l'ouvrage de 1887); 11 p.
- BROCHOT S., 2004. Quand l'administration forestière se mettait en scène : les premières archives photographiques (1860-1914) de la Restauration des terrains en montagne. *Revue Forestière Française*, n°1 ; pp.
- BROCHOT S., DUCLOS P., BOUZIT M., 2003. L'évaluation économique des risques torrentiels : intérêts et limites pour les choix collectifs de prévention. *Ingénieries - EAT*, n° spécial 2003 ; pp. 53-68.
- BROCHOT S., MARCHI L., LANG M., 2002. L'estimation des volumes des laves torrentielles : méthodes disponibles et application au torrent du Poucet (Savoie). *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, Vol. 61 ; pp. 389-402.
- BRUFAU P., GARCIA-NAVARRO P., 2000. 1D mathematical modelling of debris flow. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 38, n°6 ; pp. 435-446.
- BRUNETTI M., BUFFONI L., MAUGERI M., NANNI T., 2000. Precipitation intensity trends in Northern Italy. *International Journal of Climatology*, vol. 20 ; pp. 1017-1031.
- BRUNETTI M., MAUGERI M., NANNI T., 2001. Changes in total precipitation, rainy days and extreme events in Northeastern Italy. *International Journal of Climatology*, vol. 21 ; pp. 861-871.
- BRUNTLAND G., (Ed.) 1987. *Our common future. The World commission on Environment and Development.* Oxford University Press, 398 p.
- BUFFAULT P., 1913. *Le Briançonnais forestier et pastoral.* Paris, Berger-Levrault ; 232 p.

- BUMA J., DEHN M., 2000. Impact of climate change on a landslide in south East France, simulated using different GCM scenarios and downscaling methods for local precipitations. *Climate Research*, vol. 15 ; pp. 69-81.
- CAINE N., 1980. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler*, vol. 62A ; pp. 23-27.
- CALVACHE M.L., VISERAS C., FERNANDEZ J., 1997. Controls on fan development – evidence from fan morphometry and sedimentology ; Sierra Nevada, SE Spain. *Geomorphology*, t. 21 ; pp. 69-84.
- CANNON S.H., RENEAU S.L., 2000. Conditions for generation of fire-related debris flows, Capulin Canyon, New Mexico. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 25 ; pp. 1103-1121.
- CANNON S.H., KIRKHAM R.M., PARISE M., 2001. Wildfire-related debris-flow initiation processes, Storm King Mountain, Colorado. *Geomorphology*, vol. 39 ; pp. 171-188.
- CARNELLI A.L., THEURILLAT J.P., THINON M., VADI G., TALON B., 2004. Past uppermost tree limit in the Central European Alps (Switzerland) based on soil and soil charcoal. *The Holocene*, vol. 14, n°3 ; pp. 393-405.
- CARRARA A., CROSTA G., FRATTINI P., 2003. Geomorphological and historical data in assessing landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 28 ; pp. 1125-1142.
- CARREGA P., DUBREUIL V., RICHARD Y., 2004. Climatologie et développement durable. *Historiens & Géographes*, n°387 ; pp. 205-209.
- CENDERELLI D.A., KITE S.J., 1998. Geomorphic effects of large debris flows on channel morphology at North Fork Mountain, Eastern West Virginia, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 23 ; pp. 1-19.
- CERIANI M., LAUZI S., PADOVAN N., 1992. Rainfalls and landslides in the Alpine area of Lombardia Region, Central Alps, Italy. *Proceedings of the International Symposium Interpraevent*, Bern, vol. 2 ; pp. 9-20.
- CHARTRAND S.M., WHITING P.J., 2000. Alluvial architecture in headwater streams with special emphasis on step-pool topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 25 ; pp. 583-600.
- CHAU K.T., LO K.H., 2004. Hazard assessment of debris flows for Leung King Estate of Hong Kong by incorporating GIS with numerical simulations. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, vol. 4 ; pp. 103-116.
- CHAU K.T., LO K.H., 2005. Author's reply to discussion on "Hazard assessment of debris flows for Leung King Estate of Hong Kong by incorporating GIS with numerical simulations" by S. Parry, M. E. Ruse and S. J. Williamson. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, vol. 5 ; pp. 25-27.

- CHENG J.D., LIN L.L., LU H.S., 2002. Influences of forest on water flows from headwater watersheds in Taiwan. *Forest Ecology and Management*, vol. 165 ; 11-28.
- CHEVALLIER P., COUAILHAC M.J., 1991. *Les dauphinois et leurs forêts aux 18^{ème} et 19^{ème} siècles*. Grenoble – Université Pierre Mendès-France ; 199 p.
- CHIN A., 2003. The geomorphic significance of step-pools in mountains streams. *Geomorphology*, vol. 55 ; pp. 125-137.
- CLEMENT D., 2000. *La torrentialité en Basse Clarée – haute Durance (Briançonnais, Hautes Alpes)*. Mémoire de maîtrise, Université Paris 7 ; 212 p.
- COE J.A., GODT J.W., PARISE M., MOSCARIELLO A., 2003. Estimating debris-flow probability using fan stratigraphy, historic records, and drainage-basin morphology, Interstate 70 highway corridor, central Colorado, U.S.A. In : RICKENMANN & CHEN (Eds), *Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*. Milpress, Rotterdam ; pp. 1085-1096.
- COJEAN R., LAUGIER P., LE MIGNON G., POLLET N., THENEVIN I., FLEURISSON J.A., 2002. *Risques naturels et montagne*. Contribution d'ARMINES-CGI au projet de recherche Risques Naturels et Prévention ; 290 p. Disponible en ligne : www.fondation.maif.fr/projets_risques_naturels/armines-cgi_sf.pdf (consulté le 08/06/05)
- COMBES F., HURAND A., MEUNIER M., 1995. La forêt de la montagne : un remède aux crues. In : MEUNIER M., (Ed.), *BVRE de Draix*. CEMAGREF Editions, Compte-Rendu Recherches, vol. 3 ; pp. 113-121.
- CONEDERA M., PETER L., MARXER P., FORSTER F., RICKENMANN D., RE L., 2003. Consequences of forest fires on the hydrogeological response of mountain catchments: a case study of the Riale Buffaga, Ticino, Switzerland. *Earth surface processes and landforms*, vol. 28 ; pp. 117-129.
- CONVERSINI P., SALCIARINI D., FELICIONI G., BOSCHERINI A., 2005. The debris flow hazard in the Lagarelle Creek in the eastern Umbria region, central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 5 ; pp. 275-283.
- COQUE R., 1998. *Géomorphologie*. Armand colin ; 503 p.
- COSANDEY C., 1995. La forêt réduit-elle l'écoulement annuel ? *Annales de Géographie*, n°581-582 ; pp. 7-25.
- COSANDEY C., ANDREASSIAN V., MARTIN C., DIDON-LESCOT J.F., LAVABRE J., FOLTON N., MATHYS N., RICHARD D., 2005. The hydrological impact of Mediterranean forest: a review of French research. *Journal of Hydrology*, vol. 301 ; pp. 235-249.
- COSSART E., 2002. Les écroulements rocheux en Clarée (Briançonnais, Hautes-Alpes) : une origine paraglacière ? *Environnements Périglaciaires*, n°9 ; pp. 36-51.

- COSSART E., FORT M., JOMELLI V., GRANCHER D., 2006. Les variations glaciaires en Haute-Durance (Briançonnais, Hautes-Alpes) depuis la fin du 19^{ème} siècle : mise au point d'après les documents d'archives et la lichénométrie. *Quaternaire*, Vol. 17 ; pp. 75-92.
- COUSSOT P., 1996. *Les laves torrentielles. Connaissances à l'usage du praticien*. CEMAGREF Editions ; 177 p.
- COUSSOT P., MEUNIER M., 1996. Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*, Vol. 40 ; pp. 209-227.
- CROSTA G.B., FRATTINI P., 2000. Rainfall threshold for triggering soil slips and debris flow. In : Mugnai A., et Roth G. (eds), *Mediterranean storms: Proceedings of the EGS 2nd Plinius Conference, Sienna, Italy* ; pp. 463-487.
- CROSTA G.B., FRATTINI P., 2004. Controls on modern alluvial fan processes in the central Alps, northern Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 29 ; pp. 267-293.
- DAGORNE A., DARS R., 1999. *Les risques naturels*. Que sais-je ? P.U.F. ; 128 p.
- D'AGOSTINO V., CERATO M., COALI R., 1996. Il trasporto solido di eventi estremi nei torrenti del Trentino Orientale. *Internationales Symposium Interpraevent, Garmisch-Partenkirschen, Band 1* ; pp. 377-386.
- D'AGOSTINO V., MARCHI L., 2001. Debris flow magnitude in the Eastern Italian Alps : data collection and analysis. *Physic and Chemistry of the Earth (C)*.vol. 26, n°9 ; pp. 657-663.
- D'AMATO AVANZI G., GIANNECCHINI R., PUCCINELLI A., 2004. The influence of the geological and geomorphological settings on shallow landslides. A, example in the temperate climate environment: the June 19, 1996 event in northwestern Tuscany (Italy). *Engineering Geology*. Vol. 23 ; pp. 215-228.
- D'AMBROSIO D., DI GREGORIO S., IOVINE G., 2003. Simulating debris flows through a hexagonal cellular automata model: SCIDDICA S_{3-hex} . *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 3 ; pp. 545-559.
- DAUPHINE A., 2001. *Risques et catastrophes*. Armand Colin ; 288 p.
- DEARING J.A., BATTARBEE R.W., DIKAU R., LAROCQUE I., OLDFIELD F., 2006. Human-environment interactions: learning from the past. *Regional Environmental Change*, vol. 6 ; pp. 1-16.
- DEBARBIEUX B., 1998. Les problématiques de l'image et de la représentation en géographie. In : BAILLY (Dir.), *Les concepts de la géographie humaine*. Masson ; pp. 199-211.
- DECAULNE A., 2005. L'apport des données géomorphologiques et historiques à l'analyse diachronique du couple aléa-vulnérabilité dû aux avalanches et aux coulées de débris dans les fjords d'Islande nord-occidentale. *Noröis*, n°194 ; pp. 59-72.

- DECAULNE A., SÆMUNDSSON P., PETRURSSON O., 2005. Debris flow triggered by rapid snowmelt: a case study in the Gleðarhjalli area, northwestern Iceland. *Geografiska Annaler*, vol 84A, n°4 ; pp. 487-500.
- DE CRECY L., 1988. L'histoire de la RTM. Quelques réflexions d'un praticien. *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, tome 59/1 ; pp. 17-28.
- DEGANUTTI A.M., MARCHI L., ARATTANO M., 2000. Rainfall and debris-flow occurrence in the Moscardo basin (Italian Alps). In : Wieczorek, G.F., and Naeser, N.D., (Eds.), *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment: Proceedings of the Second International Conference*, Taipei, Taiwan, August 16-18, 2000, A.A. Balkema, Rotterdam ; pp. 67-72.
- DEHN M., BUMA J., 1999. Modelling future landslide activity based on general circulation models. *Geomorphology*, vol. 30 ; pp. 175-187.
- DE JONG C., 1992. A catastrophic flood/multiple debris flow in a confined mountain stream: an exemple from the Schmiedlaine, southern Germany. *Proceeding of the Chengdu Symposium : Erosion, Debris flow and Environment in Mountains Regions*. IAHS Publ. N°209 ; pp. 237-245.
- DE JONG C., COLLINS D., RANZI R., (Eds), 2005. *Climate and hydrology in mountains areas*. J. Wileys & Sons ; 338 p.
- DELSIGNE F., LAHOUSSE P., FLEZ C., GUITER G., 2001. Le Riou Bourdoux : un « monstre » sous haute surveillance. *Revue Forestière Française*, n°5 ; pp. 527-541.
- DEMANGEON A., 1905. *Les sources de la géographie de la France aux archives nationales*. Paris – Société Nouvelle de Librairie et d'Édition ; 120 p.
- DEMONTZEY P., 1894. *L'extinction des torrents en France par le reboisement*. Paris, Imprimerie Nationale ; 449 p.
- DENEL V., 1997. *L'arbre et la forêt dans le paysage de la haute vallée de la Clarée*. Mémoire de Maîtrise, Université des Sciences et Technologie de Lille ; 98 p.
- DERIOZ P., 1999. Comment quantifier le phénomène du boisement spontané : inventaire des inventaires à l'échelle nationale. *Ingénieries – EAT*, n° spécial *Boisement naturels des espaces agricoles en déprise* ; pp. 11-23.
- DERRUAU M., 1970. *Précis de géomorphologie*. Masson – Paris ; 453 p.
- DE SCALLY F.A., SLAYMAKER O., OWENS I.F., 2001. Morphometric controls and basin response in the Cascade Mountains. *Geografiska Annaler*, vol. 83A, n°3 ; pp. 117-130.
- DE SCALLY F.A., OWENS I.F., 2004. Morphometric controls and geomorphic responses on fans in the southern Alps, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 29 ; pp. 311-322.

- DESCROIX L., GAUTIER E., 2002. Water erosion in the southern French Alps : climatic and human mechanism. *Catena*, Vol. 50 ; pp. 53-85.
- DGFAR (Direction Générale de la Forêt et des Affaires Rurales), 2004. *La lettre du Département de la Santé des Forêts*, n°30 ; 12 p.
- DESHAIES M., 2003. Les Alpes, un espace à risques ? In : MORINIAUX V. (dir.), *Les risques*. Editions du Temps ; pp. 205-221.
- DIDIER L., BRUN J.J., 1998. Limite supraforestière et changements environnementaux pour une approche pluriscale et spatialisée des écosystèmes d'altitude. *Géographie Physique et Quaternaire*, vol. 52, n°2 ; pp. 1-9.
- DOBBERTIN M., HILKER N., REBETEZ M., ZIMMERMAN N. E., WOHLGEMUTH T., RIGLING A., 2005. The upward shift in altitude of pine mistletoe (*Viscum album* ssp. *austriacum*) in Switzerland – the result of climate warming ? *International Journal of Biometeorology*, n°50 ; pp. 40-47.
- DOLLFUS O., D'ERCOLE R., 1996. La mémoire des catastrophes au service de la prévision et de la prévention des risques naturels. In : *Risques naturels, risques de sociétés*, Bailly A. (Dir.), Economica, Paris, pp. 7-18.
- DUCHÊNE F., MARTINAIS E., MOREL JOURNAL C., 2003. Le risque comme représentation : une contribution de la géographie sociale. In : MORINIAUX V. (dir.), *Les risques*. Editions du Temps ; pp. 88-105.
- ERGENZINGER P., 1992. Riverbed ajustement in a step-pool system : Lainbach, Upper Bavaria. In : BILLI R., HEY R.D., THORNE C.R., TACCONI P. (Eds), *Dynamics of Gravel-bed Rivers*, Wiley & Sons ; 415-430.
- EYBERGEN J., IMESON F., 1989. Geomorphologic processes and climate change. *Catena*, vol. 16 ; pp. 307-319.
- FANTHOU T., GAMBIER G., COLAS G., POUPELLOZ B., 1991. *Atlas Départemental des Risques Naturels et Technologiques des Hautes-Alpes*. Préfecture et Conseil général des Hautes-Alpes, CETE Méditerranée ; 100 p.
- FANTHOU T., 1994. *Les risques naturels dans le département des Hautes-Alpes, chroniques et territoires*. Thèse de doctorat, Université de Paris 7 ; 225 p.
- FAO (Food Administration Organisation), 1997. *Changement de climat et production agricole*. Polytechnica, Paris ; 472 p.
- FAUQUETTE S., TALON B., 1995. Histoire de la végétation forestière d'un site bu Briançonnais : le lac de Cristol (Hautes-Alpes, France). *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences, série II a*, T. 321 ; pp. 255-262.
- FERRAND H., 2002. *Le pays Briançonnais. De Briançon au Viso, la vallée de la Clarée et la Queyras*. Editions Lacour (réimpression de l'ouvrage paru en 1914) ; 97 p.

- FLEZ C., LAHOUSSE P., 2000. Interactions entre gestion du risque torrentiel et extension urbaine dans une station touristique de montagne : l'exemple de St Chaffrey (Serre-Chevalier, Hautes Alpes, France). In : *Actes du colloque « Risques et Territoire »*, Lyon, t.2 ; pp. 275-288.
- FLEZ C., LAHOUSSE P., 2002. La gestion du risque torrentiel à Serre-Chevalier : acteurs et enjeux. *L'Espace Géographique*, n°2 ; pp.163-173.
- FLEZ C., LAHOUSSE P., 2003. Contribution to assessment of the role of anthropic factors and bio-climatic controls in contemporary torrential activity in the Southern Alps (Ubaye valley, France) in *The Mediterranean world environment and history*. Elsevier ; pp. 105-118.
- FLEZ C., LAHOUSSE P., 2004a. Recent evolution of natural hazard management policy in France, the example of Serre-Chevalier (French Alps). *Environmental Management*, vol. 34, n°3 ; pp. 353-362.
- FLEZ C., LAHOUSSE P., 2004b. Example of Holocene alpine torrent response to environment changes: contribution to assessment of forcing factors. *Quaternaire*, vol. 15, n° 1-2 ; pp. 167-176.
- FLEZ C., GARITTE G., 2006. Contribution à la connaissance des facteurs responsables de la rétraction contemporaine des bandes actives torrentielles ; tentative de régionalisation à travers l'exemple de quatre bassins versants élémentaires (Ubaye et Haute Durance). In : ALLEE et LESPEZ (dir.), *L'érosion entre société, climat et paléoenvironnement*, Presses Universitaires Blaise Pascal, collection Nature-Société ; pp. 291-296.
- FLORSHEIM J.L., MOUNT J.F., RUTTEN L.T., 2001. Effect of base level change on floodplain and fan sediment storage and ephemeral tributary channel morphology, Navarro River, California. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 26 ; pp. 219-232.
- FRACCAROLLO L., PAPA M., 2000. Numerical simulation of real debris-flow events. *Physic and Chemistry of the Earth (B)*, vol. 25, n°9 ; pp. 757-763.
- FRANCOU B., 1988. *L'éboulisation en haute montagne*. Thèse de doctorat, Centre de Géomorphologie du C.N.R.S., Editec, Caen, 2 tomes ; 696 p.
- FRANCOU B., 1993. *Hautes montagnes, passion d'exploration*. Masson ; 202 p.
- FRANZI L., BIANCO G., 2001. A statistical method to predict debris flow deposited volumes on a debris fan. *Physics and Chemistry of the Earth (C)*, vol. 26, n°9 ; pp. 683-688.
- FRAZER E.D.G., MABEE W., SLAYMAKER O., 2003. Mutual vulnerability, mutual dependence. The reflexive relation between human society and the environment. *Global Environmental Change*, vol. 13 ; pp. 137-144.
- FRIEDMAN J.M., OSTERKAMP W.R., LEWIS W.M., 1996. The role of vegetation and bed-level fluctuations in the process of channel narrowing. *Geomorphology*, vol. 14 ; pp. 341-351.

- GALGARO A., TECCA P.R., GENEVOIS R., DEGANUTTI M., 2005. Acoustic module of the Acquabona (Italy) debris flow monitoring system. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 5, pp. 211-215.
- GAMPER C.D., THÖNI M., WECK-HANNEMANN H., 2006. A conceptual approach to the use of Cost Benefit and Multi Criteria Analysis in natural hazard management. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 6 ; pp. 293-302.
- GANDERTON P.T., 2005. "Benefit-cost analysis" of disaster mitigation: application as a policy and decision-making tool. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 10 ; pp. 445-465.
- GARITTE G., 2000. *Le Riou Chanal (Alpes de Haute-Provence). Géomorphologie et risques associés*. Mémoire de DEA, UFR de Géographie, Université des Sciences et Technologie de Lille ; 99 p.
- GARITTE G., 2006. Les relations entre torrents et société. L'exemple de la vallée de la Clarée (Hautes-Alpes, France). *Actes du colloque international « Interactions Nature-Société : analyses et modèles*. UMR6554 LETG, La Baule 3-6 mai 2006. 5 p. (Disponible sur Internet à l'adresse suivante : http://letg.univ-nantes.fr/COLLOQUE/pdf/C1_0405_GARITTE.pdf ; consulté le 12/08/06)
- GARITTE G., LAHOUSSE P., 2000. Les pulsations récentes du glacier du Casset dans le Pelvoux. *Mappe Monde*, n°59 ; pp. 18-21.
- GARITTE G., LAHOUSSE P., 2002. Contribution à l'évaluation de l'aléa torrentiel dans le bassin versant du Riou Chanal (Alpes de Haute-Provence, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n°1 ; pp. 61-70.
- GARITTE G., THENARD L., 2005. Les cônes de déjection torrentiels de la vallée de la Clarée (Alpes du sud, France). Analyses morphométriques et topométriques. *Cahiers de Géographie Physique*, UFR de Géographie et Aménagement de Lille, n°15 ; pp. 21-31.
- GARITTE G., LAHOUSSE P., THENARD L., SALVADOR P.-G. Evolution contemporaine de l'activité torrentielle sur les cônes de déjection de la basse vallée de la Clarée (Briançonnais, Alpes du Sud). Soumis à *Géomorphologie : relief, processus, environnement*.
- GARNON P., 1996. *Le développement agricole d'une commune rurale du Briançonnais : Val-des-Prés*. Editions Transhumances, Val-des-Prés ; 26 p.
- GENEVOIS R., GALGARO A., TECCA P.R., 2001. Image analysis for debris flow properties estimation. *Physic and Chemistry of the Earth (C)*, Vol. 26, n°9 ; pp. 623-631.
- GHILARDI P., NATALE L., SAVI F., 2001. Modelling debris flow propagation and deposition. *Physic and Chemistry of the Earth (C)*, vol. 26, n°9 ; pp. 651-656.
- GIDON M., 1998-2006. *Géologie et paysages dans les Alpes françaises*. "http://www.geol-alp.com" (consulté le 11/03/06).

- GILARD O., 1998. *Les bases techniques de la méthode inondabilité*. CEMAGREF Editions ; 207 p.
- GINTZ D., HASSAN M. A., SCHMIDT K.-H., 1996. Frequency and magnitude of bedload transport in a mountain river. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 21 ; pp. 433-445.
- GIORGI F., 2005. Climate change prediction. *Climatic Change*, vol. 73 ; pp. 239-265.
- GIRARDIN P., 1910. Etudes de cônes de déjection. Le torrent de l'Envers de Sollières en Maurienne. *Annales de Géographie*, vol. 19 ; pp. 193-208.
- GIVONE P., 2005. Détermination des risques d'inondation, effets de l'aménagement de l'espace. *Comptes Rendu de l'Académie des Sciences - Geosciences*, vol. 337 ; pp. 229-241.
- GLADE T., 2005. Linking debris-flow hazard assessments with geomorphology. *Geomorphology*, vol. 66 ; pp. 189-213.
- GOUY GILBERT C., 1990. *La protection contre les risques naturels dans les zones de montagne*. Rapport inédit du Muséum d'Histoire Naturelle de Grenoble ; 50 p.
- GRABHERR G., GOTTFRIED M., HARALD P., 1994. Climate effects on mountain plants. *Nature*, vol. 369 ; pp. 448.
- GRAMS P.E., SCHMIDT J.C., 2002. Streamflow regulation and multi-level flood plain formation: channel narrowing on the aggrading Green river in the eastern Uinta Mountains, Colorado and Utah. *Geomorphology*, vol. 44 ; pp. 337-360.
- GRELOT F., 2004. *Gestion collective des inondations. Peut-on tenir compte de l'avis de la population dans la phase d'évaluation économique a priori ?* Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris ; 405 p.
- GUILLAUME P., 1887. Les forêts des Hautes-Alpes en 1727-1728 et la question des déboisements d'après des documents officiels inédits. *Bulletin de la Société d'Etudes des Hautes-Alpes* ; pp. 81-114.
- GUILLEMIN P., 1899. Tournée de l'intendant Pajot de Marcheval dans le Haut Dauphiné en juillet 1762. *Annuaire du Club Alpin Français*, vol. 25 ; 31 p.
- GUIOT J., BEAULIEU (DE) J.L., BEGEOT C., BOSSUET G., BRUGIAPAGLIA E., CARCAILLET C., CHEDDADI R., EDOUARD J.L., GACHET S., GADBIN C., GUIBAL F., JOLLY D., KELLER T., MAGNY M., NAKAGAWA T., NICAULT A., PONEL P., RATHGEBER C., SCHOELLAMMER P., RICHARD H., ROCHE P., RUFFALDI P., TALON B., 1999. *Variations depuis 10000 ans de la répartition et de la productivité des forêts d'altitude dans les Alpes et le Jura et simulations des changements futurs*. Article issu du projet PEVS-SEAH / facteurs anthropiques, non publié ; 21 p. Disponible en ligne à l'adresse suivante : hal.ccsd.cnrs.fr/docs/00/05/92/24/PDF/Guiot%20article%20SEAH99.pdf. ; consulté le 10/03/06
- GUISAN A., THEURILLAT J.P., 2000. Assessing alpine plant vulnerability to climate change: a modelling perspective. *Integrated Assessment*, vol. 1 ; pp. 307-320.

- HALWAS K.L., CHURCH M., 2002. Channel units in small, high gradient streams on Vancouver Island, British Columbia. *Geomorphology*, vol. 43 ; pp. 243-256.
- HAMPEL R., 1977. Geschiebewirtschaft in Wildbächen. *Wildbach und Lawinenverbau*, vol. 41, n°1 ; pp. 3-34.
- HANTEL M., EHRENDORFER M., HASLINGER A., 2000. Climate sensitivity of snow cover duration in Austria. *International Journal of Climatology*, vol. 20 ; pp. 615-640.
- HARVEY A.M., 2002. The role of base-level change in the dissection of alluvial fans: case studies from southeast Spain and Nevada. *Geomorphology*, vol. 45 ; pp. 67-87.
- HÄTTENSCHWILER S., KÖRNER C., 1995. Responses to recent climate warming of *Pinus sylvestris* and *Pinus cembra* within their montane transition zone in the Swiss Alps. *Journal of Vegetation Science*, vol. 6 ; pp. 357-368.
- HE Y.P., XIE H., WEI F.Q., ZHONG D.L., GARDNER J.S., 2003. GIS-based hazard mapping and zonation of debris flows in Xiaojiang Basin, southwestern China. *Environmental Geology*, vol. 45 ; pp. 286-293.
- HEIDERICH D., 2005. La perception du risque dans la société de la peur. *Cahiers Espaces*, n°85 ; pp. 8-15.
- HEIMANN D., SEPT V., 2000. Climate change estimates of summer temperature and precipitation in the Alpine region. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 66 ; pp. 1-12.
- HOLLING C.S., 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, n°4 ; pp. 1-23.
- HUBERT G., LEDOUX B., (dir.), 1999. *Le coût du risque... L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées ; 231 p.
- HUBERT G., RELIANT C., 2003. Cartographie réglementaire du risque d'inondation : décision autoritaire ou négocié ? *Annales des Ponts et Chaussées*, n°105 ; pp. 24-31.
- HÜBL J., STEINWENDTNER H., 2000. Debris flow hazard assessment and risk mitigation. *Felsbau*, n°1 ; pp. 17-23.
- HÜBL J., STEINWENDTNER H., 2001. Two-dimensional simulation of two viscous debris flows in Austria. *Physics and Chemistry of the Earth (C)*, vol. 26, n°9 ; pp. 639-644.
- HUFSCHMIDT G., CROZIER M., GLADE T., 2005. Evolution of natural risk: research framework and perspectives. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 5 ; pp. 375-387.
- HUNGR O., MORGAN G.C., KELLERHALS R., 1984. Quantitative analysis of debris torrent hazard for design of remedial measures. *Canadian Geotechnical Journal*, n°21 ; pp. 663-677.

- HUNGR O., EVANS S.G., BOVIS M., HUTCHINSON J.N., 2001. Review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, vol. 7 ; pp. 221-238.
- HUNGR O., 2003. Flow slides and flows in granular soils. *Actes de la conférence internationale Fast slope movements-prediction and prevention for risk mitigation, Naples, Italie, 11-13 mai 2003* ; 9 p. (www.unina2.it/flows2003/flows2003/articoli/Hungr-Flows.pdf ; (consulté le 02/11/05)
- HUNGR O., 2005. Classification and terminology. In : JAKOB M. et HUNGR O. (eds), *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Praxis – Berlin, Springer ; pp. 9-24.
- HÜRLIMANN M., RICKENMANN D., GRAF C., 2003. Field and monitoring data of debris-flow events in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 40 ; pp. 161-175.
- IBSEN M.L., BRUNSDEN D., 1996. The nature, use and problems of historical archives for the temporal occurrence of landslides, with specific reference to the South coast of Britain. Ventnor, Isle of Wight. *Geomorphology*, vol 15 ; pp. 241-258.
- IPCC, 2001a. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. HOUGHTON J.T., DING Y., GRIGGS D.J., NOGUER M., VAN DER LINDEN P.J., DAI X., MASKELL K., JOHNSON C.A., (Eds.), Cambridge University Press ; 881 p.
- IPCC, 2001b. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of working group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. MC CARTHY J. J., CANZIANI O. F., LEARY N. A., DOKKEN D. J., WHITE K. S., (Eds.), Cambridge University Press ; 1032 p.
- Institut Français de l'Environnement, 2005. *La perception sociale des risques naturels*. Les données de l'environnement, n°99 ; 4 p.
- ITAKURA Y., FUJII N., SAWADA T., 2000. Basic characteristics of ground vibration sensors for the detection of debris flow. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, Vol. 25, n°9 ; pp. 717-720.
- ITAKURA Y., INABA H., SAWADA T., 2005. A debris-flow monitoring devices and methods bibliography. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 5 ; pp. 971-977.
- IVERSON R. M., 1997. The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, vol. 35, n°3 ; pp. 245-296.
- JACQUES G., LE TREUT H., 2004. *Le changement climatique*. COI Forum Océan – Editions UNESCO ; 160 p.
- JAKOB M., 2005. A size classification for debris flows. *Engineering Geology*, n°79 ; pp. 151-161.
- JAKOB M., BOVIS M., ODEN M., 2005. The significance of channel recharge rates for estimating debris-flow magnitude and frequency. *Earth Surface Processes and Landforms*, n°30 ; pp. 755-766.

- JODELET D. (Dir.), 2003. *Les représentations sociales*. Presses Universitaires de France (7^{ème} édition) ; 456 p.
- JOLY F., 1997. *Glossaire de géomorphologie. Base de données sémiologiques pour la cartographie*. Editions Armand Colin ; 325 p.
- JOMELLI V., PECH P., CHOCHILLON C., BRUNSTEIN D., 2004. Geomorphic variations of debris flows and recent climatic change in the French Alps. *Climatic Change*, vol. 64 ; pp. 77-102.
- JORDA M., 1980. Morphogenèse et évolution des paysages dans les Alpes de Haute-Provence depuis le Tardiglaciaire, facteurs naturels et facteurs anthropiques. *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, n°472 ; pp. 295-304.
- JORDA M., PROVANSAL M., 1996. Impact de l'anthropisation et du climat sur le détritisme en France du sud-est (Alpes du sud et Provence). *Bulletin de la Société Géologique de France*, t. 167, n°1 ; pp. 159-168.
- JOUSSAUME S., 1999. *Climat d'hier à demain*. CNRS Editions / CEA ; 142 p.
- KATES R.W., PARRIS T.M., LEISEROWITZ A.A., 2005. What is sustainable development? *Environment*, vol. 47, n°3 ; pp. 8-21.
- KESSTRA S.D., VAN HUISSTEDEN J., VENDENBERGHE J., VAN DAM O., DE GIER J., PLEIZIER I.D., 2005. Evolution of the morphology of the river Drogonja (SW Slovenia) due to land-use changes. *Geomorphology*, vol. 69 ; pp. 191-207.
- KEILER M., 2004. Development of the damage potential resulting from avalanche risk in the period 1950-2000, case study Galtür. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 4 ; pp. 249-256.
- KELLER F., KIENAST F., BENISTON M., 2000 a. Evidence of response of vegetation to environmental change on high-elevation sites in the Swiss Alps. *Regional Environmental Change*, vol. 1, n°2 ; pp. 70-77.
- KELLER T., EDOUARD J.L., GUIBAL F., GUIOT J., TESSIER L., VILA B., 2000 b. Impact d'un scénario climatique de réchauffement global sur la croissance des arbres. *Comptes Rendus de l'Académie de Sciences, Sciences de la Vie*, Vol. 323 ; pp. 913-924.
- KELLER F., GOYETTE S., 2005. Snowmelt under different temperature increase scenarios in the Swiss Alps. In : DE JONG C., COLLINS D., RANZI R., (Eds), 2005. *Climate and hydrology in mountains areas*. J. Wileys & Sons ; pp. 277-289.
- KERVERN G.Y., 1995. *Eléments fondamentaux des cyndiniques*. Economica ; 111 p.
- KILIAN W., 1902. *Notes pour servir à la géomorphologie des Alpes dauphinoises*. Paris – Masson ; 26 p.
- KNIGHTON A.D., 1998. *Fluvial forms and processes*. New York, John Wiley & Sons ; 383 p.

- KONDOLF G.M., PIEGAY H., LANDON N., 2002. Channel response to increased and decreased bedload supply from land use change: contrasts between two catchments. *Geomorphology*, vol. 45 ; pp. 35-51.
- KOSTASCHUCK R.A., MAC DONALD G.M., PUTMAN P.E., 1986. Depositional process and alluvial fan-drainage basin morphometric relationships near Banff, Alberta, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 11 ; pp. 471-484.
- KOULINSKI V., 1994. *Etude de la formation d'un lit torrentiel*. CEMAGREF Etudes Equipements pour l'eau et l'environnement n° 15 ; 538 p.
- KOULINSKI V., 2005. *Etude des torrents du Rivet et de la Ruine*. Rapport inédit, commune de Val-des-Prés ; 80 p.
- KUSS M., 1900. *Restauration et conservation des terrains en montagne – Eboulements, glissements et barrages*. Paris, Imprimerie Nationale ; 71 p.
- LACAMBRE A., WICHEREK S., PEULVAST J.P., 2003. Connaissance et perception des risques naturels face à une réalité érosive. L'apport d'une enquête auprès de la population dans les communes d'Orcières et de Champoléon (Hautes-Alpes, France). *Cahiers de Géographie*, n°1, collection EDYTEM, Université de Savoie ; pp. 203-213.
- LACH J., WYŻGA B., 2002. Channel incision and flow increase of the upper Wistoka river, southern Poland, subsequent to the reforestation of its catchment. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 27 ; pp. 445-462.
- LAHOUSSE P., 1997. L'apport de l'enquête historique dans l'évaluation des risques morphodynamiques : l'exemple de la vallée de la Guisane (Hautes-Alpes, Briançonnais). *Revue de Géographie Alpine*, n° 1, p. 53-60.
- LAHOUSSE P., SALVADOR P.G., 1998 a. Briançon, 24 juillet 1995 : autopsie et enseignements d'une catastrophe naturelle, *Mappemonde*, n°50, pp. 8-12.
- LAHOUSSE P., SALVADOR P.G., 1998 b. La crue torrentielle du Bez (Hautes-Alpes, Briançonnais), 24 juillet 1995. *Geodinamica Acta*, pp. 163-170.
- LAHOUSSE P., ROMELE C., 2000. Le Ravin des Sables (Hautes-Alpes, France) : un nouveau risque torrentiel dans la vallée de la Clarée. *Revue de Géographie Physique et Quatenaire*, n°1 ; pp. 271-280.
- LAHOUSSE P., SALVADOR P.G., FLEZ C., 2002. Comportement hydrogéomorphologique d'un torrent alpin depuis 1995 : l'exemple du Ravin des Sables (Hautes-Alpes, France). *Actes du colloque « Geomorphology: from expert opinion to modelling »*, CERG, Strasbourg, pp. 167-174.
- LAHOUSSE P., GARITTE G., THENARD L., 2003. Aléa et risque torrentiel dans le Briançonnais (Alpes françaises du sud). *Cahiers de Géographie*, n°1, collection EDYTEM, Université de Savoie ; pp. 191-201.

- LAHOUSSE P., GARITTE G., FLEZ C., 2005. Conséquences cyndiniques de la réduction de l'emprise des torrents alpins sur leur cône de déjection. *Actes des deuxièmes journées d'étude de CGMED « Risques Naturels & Environnement »* Hammamet 11-13 oct. 2002 ; pp. 101-114.
- LAHUSEN R., 2005. Debris-flow instrumentation. In : JAKOB M. et HUNGR O. (eds), *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Praxis – Berlin, Springer ; pp. 291-304.
- LAJOURNADE C., BEAUFRERE C., LALANNE-BERDOUSICQ G., MARTIGNAC F., 1998. La catastrophe de Biescas du 7 août 1996 ; analyse de la crue torrentielle du rio Aras dans les Pyrénées aragonaises (Espagne). *La Houille Blanche*, n° 5/6 ; pp. 128-137.
- LANDON N., PIEGAY H., BRAVARD J.P., 1998. The Drôme river incision (France): from assessment to management. *Landscape and Urban Planning*, vol. 43 ; pp. 119-131.
- LAUGIER P., COJEAN R., 2001. Analyse de scénarios d'événements « laves torrentielles » dans le bassin versant de l'Arbonne (Bourg-Saint-Maurice, Savoie, France). *Revue Française de Géotechnique*, n°95-96 ; pp. 41-54.
- LEBART L., 1997. La « restauration » des montagnes. Les photographies de l'Administration des forêts dans la seconde moitié du 19^{ème} siècle. *Etudes photographiques*, n°3 ; pp. 82-101.
- LEBLOIS E., (Coord.), 1999. *L'influence humaine dans l'origine des crues*. Etat de l'art et actes du colloque, Paris 18-19 novembre 1996. CEMAGREF Editions ; 193 p.
- LEMOINE M., BARFETY J.C., CIRIO R., TRICART P., 1994. *Montagnes du Briançonnais*. Editions du BRGM ; 136 p.
- LE ROUX M., 2002. « Global Warming » : mythe ou réalité ? L'évolution réelle de la dynamique du temps. *Annales de Géographie*, n° 624 ; pp. 115-137.
- LE ROY LADURIE E., 1983. *L'histoire du climat depuis l'an mil*. Éditions Flammarion, Paris ; 450 p.
- LE ROY LADURIE E., 2004. *Histoire humaine et comparée du climat*. Paris –Fayard ; 740 p.
- LIEBAULT F., 2003. *Les rivières torrentielles des montagnes drômoises : évolution contemporaine et fonctionnement géomorphologique actuel (massif du Diois et des Baronnie)*. Thèse de doctorat, Université Lumière, Lyon II ; 357 p.
- LIEBAULT F., CLEMENT P., PIEGAY H., ROGERS C.F., KONDOLF G.M., LANDON N., 2002. Contemporary channel changes in the Eygues basin, southern French Prealps: the relationship of subbasin variability to watershed characteristics. *Geomorphology*. Vol. 45 ; pp. 53-66.
- LIEBAULT F., PIEGAY H., 2001. Assessment of channel changes due to long-term bedload supply decrease, Roubion River, France. *Geomorphology*, n°36 ; pp. 167-186.
- LIEBAULT F., PIEGAY H., 2002. Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of southeastern France. *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 27 ; pp. 425-444.

- LIEBAULT F., GOMEZ B., PAGE M., MARDEN M., PEACOCK D., RICHARD D., TROTTER C. M., 2005. Land-use change, sediment production and channel response in upland regions. *River Research and Applications*, vol. 21 ; pp. 739-756.
- LIEN H.P., TSAI F.W., 2003. Sediment concentration distribution of debris flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, n°12 ; pp. 995-1000.
- LOCKWOOD J.G., 2001. Abrupt and sudden climatic transitions and fluctuations: a review. *International Journal of Climatology*, vol. 21 ; pp. 1153-1179.
- LORENZONI I., PIDGEON N.F., O'CONNOR R.E., 2005. Dangerous climate change: the role for risk research. *Risk Analysis*, vol. 25, n° 6 ; pp. 1387-1398.
- LOUBIER J.C., 2004. *Perception et simulation des effets du changement climatique sur l'économie du ski et la biodiversité*. Thèse de doctorat, Université J. Fourier, Grenoble 1 ; 298 p.
- MANCHE Y., 1997. Propositions pour la prise en compte de la vulnérabilité dans la cartographie des risques naturels prévisibles, *Revue de Géographie Alpine*, T. 85, n°2 ; pp.49-62.
- MANCHE Y., 2000. *Analyse spatiale et mise en place de systèmes d'information pour l'évaluation de la vulnérabilité des territoires de montagne face aux risques naturels*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble 1 ; 156 p.
- MANN M.E., BRADLEY R.S., HUGHES M.K., 1998. Global scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature*, vol. 392 ; pp. 779-787.
- MANN M.E., BRADLEY R.S., HUGHES M.K., 2004. Corrigendum - Global scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature*, vol. 430; pp. 105.
- MARCHI L., BROCHOT S., 2000. Les cônes de déjection torrentiels dans les Alpes françaises – Morphométrie et processus de transport solide torrentiel. *Revue de Géographie Alpine*, n°3 ; pp. 23-35.
- MARCHI L., D'AGOSTINO V., 2004. Estimation of debris-flow magnitude in the Eastern Italian Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 29 ; pp. 207-220.
- MARCHI L., TECCA P.R., 1995. Alluvial fans of the Eastern Italian Alps: morphometry and depositional processes. *Geodinamica Acta*, 8, 1 ; pp. 20-27.
- MARCHI L., TECCA P.R., 1996. Magnitudo delle collate detritiche nelle Alpi Orientali Italiane. *Geingegneria Ambientale e Mineraria*, vol. 33, n°2-3 ; pp. 79-86.
- MARCHI L., ARATTANO M., DEGANUTTI A., 2002. Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps). *Geomorphology*, n°46; pp. 1-17.
- MARCHI L., PASUTO A., TECCA P.R., 1993. Flow processes on alluvial fans in the Eastern Italian Alps. *Zeitschrift für Geomorphologie*, vol. 37, n°4 ; pp. 447-458.

- MARNEZY A., 1993. Un exemple de catastrophe hydrologique évitée: l'obstruction de l'Arc par une crue du torrent de l'Envers en juin 1992. *Revue de Géographie de Lyon*, vol. 68, n°2-3 ; pp. 193-202.
- MARSTON R., FRITZ D.E., NORDBERG V., 1997. The impact of debris torrents on substrates of mountains stream. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n°1 ; pp. 21-32.
- MARSTON R., BRAVARD J.P., GREEN T., 2003. Impacts of reforestation and gravel mining on the Malnant River, Haute Savoie, France. *Geomorphology*, n°55 ; pp. 65-74.
- MARTIN D., 1890. Observations sur la marche rétrograde de la végétation dans les Hautes-Alpes. *Bulletin de la Société d'Etudes des Hautes-Alpes* ; pp. 137-156.
- MARTIN E., TIMBAL B., BRUN E., 1997. Downscaling of general circulation model outputs: simulation of snow climatology of the French Alps and sensitivity to climate change. *Climate Dynamics*, vol. 13, n°1 ; pp. 45-56.
- MASSIMO A., 2000. On debris flow evolution along a torrent. *Physic and Chemistry of the Earth (B)*, vol. 25, n°9 ; pp. 733-740.
- MATE (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement) 1997. *Plans de prévention des risques naturels prévisibles, guide général*. La Documentation Française, Paris ; 76 p.
- MAY C.L., GRESSWELL R.E., 2004. Spatial and temporal patterns of debris-flow deposition in the Oregon Coast Range, USA. *Geomorphology*, n°57 ; 135-149.
- MC DANIELS T., AXELROD L.J., SLOVIC P., 1996. Perceived ecological risks of global change. *Global Environmental Change*, vol. 6, n°2 ; pp. 159-171.
- MC INTYRE S., MC KITRICK R., 2003. Corrections to the Mann *et al.* (1998) proxy data base and northern hemispheric average temperature series. *Energy & Environment*, vol. 14, n°6 ; pp. 751-771.
- MC INTYRE S., MC KITRICK R., 2005. The M&M critique of the MBH98 northern hemisphere climate index: update and implications. *Energy & Environment*, vol. 16, n°1 ; pp. 69-100.
- MC MICHAEL A.J., KJELLSTROM T., 2002. Sustainable development, global environmental change, and public health. *ISUMA*, vol. 3, n°2 ; pp. 43-50
- MEILLER D., VANNIER P., (dir.) 1995. *La forêt, les savoirs et le citoyen*. Editions ANCR ; 380 p.
- MELELLI L., TARAMELLI A., 2004. An example of debris-flows hazard modelling using GIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 4 ; pp. 347-358.
- MELTON M.A., 1965. The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposit in Southern Arizona. *Journal of Geology*, vol 73 ; pp. 1-38.
- MENZEL A., FABIAN P., 1999. Growing season extended in Europe. *Nature*, vol. 397 ; pp. 659.

- MEUNIER M., 1991. *Eléments d'hydraulique torrentielle*. Coll. Etudes du CEMAGREF, série Montagne n°1 ; 278 p.
- MESCHINET DE RICHEMOND N., 2003. Statut et perception des catastrophes passées : vers une histoire des risques naturels. In : MORINIAUX V. (dir.), *Les risques*. Editions du Temps ; pp. 138-156.
- MEYZENQ C., 1984. *Hautes-Alpes : Ubaye, Haut-Drac, préalpes drômoises*. Editions OPHRYS ; 954 p.
- MIRAMONT C., JORDA M., PICHARD G., 1998. Evolution historique de la morphogenèse et de la dynamique fluviale d'une rivière méditerranéenne : l'exemple de la moyenne Durance (France du sud-est). *Géographie Physique et Quaternaire*, vol 52, n°3 ; pp. 1-13.
- MONTGOMERY D.R., SCHMIDT K.M., GREENBERG H.M., DIETRICH W.E., 2000. Forest clearing and regional landsliding. *Geology*, vol. 28 ; pp. 311-314.
- MORTIER F., 2001. « La forêt prend l'air » : quels impacts des modifications de l'atmosphère sur la forêt ? *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, vol. 2 ; pp. 111-118.
- MOUGIN P., 1931. *La restauration des Alpes*. Imprimerie Nationale, Paris ; 594 p.
- MOUTARD P., WAGNER P., 1976. *Construire en Clarée*. Conseil Général des Hautes-Alpes ; 34 p.
- MÜLLER R., 1960. Die Entwicklung der flußbaulichen Hydraulik. *Wasser und Energiewirtschaft* ; pp. 292-300.
- MULLER S.D., DAVID F., WICHA S., 2000. Impact de l'exposition des versants et de l'anthropisation sur la dynamique forestière dans les Alpes du sud (France). *Géographie Physique et Quaternaire*, vol. 54, n°2 ; pp. 231-243.
- NAKAGAWA T., EDOUARD J.L., DE BEAULIEU J.L., 2000. A scanning electron microscopy (SEM) study of sediments from Lake Cristol, southern French Alps, with special reference to the identification of *Pinus cembra* and other alpine *Pinus* species based on SEM pollen morphology. *Review of palaeobotany and palynology*, vol. 108 ; pp. 1-15.
- NATIONS UNIES, (Stratégie Internationale de Prévention des Catastrophes) 2003. *La prévention des catastrophes et le développement durable*. 32 p. (disponible en ligne : www.unisdr.org ; consulté le 23/04/05)
- NÖTHIGER C., ELSASSER H., 2004. Natural hazards and tourism. New findings in the European Alps. *Mountain Research and Development*, vol. 24, n°1 ; pp. 24-27.
- OKUNISHI K., SUWA H., 2001. Assessment of debris-flow hazards of alluvial fans. *Natural Hazards*, vol. 23 ; pp. 259-269.
- OWENS P.N., WALLING D.E., 2002. Changes in sediment sources and floodplain deposition rates in the catchments of the river Tweed, Scotland, over the last 100 years: the impact

- of climate and land use change. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 27 ; pp. 403-423.
- OZENDA P., 1985. *La végétation de la chaîne alpine*. Masson ; 330 p.
- PARRY S., RUSE M. E., WILLIAMSON S. J., 2005. Discussion on "Hazard assessment of debris flows for Leung King Estate of Hong Kong by incorporating GIS with numerical simulations". *Natural Hazard and Earth System Sciences*, vol. 5 ; pp. 23-24.
- PASUTO A., SOLDATI M., 2004. An integrated approach for hazard assessment and mitigation of debris flows in the Italian Dolomites. *Geomorphology*, vol. 61 ; pp. 59-70.
- PEGUY C.P., 1947. *Haute-Durance et Ubaye. Esquisse physique de la zone inter-alpine des Alpes françaises du sud*. Thèse de doctorat, Editions Arthaud, Grenoble ; 314 p.
- PEGUY C.P., 1978. Le climat de Môtetier-les-Bains et de Briançon. Recherches méthodologiques et actualisation des données. *Travaux du Laboratoire de Géographie Physique*, Université de Paris 7, n°5, fasc. 2 ; pp. 1-52.
- PEIRY J.L., 1990. Les torrents de l'Arve : dynamique des sédiments et impact de l'aménagement des bassins versant sur l'activité torrentielle. *Revue de Géographie Alpine*, tome 78, n°1-2-3 ; pp. 25-58.
- PEIRY J.L., SALVADOR P.-G., NOUGUIER F., 1994. L'incision des cours d'eau dans les Alpes du Nord : état de la question. *Revue de Géographie de Lyon*, n°69 ; pp. 47-56.
- PELTIER A., 2005. *La gestion des risques naturels dans les montagnes d'Europe occidentale. Etude comparative du Valais (Suisse), de la vallée d'Aoste (Italie) et des Hautes-Pyrénées (France)*. Thèse de doctorat, Université Toulouse le Mirail ; 741 p.
- PETRUCCI O., POLEMIO M., 2003. The use of historical data for the characterisation of multiple damaging hydrological events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 3 ; pp. 17-30.
- PERETTI-WATEL P., 2001. *La société du risque*. Editions La Découverte ; 123 p.
- PIEGAY H., PEIRY J.L., 1997. Long profile evolution of a mountain stream in relation to gravel load management: example of the middle Giffre River (French Alps). *Environmental Management*, Vol. 21, n°6 ; pp. 909-919.
- PIEGAY H., SALVADOR P.G., ASTRADE L., 2000. Réflexions relatives à la variabilité spatiale de la mosaïque fluviale à l'échelle d'un tronçon. *Zeitschrift für Geomorphology*, vol. 44, n°3 ; pp. 317-342.
- PIEGAY H., PAUTOU G., BRAVARD J.P., 2003. L'histoire contemporaine des marges fluviales : entre renaturation et dénaturation. In : PIEGAY H., PAUTOU G., RUFFINONI C., *Les forêts riveraines des cours d'eau*. Institut pour le Développement Forestier ; pp. 72-92.

- PIEGAY H., WALLING D.E., LANDON N., HE Q., LIEBAULT F., PETIOT R., 2004. Contemporary changes in sediment yield in an alpine mountain basin due to deforestation (the upper Drôme in France). *Catena*, vol. 55 ; 183-212.
- PIERSON T.C., 2005. Hyperconcentrated flow - transitional process between water flow and debris flow. In : *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, Jakob M. et Hungr O. (eds), Praxis Springer, Berlin ; pp. 159-202.
- PIGEON P., 2003. L'intérêt du risque dans l'enseignement de la géographie. In : MORINIAUX V. (dir.), *Les risques*. Editions du Temps ; pp. 9-21.
- PIGEON P., 2005. *Géographie critique des risques*. Economica ; 217 p.
- PLANTON S., DEQUE M., DOUVILLE H., SPAGNOLI B., 2005. Impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences – Geosciences*, t. 337 ; pp. 193-202.
- PLATTNER T., PLAPP T., HEBEL B., 2006. Integrating public risk perception into formal natural hazard risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 6 ; pp. 471-483.
- POITOU J.P., 1974. *La dissonance cognitive*. Armand Colin ; 125 p.
- POTTIER N., RELIANT N., HUBERT G., VEYRET Y., 2003. Les plans de prévention des risques naturels à l'épreuve du temps : prouesses et déboires d'un procédure réglementaire. *Annales des Ponts et Chaussées*, n°105 ; pp. 40-48.
- POTTIER N., VEYRET Y., MESCHINET DE RICHEMOND N., HUBERT G., RELIANT C., DUBOIS-MAURY J., 2004. Evaluation de la politique publique de prévention des risques naturels. In VEYRET Y., GARRY G, MESCHINET DE RICHEMOND N., *Risques naturels et aménagement en Europe* ; pp. 46-67.
- PRENTICE I.C., HARRISON S.P., JOLLY D., GUIOT J., 1998. The climate and biomes of Europe at 6000 yr BP: comparison of model simulations and pollen-based reconstructions. *Quaternary Science Reviews*, vol. 17 ; pp. 659-668.
- PRUDENT RICHARD G., 2006. *Recensement des études concernant les effets du climat et du réchauffement climatique sur les espaces de montagne en France métropolitaine*. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, Note Technique n°4, mars 2006 ; 52 p. (disponible sur internet à l'adresse : http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/Note_technique_No4_version_site_internet_correction_GP_27-03.pdf)
- PUDASAINI S.P., WANG Y., HUTTER K., 2005. Modelling debris flows down general channels. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 5 ; pp. 799-819.
- REBETEZ M., LUGON R., BAERISWYL P.A., 1997. Climatic change and debris flows in high mountain regions: the case study of the Ritigraben Torrent. *Climatic Change*, vol. 36 ; pp. 371-389.

- REBETEZ M., DOBBERTIN M., 2004. Climate change may already threaten Scots pine stands in the Swiss Alps. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 79 ; pp. 1-9.
- RENAUD J. P., 1994. Hannibal : son itinéraire du Rhône au dernier col alpin. *Bulletin de la Société d'Etudes des Hautes-Alpes* ; pp. 57-115.
- REY F., 2002. *Influence de la distribution spatiale de la végétation sur la production sédimentaire de ravines marneuses dans les Alpes du sud*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble 1 ; 194 p.
- REY F., ROBERT Y., VENTO O., 2002. Influence de la végétation forestière sur la formation de dépôts sédimentaires en terrains marneux. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n°1 ; pp. 85-92.
- REY F., BERGER F., QUETEL C., LE HIR C., 2003. Le rôle de protection passive de la végétation forestière vis-à-vis de l'érosion et des chutes de pierres. *Ingénieries – EAT*, n° spécial : Risques naturels et aménagement du territoire ; pp. 165-178.
- REY F., 2004. Effectiveness of vegetation barriers for marly sediment trapping. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 29 ; pp. 1161-1169.
- REY F., BALLAIS J-L., MARRE A., ROVERA G., 2004. Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences - Géosciences*, vol. 336 ; pp. 991-998.
- REYT P., 2000 a. La représentation du risque dans l'imaginaire des altitudes. *Revue de Géographie Alpine*, n°4 ; pp. 35-46.
- REYT P., 2000 b. Les dragons de la crue. *Cahiers de Géographie du Québec*, vol. 44, n°122 ; pp. 127-145.
- RICHARD D., 2002. Forêts et crues. *La Houille Blanche*, n°3 ; pp. 54-58.
- RICHEFORT I., 1988. Les archives photographiques des services de Restauration des Terrains en Montagne. *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, n°1 ; pp. 53-58.
- RICKENMANN D., 1995. Beurteilung von Murgängen. *Schweizer Ingenieur und Architekt*, vol. 48 ; 1104-1108.
- RICKENMANN D., 1997. Sediment transport in swiss torrents. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 22 ; pp. 937-951.
- RICKENMANN D., 1999. Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards*, vol. 19 ; pp. 47-77.
- RINALDI M., 2003. Recent adjustments in alluvial rivers of Tuscany, Central Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 28 ; pp. 587-608.
- RINALDI M., WYŻGA B., SURIAN N., 2005. Sediment mining in alluvial channels: physical effects and management perspectives. *River Research and Applications*, Vol. 21 ; pp. 805-828.

- ROMAN J., 1887. *Les causes du déboisement des montagnes d'après des documents historiques du 13^{ème} au 18^{ème} siècle*. Imprimerie J-C Richaud, Gap ; 14 p.
- ROMELE C., 1999. *Etude de l'évolution morphologique du chenal du Ravin des Sables : méthodes diachronique, dendrochronologique, granulométrique et cartographie (vallée de la Clarée, Hautes-Alpes)*. Mémoire de Maîtrise, UFR de Géographie et Aménagement, Université des Sciences et Technologies de Lille ; 70 p.
- ROSSI M., GATTIGLIA A., 1993. La carte de Cassini et l'archéologie du Briançonnais (Hautes-Alpes). In : *Les archéologues et l'archéologie, colloque de Bourg-en-Bresse, 25-27 sept. 1992 ; Caesardunum*, vol. 27 ; pp. 136-162
- ROUSSET C., GUIOMAR M., 1999. Le début de la torrentialité dans la bassin versant de la Fontarasse, près de Barles (Alpes-de-Hautes-Provence, France), marquer d'une rupture climatique de l'Holocène ancien. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Sciences de la Terre et des planètes*, vol. 328 ; pp. 541-546.
- ROVIRA A., BATALLA R.J., SALA M., 2005. Response of a river sediment budget after historical gravel mining (the lower Tordera, NE Spain). *River Research and Applications*, Vol. 21 ; pp. 829-847.
- SÁNCHEZ E., GALLARDO C., GAERTNER M.A., ARRIBAS A., CASTRO M., 2004. Future climate extreme events in the Mediterranean simulated by a regional climate model: a first approach. *Global and Planetary Change*, vol. 44 ; pp. 163-180.
- SCARWELL H.-J., LAGANIER R., 2004. *Risque d'inondation et aménagement durable des territoires*. Presses Universitaires du Septentrion ; 239 p.
- SCHÄR C., VIDALE P.L., LÜTHI D., FREI C., HÄBERLI C., LINIGER M., APPENZELLER C., 2004. The role of increasing temperature variability in European summer heat waves. *Nature*, vol. 427 ; pp. 332-336.
- SCHOENEICH P., BUSSET-HENCHOZ M.C., 1998. La dissonance cognitive : facteur explicatif de l'accoutumance au risque. *Revue de Géographie Alpine*, n°2 ; pp. 53-60.
- SCHUMM S.A., 1977. *The fluvial system*. Wiley & Sons ; 338 p.
- SECOND NATIONAL COMMUNICATION ON CLIMATE, 1997. *UN Framework Convention on Climate Change*. Report, Ministry of the environment, Bratislava, Slovakia ; 98 p.
- SEIJMONSBERGEN A.C., GRAAFF L.W.S., 2006. Geomorphological mapping and geophysical profiling for evaluation of natural hazard in an alpine catchment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 6 ; pp. 185-193.
- SHAKESBY R.A., DOERR S.H., 2006. Wildfire as hydrological and geomorphological agent. *Earth Science Review*, vol. 74 ; pp. 269-307.
- SIESTRUNCK R., 1999. *Voyageurs de la Clarée*. Editions Le Tournefeuille – Vallouise ; 187 p.
- SLOVIC P., 1987. Perception of risk. *Science*, vol. 236 ; pp. 280-285.

- SOON W., BALIUNAS S., 2003. Proxy climatic and environmental changes of the past 1000 years. *Climate Research*, vol. 23 ; pp. 89-110.
- SPREAFICO M., LEHMANN C., NAEF O., 1999. *Recommandations concernant l'estimation de la charge sédimentaire dans les torrents*. Groupe de travail pour l'hydrologie opérationnelle, Service hydrologique et géologique national, Berne ; 47 p + annexes.
- STINY J., 1910. *Die Murren, Versuch einer Monographie mit besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse in den Tiroler Alpen*. Innsbruck, Verlag des Wagnerschen Universitäts-Buschlandlung, (traduit en anglais par Jakob M. et Skermer N.A.) ; 105 p.
- STRUNK H., 2003. Soil degradation and overland flow as causes of gully erosion on mountain pastures and in forests. *Catena*, vol. 50 ; pp. 185-198.
- STUDER S., APPENZELLER C., DEFILA C., 2005. Inter-annual variability and decadal trends in alpine spring phenology: a multivariate analysis approach. *Climatic Change*, vol. 73 ; pp. 395-414.
- SURELL A., 1870. *Etude sur les torrents des Hautes-Alpes*. 2^{ème} édition, 2 tomes avec une suite de CEZANNE E., Dunod, Paris ; 603 p.
- TAKAHASHI T., 1987. *High velocity flow in steep erodible channel*. Proceedings of 22th I.A.H.R. Congress ; pp. 42-43.
- TAKEI A., 1984. Interdependence of sediment budget between individual torrents and river-system. *International symposium – Interpraevent*. Villach, Austria ; pp. 35-48.
- TALON B., CARCAILLET C., THINON M., 1998. Etudes pédoanthracologiques des variations de la limite supérieure des arbres au cours de l'holocène dans les Alpes françaises. *Géographie Physique et Quaternaire*, vol. 52, n°2 ; pp. 1-14.
- TANE J.L., 1995. *Chronique d'une vallée classée*. Editions Artès ; 187 p.
- TECCA P.R., GALGARO A., GENEVOIS R., DEGANUTTI A.M., 2003. Development of a remotely controlled debris flow monitoring system in the Dolomites (Acquabona, Italy). *Hydrological Processes*, vol. 17 ; pp. 1771-1784.
- THENARD L., 2002. *Morphodynamique récente d'un système fluvial alpin : l'exemple de la basse vallée de la Clarée (Hautes-Alpes, France)*. Mémoire de DEA, UFR de Géographie et aménagement, Université des Sciences et Technologies de Lille ; 96 p.
- THENARD L., GARITTE G., 2005. La crue de la rivière torrentielle Clarée du 15 octobre 2000 (Hautes-Alpes, France). *Cahiers de Géographie Physique*, UFR de Géographie et Aménagement de Lille, n°15 ; pp. 32-48
- THEURILLAT J.P., GUISAN A., 2001. Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: a review. *Climatic Change*, vol. 50 ; pp. 77-109.
- THEVENET G., ASTRADE L., BRAVARD J.P., 2003. La métamorphose des lits torrentiels à la fin du 19^{ème} siècle : un effet du changement climatique ou du reboisement (bassin du Haut-

- Bez-Drôme). *Cahiers de Géographie*, n°1, collection EDYTEM, Université de Savoie ; pp. 115-122.
- THIERY E., 1891. *Restauration des montagnes, correction des torrents, reboisement*. Encyclopédie des Travaux Publics, Librairie Polytechnique Baudry et Cie, Paris ; 527 p.
- TOLLEY C., 2002. *Les bergers transhumants. Etude d'un aspect de la société pastorale de Provence*. Mémoire de DEA, UFR Civilisation et Humanité, Université de Provence ; 174 p.
- TRICART J., 1960. Quelques données au sujet du rôle de la neige dans la crue du Guil en juin 1957. *Revue de Géographie Alpine*, t. 48, n°2 ; pp. 334-344.
- TROPEANO D., TURCONI L., 2003. Geomorphic classification of alpine catchments for debris-flow hazard reduction. In: RICKENMANN et CHEN (Eds), *Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*. Milpress, Rotterdam ; pp. 1221-1232.
- TROPEANO D., TURCONI L., 2004. Using historical documents for landslide, debris flow and stream flood prevention in Northern Italy. *Natural Hazards*, n°31 ; pp. 663-679.
- UICN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature et de ses ressources), 1980. *Stratégie mondiale de la conservation : la conservation des ressources vivantes au service du développement*. Gland, Suisse ; 59 p.
- UNDP (United Nations Development Program), 2004. *Reducing disaster risk. A challenge for development*. 161 p. Disponible en ligne : www.undp.org/bcpr (consulté le : 20/02/06)
- VALADAS B., 2004. *Géomorphologie dynamique*. Armand Colin ; 192 p.
- VALLAURI D., 1997. *Dynamique de la restauration forestière des substrats marneux avec Pinus Nigra J.F. Arn. ssp. Nigra dans le secteur haut-provençal*. Thèse de Doctorat, Université Marseille 3 ; 301 p.
- VANDENBERGHE J., 2003. Climate forcing of fluvial system development: an evolution of ideas. *Quaternary Science Review*, vol. 22 ; pp. 2053-2060.
- VAN DINE D.F., 1985. Debris flow and debris torrent in the Southern Canadian Cordillera. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 22 ; pp. 44-68.
- VEYRAT-CHARVILLON S., 2005. *Elaboration d'une méthode de prédiction du volume maximal d'une lave torrentielle*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand ; 356 p.
- VEYRET Y., PECH P., 1994. Relation élevage-couvert végétal-érosion. De l'animal « destructeur » à l'animal « protecteur » : deux visions à un siècle de distance. *Réseau érosion*, bulletin n°14, ORSTOM ; pp. 399-409.
- VEYRET Y., VIGNEAU J.P., 2004. Risques et développement durable. *Historiens & Géographes*, n°387 ; pp. 241-248.

- VIGNEAU J.P., 2005. Le réchauffement global : entre principe de précaution et rigueur scientifique. *Bulletin de l'Association de Géographes Français – Géographies*, n°4 ; pp. 497-509.
- VINET F., DEFOSSEZ S., 2006. La représentation du risque d'inondation et sa prévention. In : LAGANIER (Ed.), *Territoires, inondation et figures du risque. La prévention au prisme de l'évaluation*. Editions de l'Harmattan ; pp. 99-138.
- VIVIAN R., 1997. La mesure de l'érosion des glaciers tempérés. Essai de synthèse. *Revue de Géographie Alpine*, n°1 ; pp. 9-32.
- WALLING D.E., 1999. Linking land use, erosion and sediment yields in river basins. *Hydrobiologia*, n°410 ; pp. 223-240.
- WARNER R.F., 2000. Cross channel changes along the Durance River, Southern France, over the last 100 years using cartographic data. *Regulated Rivers: Research and Management*, vol. 16 ; pp. 141-157.
- WHITE G. (Ed.) 1974. *Natural hazards*, Oxford University Press, New-York ; 288 p.
- WIECZOREK G.F., 1987. Effect of rainfall and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California. In : Costa J.E. et Wieczorek G.F. (Eds), *Debris Flows, Avalanches: Process, Recognition and Mitigation*, Reviews in Engineering Geology, n°7 ; pp. 93-104.
- WIECZOREK G.F., GLADE T., 2005. Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In : *Debris-flow hazards and related phenomena*, Jacob M. et Hungr O. (eds), Praxis Springer, Berlin ; pp. 325-362.
- WILFORD D.J., SAKALS M.E., INNES J.L., SIDLE R.C., BERGERUD W.A., 2004. Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides*, n°1 ; pp. 61-66.
- WILSON R.C., WIECZOREK G.F., 1995. Rainfall threshold for initiation of debris flows at La Honda, California. *Environmental and Engineering Geoscience*, vol. 1, n°1 ; pp. 11-27.
- WYŻGA B., 2001. A geomorphologist's criticism of the engineering approach to channelization of gravel-bed rivers: case study of the Raba river, Polish Carpathians. *Environmental Management*, vol. 28, n°3 ; pp. 341-358.
- YIOU P., MASSON-DELMOTTE V., 2005. Trends in sub-annual climate variability since the Little Ice Age in Western Europe. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences – Geoscience*, t. 337 ; pp. 1001-1012.
- ZIMMERMANN M., MANI P., ROMANQ H., 1997. Magnitude-frequency aspects of alpine debris flows. *Eclogae Geologiae Helvetiae*, vol. 90, n°3 ; pp. 415-420.

Annexes

Annexe 1

Note méthodologique sur l'utilisation de la topométrie dans l'étude des torrents

Les levés topométriques effectués dans le cadre de cette étude sont basés sur l'utilisation d'un tachéomètre infrarouge (modèle Leica TC 307S). Cet instrument offre une très grande précision mais nécessite une certaine rigueur quant aux méthodes de levé employées sur le terrain.

Le profil en long

Le levé topométrique débute par la mise en station du tachéomètre dans l'axe du talweg du torrent, cela consiste à placer l'appareil à l'horizontal sur son trépied et à entrer différents paramètres tels que la hauteur de l'appareil, la taille de la mire utilisée.... Les mesures s'effectuent d'aval vers l'amont, en suivant l'axe du chenal. Lorsque le chenal du torrent est sinueux, il est indispensable de faire un changement de station pour éviter de fausser le levé (fig. 130). Lors des changements de station, il est nécessaire de prendre un point de mesure commun aux deux stations : le dernier point visé vers l'amont de la station N correspond alors au premier point visé vers l'aval de la station N+1.

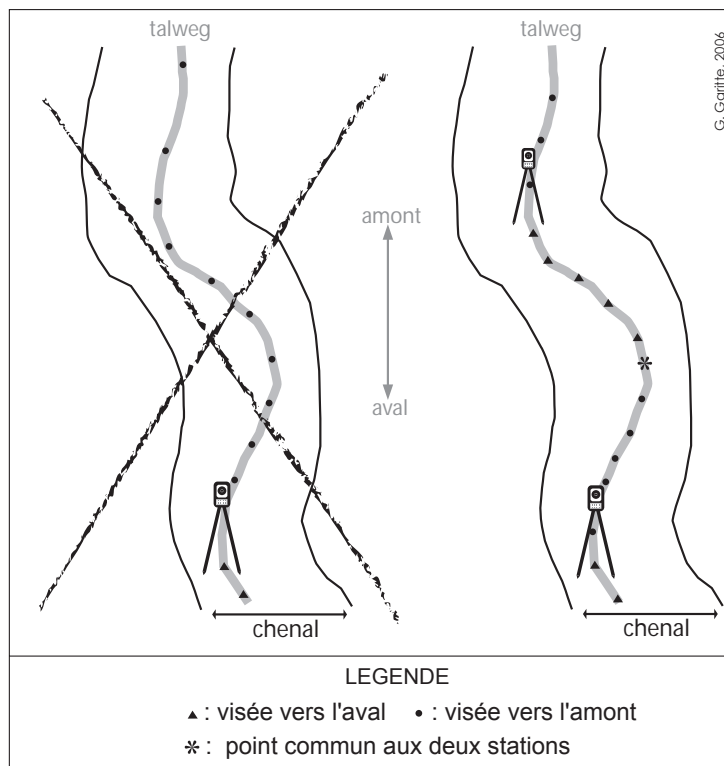


Figure 130 : la méthode de levé du profil en long (1)

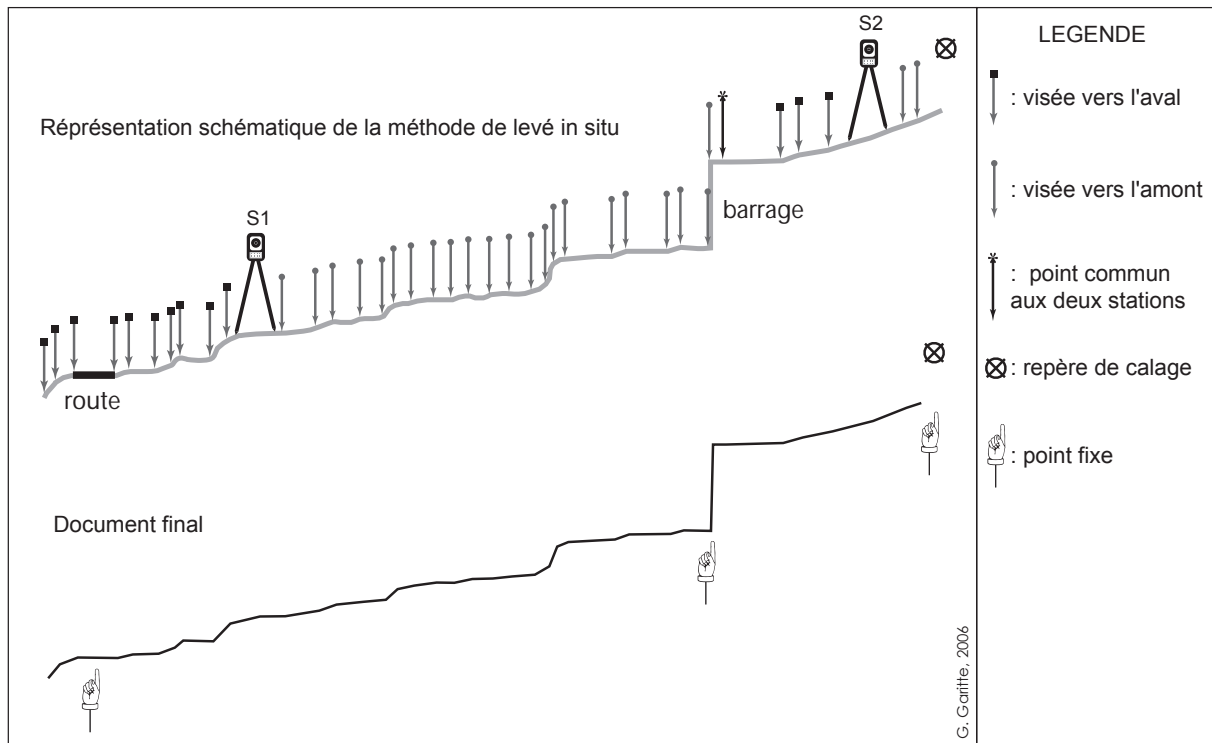


Figure 131 : la méthode de levé du profil en long (2)

Pour pouvoir comparer les profils entre eux il est nécessaire de caler le profil en long sur des points fixes (fig. 131). Ces points de calages peuvent correspondre à des infrastructures routières, des ouvrages de correction torrentielle ou, le cas échéant, des affleurements de roche en place situés dans l'axe du profil.

Le profil en travers

Des profils en travers du chenal ont été levés régulièrement le long des chenaux torrentiels. Ces profils en travers permettent d'appréhender la forme générale du chenal et permettent aussi de localiser la présence éventuelle de bourrelets torrentiels. Les secteurs déterminés sont tout d'abord précisément localisés lors du profil en long. Les profils en travers nécessitent d'être calés sur des points fixes pour pouvoir faire l'objet d'un suivi. Les points de calage correspondent le plus souvent à des clous plantés dans les arbres qui bordent le torrent, à des marquages sur des affleurements de roche en place ou, faute de mieux, à des blocs présents sur les berges (fig. 132).

Pour plus de précision, lors du levé du profil en travers, le tachéomètre doit se situer dans l'axe du profil. Lorsqu'il s'agit de dresser un profil en travers de grande longueur, comme par exemple sur les cônes de déjection, il est nécessaire d'effectuer des changements de station, en suivant la même méthode que lors du levé d'un profil en long.

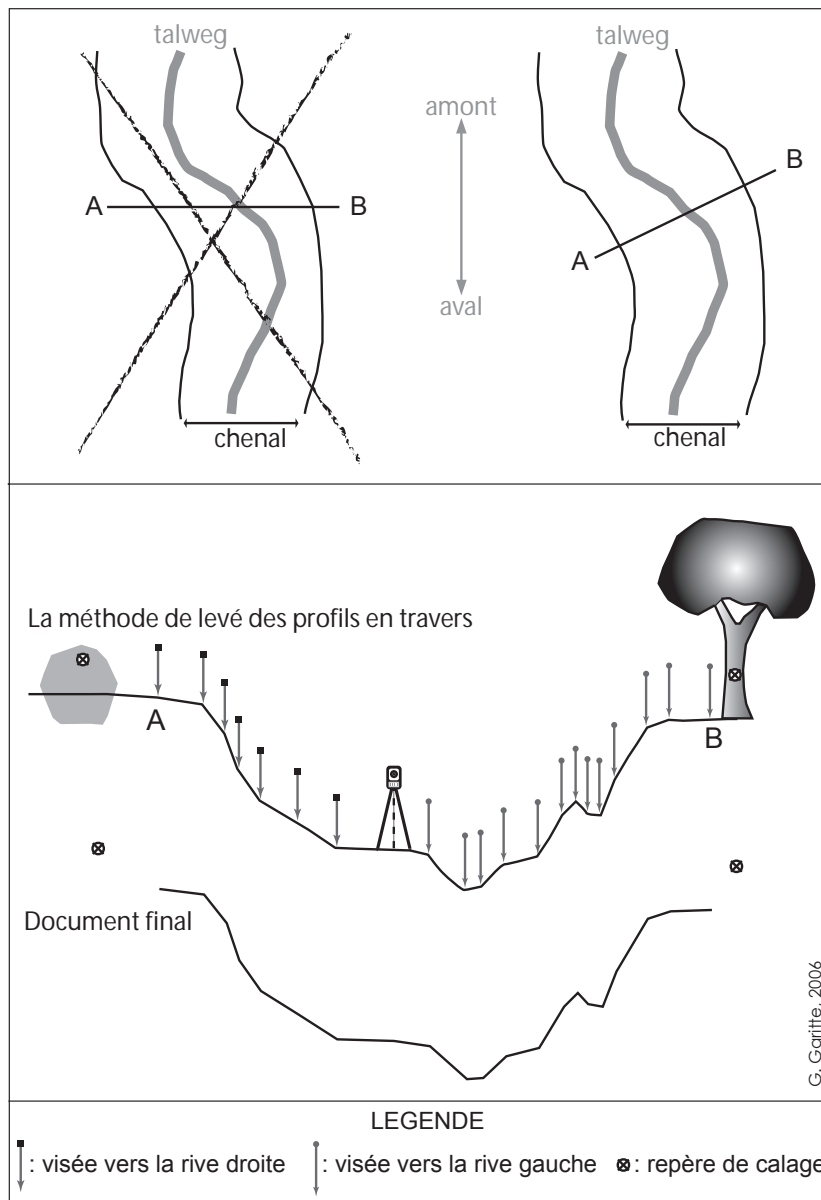


Figure 132 : la méthode de levé du profil en travers

Le traitement des données

Lors du levé de terrain les données sont enregistrées automatiquement dans la mémoire interne de l'appareil. Une fois les données brutes extraites avec le logiciel *ad hoc* (Leica Survey Office®), elles sont traitées avec un logiciel tableur (type Excel®) (tableaux 15 et 16).

A partir du fichier qui comprend l'ensemble des données, on sélectionne les seules mesures nécessaires, à savoir la distance horizontale (dZ) et la distance verticale (Dh) pour chacun des points mesurés. Ensuite, grâce à différentes formules et surtout en tenant compte des retournements et des changements de station qu'il est indispensable de noter lors du levé, on obtient les données qui permettent de

Les torrents de la vallée de la Clarée – Gilles GARITTE

dresser le profil en long. Ces données peuvent alors être exploitées directement sous Excel® ou exportées vers un logiciel de dessin vectoriel, du type Adobe® Illustrator®, pour un meilleur rendu visuel.

Début du job:					
Date: 19/ 7/2002					
Type d'instrument: TC307S	No série: 649325				
Chantier: GRANON PL	Opérateur: GG				
Lever normal:					
Station:					
No: S1	X Stat: 0.000	Y Stat: 0.000	Z Stat: 0.000	hi: 1.580	
Lever standard:					
Mesure:					
No: 1	Hz: 222.755	V: 98.113	Dp: 45.508	Dh: 45.488	dZ: 2.929
X: -15.915	Y: -42.613	Z: 2.929	hr: 0.000	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 2	Hz: 227.659	V: 95.733	Dp: 42.194	Dh: 42.100	dZ: 4.406
X: -17.721	Y: -38.188	Z: 4.406	hr: 0.000	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 3	Hz: 230.309	V: 96.069	Dp: 37.026	Dh: 36.955	dZ: 3.865
X: -16.937	Y: -32.846	Z: 3.865	hr: 0.000	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 10	Hz: 1.644	V: 103.875	Dp: 54.780	Dh: 54.679	dZ: -3.052
X: 1.412	Y: 54.660	Z: -3.052	hr: 1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 11	Hz: 399.970	V: 103.475	Dp: 50.775	Dh: 50.699	dZ: -2.490
X: -0.024	Y: 50.699	Z: -2.490	hr: 1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 12	Hz: 398.049	V: 103.568	Dp: 45.018	Dh: 44.947	dZ: -2.242
X: -1.377	Y: 44.926	Z: -2.242	hr: 1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 13	Hz: 394.953	V: 104.211	Dp: 37.446	Dh: 37.364	dZ: -2.195
X: -2.959	Y: 37.247	Z: -2.195	hr: 1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 14	Hz: 395.015	V: 104.627	Dp: 30.278	Dh: 30.198	dZ: -1.918
X: -2.362	Y: 30.106	Z: -1.918	hr: 1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 15	Hz: 396.452	V: 105.297	Dp: 23.097	Dh: 23.017	dZ: -1.640
X: -1.282	Y: 22.982	Z: -1.640	hr: 1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 16	Hz: 398.911	V: 105.981	Dp: 18.216	Dh: 18.135	dZ: -1.429
X: -0.310	Y: 18.133	Z: -1.429	hr: 1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 17	Hz: 2.709	V: 104.916	Dp: 14.619	Dh: 14.576	dZ: -0.848
X: 0.620	Y: 14.562	Z: -0.848	hr: 1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 18	Hz: 1.256	V: 105.781	Dp: 10.219	Dh: 10.177	dZ: -0.647
X: 0.201	Y: 10.175	Z: -0.647	hr: 1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 19	Hz: 381.687	V: 112.494	Dp: 3.127	Dh: 3.067	dZ: -0.330
X: -0.870	Y: 2.941	Z: -0.330	hr: 1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 20	Hz: 231.539	V: 102.526	Dp: 4.647	Dh: 4.643	dZ: 0.096
X: -2.207	Y: -4.085	Z: 0.096	hr: 1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 21	Hz: 225.340	V: 100.861	Dp: 7.012	Dh: 7.012	dZ: 0.185
X: -2.718	Y: -6.463	Z: 0.185	hr: 1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 22	Hz: 221.839	V: 99.745	Dp: 10.877	Dh: 10.877	dZ: 0.324
X: -3.658	Y: -10.243	Z: 0.324	hr: 1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 23	Hz: 221.089	V: 98.581	Dp: 19.849	Dh: 19.844	dZ: 0.723

Les torrents de la vallée de la Clarée – Gilles GARITTE

X: -6.454	Y: -18.765	Z: 0.723	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 24	Hz:220.585	V:97.772	Dp: 25.941	Dh: 25.925	dZ: 1.188
X: -8.237	Y: -24.581	Z: 1.188	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 25	Hz:222.274	V:97.086	Dp: 28.653	Dh: 28.623	dZ: 1.591
X: -9.811	Y: -26.889	Z: 1.591	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 26	Hz:223.330	V:97.564	Dp: 36.081	Dh: 36.055	dZ: 1.660
X: -12.919	Y: -33.661	Z: 1.660	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 27	Hz:223.967	V:97.608	Dp: 39.480	Dh: 39.452	dZ: 1.763
X: -14.504	Y: -36.689	Z: 1.763	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 28	Hz:224.046	V:97.795	Dp: 45.480	Dh: 45.452	dZ: 1.855
X: -16.763	Y: -42.248	Z: 1.855	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 29	Hz:224.742	V:97.785	Dp: 49.211	Dh: 49.182	dZ: 1.992
X: -18.637	Y: -45.514	Z: 1.992	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 30	Hz:225.765	V:97.303	Dp: 56.413	Dh: 56.362	dZ: 2.669
X: -22.193	Y: -51.809	Z: 2.669	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 31	Hz:226.006	V:97.028	Dp: 63.079	Dh: 63.010	dZ: 3.224
X: -25.030	Y: -57.825	Z: 3.224	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 32	Hz:225.068	V:96.740	Dp: 69.730	Dh: 69.638	dZ: 3.849
X: -26.718	Y: -64.309	Z: 3.849	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 33	Hz:225.307	V:96.481	Dp: 79.278	Dh: 79.157	dZ: 4.661
X: -30.644	Y: -72.984	Z: 4.661	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 34	Hz:226.320	V:96.191	Dp: 88.074	Dh: 87.916	dZ: 5.547
X: -35.321	Y: -80.509	Z: 5.547	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 35	Hz:228.200	V:96.097	Dp: 95.222	Dh: 95.043	dZ: 6.115
X: -40.737	Y: -85.870	Z: 6.115	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 36	Hz:228.457	V:96.231	Dp: 102.928	Dh: 102.748	dZ: 6.371
X: -44.413	Y: -92.653	Z: 6.371	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 37	Hz:228.567	V:96.030	Dp: 103.818	Dh: 103.616	dZ: 6.750
X: -44.951	Y: -93.358	Z: 6.750	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 38	Hz:228.761	V:96.102	Dp: 107.504	Dh: 107.302	dZ: 6.858
X: -46.845	Y: -96.537	Z: 6.858	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 39	Hz:227.135	V:96.169	Dp: 111.000	Dh: 110.799	dZ: 6.956
X: -45.809	Y: -100.886	Z: 6.956	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 40	Hz:226.292	V:95.907	Dp: 115.703	Dh: 115.463	dZ: 7.714
X: -46.341	Y: -105.756	Z: 7.714	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 41	Hz:226.943	V:95.692	Dp: 118.946	Dh: 118.673	dZ: 8.323
X: -48.739	Y: -108.203	Z: 8.323	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 42	Hz:227.104	V:95.687	Dp: 122.513	Dh: 122.232	dZ: 8.575
X: -50.482	Y: -111.320	Z: 8.575	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 43	Hz:228.028	V:95.789	Dp: 125.460	Dh: 125.185	dZ: 8.575
X: -53.351	Y: -113.248	Z: 8.575	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 44	Hz:228.714	V:95.677	Dp: 128.160	Dh: 127.864	dZ: 8.978
X: -55.737	Y: -115.077	Z: 8.978	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
Station:					
No: S2	X Stat: 0.000	Y Stat: 0.000	Z Stat: 0.000	hi:1.550	
Mesure:					
No: 50	Hz:259.035	V:110.961	Dp: 122.108	Dh: 120.303	dZ:-20.669
X: -96.245	Y: -72.179	Z: -20.669	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR

Les torrents de la vallée de la Clarée – Gilles GARITTE

No: 51	Hz:258.816	V:111.092	Dp: 119.410	Dh: 117.602	dZ:-20.450
X: -93.840	Y: -70.882	Z: -20.450	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 52	Hz:259.553	V:111.299	Dp: 115.222	Dh: 113.412	dZ:-20.091
X: -91.282	Y: -67.305	Z: -20.091	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR
No: 53	Hz:259.880	V:111.290	Dp: 110.093	Dh: 108.367	dZ:-19.171
X: -87.550	Y: -63.862	Z: -19.171	hr:1.300	refl.: CIRCUL	EDM: AR

Tableau 15 : le traitement des données topométriques, exemple de données brutes.

profil en long du torrent du Granon, juillet 2002

	Dh	dZ	dZ absolue	Dh cumulée	dZ cumulée	observations
No: 10	54,679	-3,052	3,052	0	0	confluence
No: 11	50,699	-2,49	2,49	3,98	0,562	
No: 12	44,947	-2,242	2,242	9,732	0,81	
No: 13	37,364	-2,195	2,195	17,315	0,857	
No: 14	30,198	-1,918	1,918	24,481	1,134	
No: 15	23,017	-1,64	1,64	31,662	1,412	
No: 16	18,135	-1,429	1,429	36,544	1,623	
No: 17	14,576	-0,848	0,848	40,103	2,204	
No: 18	10,177	-0,647	0,647	44,502	2,405	PT 1
No: 19	3,067	-0,33	0,33	51,612	2,722	
No: 20	4,643	0,096	0,096	59,322	3,148	R*
No: 21	7,012	0,185	0,185	61,691	3,237	PT 2
No: 22	10,877	0,324	0,324	65,556	3,376	
No: 23	19,844	0,723	0,723	74,523	3,775	
No: 24	25,925	1,188	1,188	80,604	4,24	
No: 25	28,623	1,591	1,591	83,302	4,643	
No: 26	36,055	1,66	1,66	90,734	4,712	
No: 3	36,955	3,865	3,865	91,634	6,917	point de calage 3
No: 27	39,452	1,763	1,763	94,131	4,815	PT 3
No: 2	42,1	4,406	4,406	96,779	7,458	point de calage 2
No: 28	45,452	1,855	1,855	100,131	4,907	passerelle
No: 1	45,488	2,929	2,929	100,167	5,981	point de calage 1
No: 29	49,182	1,992	1,992	103,861	5,044	passerelle
No: 30	56,362	2,669	2,669	111,041	5,721	
No: 31	63,01	3,224	3,224	117,689	6,276	PT 4
No: 32	69,638	3,849	3,849	124,317	6,901	
No: 33	79,157	4,661	4,661	133,836	7,713	
No: 34	87,916	5,547	5,547	142,595	8,599	
No: 35	95,043	6,115	6,115	149,722	9,167	
No: 36	102,748	6,371	6,371	157,427	9,423	
No: 37	103,616	6,75	6,75	158,295	9,802	
No: 38	107,302	6,858	6,858	161,981	9,91	
No: 39	110,799	6,956	6,956	165,478	10,008	souche
No: 40	115,463	7,714	7,714	170,142	10,766	souche
No: 41	118,673	8,323	8,323	173,352	11,375	souche
No: 42	122,232	8,575	8,575	176,911	11,627	

No: 43	125,185	8,575	8,575	179,864	11,627	souche
No: 44	127,864	8,978	8,978	182,543	12,03	
No: 50	120,303	-20,669	20,669	182,543	12,03	
No: 51	117,602	-20,45	20,45	185,244	12,249	
No: 52	113,412	-20,091	20,091	189,434	12,608	
No: 53	108,367	-19,171	19,171	194,479	13,528	

Tableau 16 : le traitement des données topométriques, exemple de données traitées.

Les contraintes liées à l'utilisation de la topométrie dans les torrents

Si l'utilisation du tachéomètre dans les torrents permet d'obtenir une information fiable et renouvelable, certaines contraintes peuvent rendre son emploi délicat :

- Les levés de terrains nécessitent au moins deux personnes : un opérateur au tachéomètre et une personne qui déplace la mire. Le rôle de cette deuxième personne est capital puisque c'est elle qui choisit les points à mesurer qui détermineront *in fine* le document final.
- Il est indispensable de positionner le tachéomètre à l'horizontale sur son trépied. Cette manœuvre anodine dans les conditions normales d'utilisation de l'instrument peut parfois s'avérer malaisée dans un chenal torrentiel.
- L'utilisation du tachéomètre est limitée par des contraintes liées aux conditions météorologiques. L'appareil supporte mal l'humidité : la pluie et la neige peuvent fausser les mesures et le froid altère l'autonomie des batteries.
- Enfin, lors des levés topométriques dans certains torrents, on se trouve confronté à des difficultés liées à la progression sur un terrain difficile et instable, en particulier si on tient compte de l'encombrement du trépied ainsi que du poids et de la fragilité de l'instrument de mesure. Mais c'est aussi tout le « charme » de la recherche sur le terrain.

Annexe 2

Note méthodologique sur la mesure de la rétraction des bandes actives torrentielles

La mutation de la physionomie des torrents sur leur cône de déjection est un indice de l'évolution de la torrentialité depuis la péjoration climatique du Petit Âge Glaciaire. Pour quantifier la rétraction des bandes actives torrentielles nous avons utilisé les photographies aériennes qui permettent d'appréhender l'évolution des paysages de la vallée depuis 1939 ou 1945 selon les torrents.

Pour réduire les déformations inhérentes à la photographie nous avons tout d'abord redressé et géoréférencés les clichés à l'aide du logiciel ER Mapper®.

- Afin de redresser une photographie à partir d'un document géoréférencé, nous avons utilisé la fonction *Ortho and Geocoding Wizard*.
- Pour réduire au mieux les distorsions entre les points d'amer, nous avons choisi comme mode de rectification la triangulation.
- Nous avons ensuite pris comme document de référence une orthophotographie (IGN BD Ortho®, 2003).
- Puis nous avons défini au moins 15 points de contrôles ou amers (*Ground Control Point*) répartis sur le cône de déjection de part et d'autre du chenal torrentiel (fig. 133).

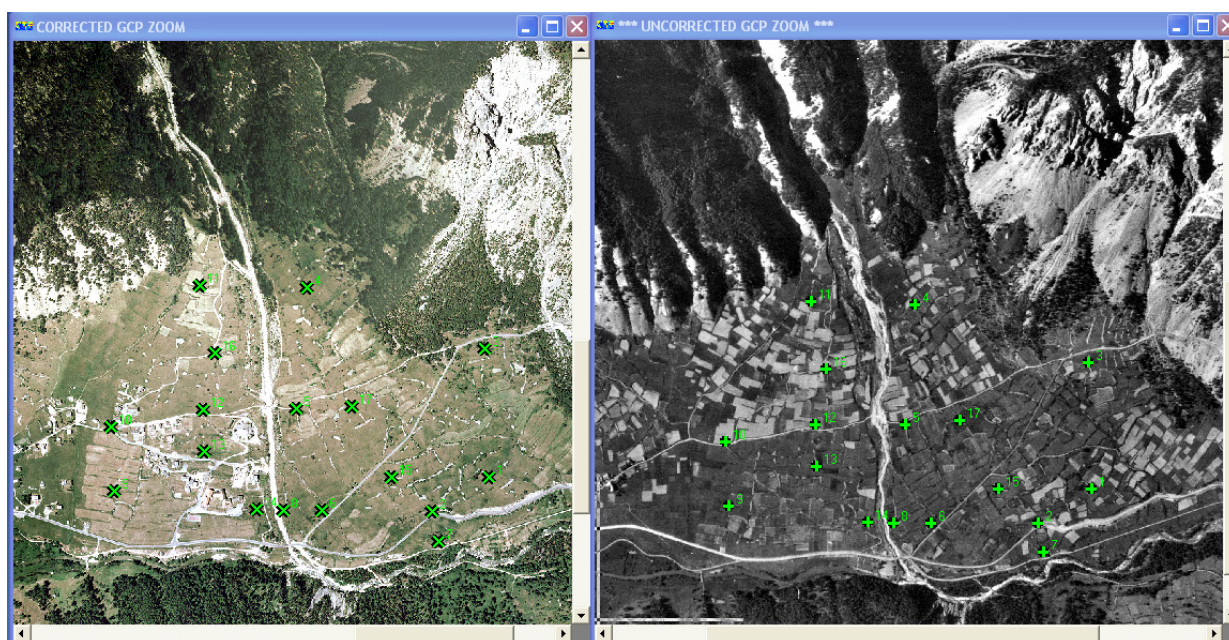


Figure 133 : le redressement des photographies aériennes sous ERMapper®

- Enfin le document final, redressé et géoréférencé, est enregistré au format GeoTiff.

Pour mesurer l'évolution de la largeur de la bande active nous avons utilisé le logiciel MapInfo® (MapInfo 7.5, 1985-2003 MapInfo Corporation). Sur chaque extrait de photographie aérienne nous avons effectué différentes mesures de la largeur de la bande active régulièrement réparties le long du chenal (transects tous les 50 m) (fig. 134).



Figure 134 : la mesure de la largeur de la bande active torrentielle sous MapInfo®

Pour réduire l'effet échelle et permettre la comparaison des résultats sur différents torrents, ces données ont été converties en indice en prenant comme référence la largeur moyenne de la bande active pour la photographie la plus ancienne. Le résultat a été représenté, à l'aide du logiciel Excel®, sous forme de boîtes à moustaches (type de graphique : boursier ; sous type de graphique : Ouverture-Max-Min-Clôture) sur lesquelles sont reportés l'écart interdécile (D10 et D90) et l'écart interquartile (Q25 et Q75) qui permettent d'apprécier la dispersion de la série statistique.

Annexe 3

Note méthodologique sur l'utilisation des données altimétriques de l'IGN

Plusieurs documents ont été produits à partir des données altimétriques de l'IGN (BD Alti®) : un modèle numérique de terrain de l'ensemble de la vallée, des cartes des pentes. L'élaboration de ces documents s'est faite en utilisant deux logiciels MapInfo® (MapInfo 7.5, 1985-2003 MapInfo Corporation) et Envi® (Envi 4.2 Research Systems Inc.), dont les différentes étapes sont récapitulées ci-dessous.

La première étape, effectuée sous le logiciel MapInfo®, consistait à extraire des données du réseau national des données sur l'eau (RNDE), les limites du bassin-versant de la Haute-Durance. Ensuite, les données de la BD Alti® ont été croisées avec les limites du bassin-versant pour ne conserver que les données nécessaires. Cette extraction de la BD Alti® est alors exportée au format texte.

A l'aide du logiciel Envi®, nous avons créé une image de la BD Alti®. Il s'agit d'un MNT réalisé à partir des données de la BD Alti®, par extrapolation linéaire avec une taille de cellule en sortie de 10 m. A partir de ce MNT en mode image, nous avons créé une carte en ombrage (*hillshade map*) avec un azimut de 315°N et un angle zénithal de 45° et une carte des pentes en degrés en noir et blanc (codage 8 bits, 0 = 0° et 255 = 90°).

Ces documents ont été exportés au format GeoTiff pour pouvoir être utilisés sous un logiciel de SIG ce qui permet, par exemple, de mesurer aisément des distances ou des surfaces.

Annexe 4

Proposition de gestion du risque torrentiel sur les cônes de déjection des torrents de la vallée de la Clarée

En tenant compte de l'ensemble des résultats obtenus dans la compréhension du phénomène torrentiel dans la vallée de la Clarée, il est possible de proposer différents moyens de gestion du risque torrentiel. Tout d'abord, la réponse à apporter doit être adaptée au cas par cas à chaque torrent en tenant compte de différents facteurs. Ainsi, selon le morphotype et les enjeux sous l'emprise du torrent, les mesures de mitigation du risque torrentiel seront distinctes. Par ailleurs, il convient aussi de tenir compte de l'incertitude concernant l'évolution de la dynamique torrentielle à moyen terme dans le contexte de réchauffement global. Les propositions doivent aussi tenir compte du fait que vallée de la Clarée est une vallée encore peu urbanisée. Bien sûr les propositions suivantes ne sont pas adaptées à des vallées très aménagées où la pression foncière exercée par l'immobilier lié au tourisme est très forte.

Propositions pour la gestion du risque torrentiel sur les cônes de déjection de morphotype incisé

Constat : ces organismes drainent le plus souvent de vastes bassins versants, et possèdent un chenal incisé dans le cône de déjection.

Enjeux : en dehors des axes de communication, les enjeux sont le plus souvent principalement situés sur une seule partie du cône de déjection.

But de l'intervention : il s'agit tout d'abord de rationaliser l'aménagement en favorisant la localisation des enjeux à une seule berge du torrent afin d'en faciliter la protection vis-à-vis des crues torrentielles. La proposition de gestion passe ici par la mise en place d'une digue sur une rive du torrent, selon la localisation des enjeux ; l'autre partie du cône de déjection qui subirait pleinement l'impact des crues torrentielles devant rester vierge de tout aménagement (fig. 135). L'efficacité de la digue pourrait être renforcée par la mise en place d'une bande de couverture végétale arborée destinée à piéger les matériaux qui pourraient franchir la digue. Dans le cas du torrent de Roubion la réalisation de ce type d'intervention s'élèverait à un coût compris entre 270 000 à 380 000 €⁷⁶. Ce montant est à comparer avec celui effectivement dépensé pour la mise en place du système de correction torrentielle actuellement présent dans le torrent à savoir près de 790 000 €.

⁷⁶ Cette estimation correspond à la mise en place d'une digue de gabion électrosoudée de 2 m de hauteur sur 2 m de largeur tout au long du chenal au niveau du cône de déjection. Ce projet comprend aussi la plantation de jeunes arbres avec une densité de 800 pieds par hectare sur une bande de 30 à 40 m de large.

Il subsiste néanmoins le problème posé par les ouvrages de franchissement qui peuvent parfois être à l'origine d'embâcles qui aboutissent à un débordement. Ainsi, lors de la crue du torrent des Acles du 15-16 octobre 2000 (Thénard et Garitte, 2005) ou celle du torrent de Roubion du 16 juillet 2006, ce sont les matériaux apportés par le torrent qui ont abouti au débordement du torrent et à la coupure de la RD 994g. Il convient donc d'assurer une surveillance régulière du tirant d'air des différents ponts présents sur ces cônes de déjection, pour pouvoir effectuer le cas échéant un curage du lit.

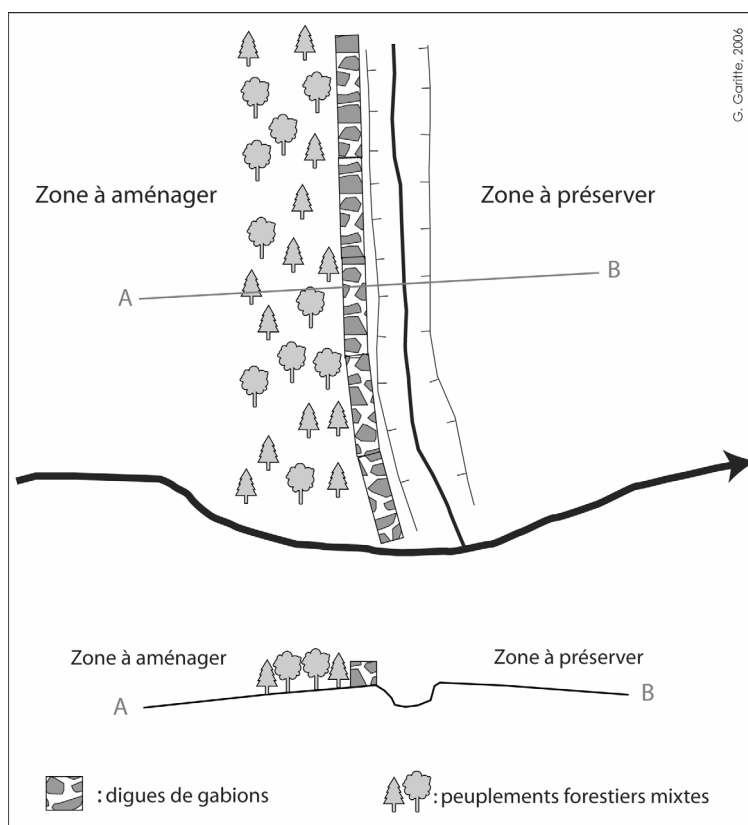


Figure 135 : illustration schématique de la proposition de gestion du risque torrentiel sur les cônes de déjection des torrents de Roubion, des Acles et de la Ruine

Propositions pour la gestion du risque torrentiel sur le cône de déjection des Ravins de la Pinatelle, des Sables, de l'Enrouye.

Constat : ces torrents drainent des bassins-versants élémentaires abrupts qui les rendent particulièrement sensibles aux précipitations intenses.

Enjeux : les enjeux sont le souvent limités sur ce type cône de déjection mis à part les axes de communication.

But de l'intervention : Eviter la chenalisation du torrent en procédant à des ouvertures dans les bourrelets latéraux qui circonscrivent les écoulements et ainsi favoriser l'épandage des matériaux dans la forêt qui couvre les cônes de déjection (fig. 136). Le choix de favoriser la dynamique naturelle des torrents, c'est-à-dire la sédimentation sur le cône de déjection, conduirait à accepter que certaines crues puissent déposer des matériaux (essentiellement boueux si le peignage est efficace) qui pourraient couper les axes de communication. Néanmoins, les services déconcentrés de l'Etat qui ont la charge des routes pourraient préférer, au contraire, une solution favorisant la chenalisation, et ce afin de mettre en place des ouvrages de franchissement du torrent. Pourtant, en plus des conséquences que peut avoir l'abaissement du niveau de base local suite à la construction d'un ouvrage de franchissement (Florsheim *et al.*, 2001), cette solution aurait un coût financier élevé alors que rien ne permet de garantir que l'axe d'écoulement du torrent restera inchangé pendant une longue période, rendant alors moins rentable la construction d'ouvrages de franchissement.

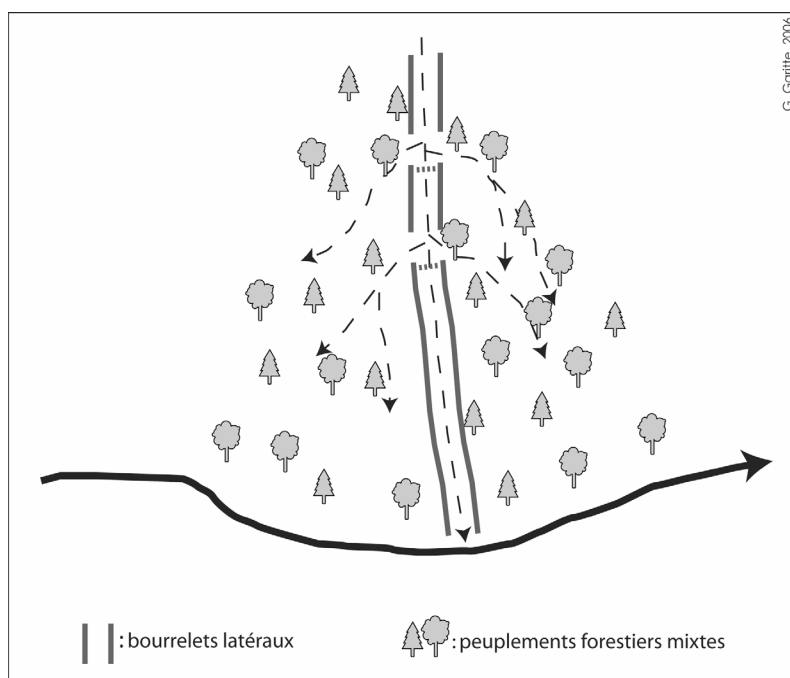


Figure 136 : illustration schématique de la gestion du risque torrentiel sur les Ravins de la Pinatelle, des Sables, de l'Enrouye

Propositions pour la gestion du risque torrentiel sur le cône de déjection du Ravin de Combal

Constat : cet organisme torrentiel draine un bassin versant relativement petit à l'échelle de la vallée et abrupt ($M_{bv} : 0,89$) qui, de plus, possède beaucoup de matériaux mobilisables disponibles dans la partie supérieure de son bassin versant.

Enjeux : les enjeux sont réduits sur le cône de déjection mais importants à la confluence avec la Clarée. Il convient d'éviter au maximum la survenue d'un embâcle de la Clarée compte tenu de la présence d'un camping en rive droite.

But de l'intervention : Le but est ici d'éviter une obstruction de la Clarée par le dépôt de matériaux torrentiels, en favorisant au mieux la sédimentation sur le cône de déjection. Cette solution consiste à favoriser le ralentissement dynamique des crues torrentielles en maintenant un couvert forestier dense sur le cône de déjection (fig. 137). Cela implique de mettre en place une surveillance de l'état phytosanitaire du peuplement forestier sur le cône de déjection compte tenu de l'évolution climatique qui pourrait être néfaste aux conifères. Le cas échéant, il convient de favoriser le maintien d'un couvert assez dense en introduisant des essences adaptées (chêne pubescent ?). L'efficacité de la forêt, indéniable dans le cas des crues HF-BM, doit aussi être renforcée par la mise en place d'obstacles en gabions pour contenir au mieux les écoulements lors des crues BF-HM.

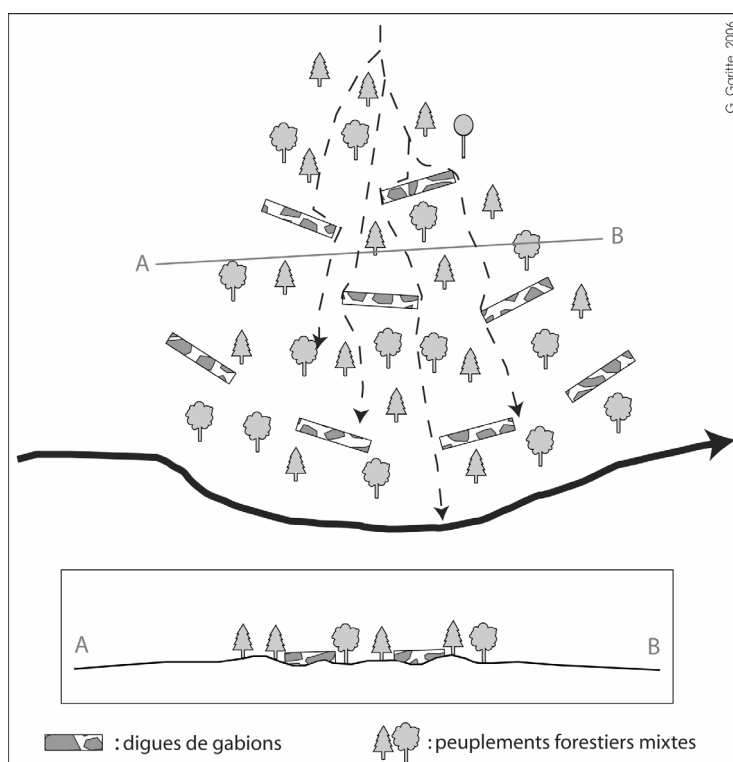


Figure 137 : illustration schématique de la proposition de gestion du risque torrentiel sur le Ravin de Combal

Table des figures

Figure 1 : évolution du nombre d'articles scientifiques portant sur les risques.....	16
Figure 2 : recensement des différents types d'aléas dans la vallée de la Clarée	17
Figure 3 : les éléments constitutifs des systèmes torrentiels	20
Figure 4 : schéma conceptuel de la place du système torrentiel dans son environnement....	21
Figure 5 : l'environnement des organismes torrentiels	22
Figure 6 : la définition du risque torrentiel	23
Figure 7 : localisation des publications récentes traitant de l'évolution de la bande active des cours d'eau.....	29
Figure 8 : localisation des torrents de la vallée de la Clarée.....	38
Figure 9 : modèle numérique de la vallée de la Clarée	39
Figure 10 : aperçu géologique du secteur étudié	41
Figure 11 : carte des pentes de la vallée de la Clarée	43
Figure 12 : aperçu du paysage de la vallée de la Clarée.....	44
Figure 13 : aperçu géomorphologique de la vallée de la Clarée	46
Figure 14 : nombre mensuel de jours de gel à Briançon.....	49
Figure 15 : aperçu du climat de la vallée de la Clarée	50
Figure 16 : l'utilisation des différentes données dans l'évaluation du risque torrentiel dans la vallée de la Clarée	56
Figure 17 : aperçu chronologique de l'organisation de la thèse.....	58
Figure 18 : aperçu géomorphologique simplifié du torrent des Acles.....	61
Figure 19 : aperçu géomorphologique simplifié du Ravin de l'Enrouye.....	66
Figure 20 : relations entre P_{cd} et M_{bv} pour différents torrents des Alpes.....	70
Figure 21 : relations entre S_{bv} et S_{cd} pour les torrents de la Clarée.....	71
Figure 22 : relations entre L_{val} et S_{cd} pour les torrents de la Clarée	72
Figure 23 : exemples de morphotype de cône de déjection incisé	77
Figure 24 : exemples de morphotype de cône de déjection chenalisé.....	78
Figure 25 : exemples de morphotype de cône de déjection divagant.....	80
Figure 26 : la divagation du chenal sur le cône de déjection du torrent des Ruines.....	81
Figure 27 : localisation des différents morphotypes de cône de déjection en basse vallée de la Clarée.....	83
Figure 28 : coefficient de Melton selon le morphotype des cônes de déjection de la vallée de la Clarée	84

Figure 29 : représentations schématiques des deux grands types de systèmes torrentiels présents dans la vallée de la Clarée	86
Figure 30 : les relations entre les différents éléments du système torrentiel.....	91
Figure 31 : fonctionnement post-glaciaire des bassins-versants torrentiels alpins	96
Figure 32 : évolution de l'axe des coulées sur le cône de déjection du Ravin des Sables	100
Figure 33 : le torrent de Malefosse, aperçu diachronique du cône de déjection	101
Figure 34 : aperçu diachronique du cône de déjection du torrent des Gamattes	102
Figure 35 : le torrent de Roubion, aperçu diachronique de l'évolution du cône de déjection	103
Figure 36 : points de contrôle mesurés pour vérifier la fiabilité du recalage géométrique	105
Figure 37: un exemple de boîte à moustaches	106
Figure 38 : exemple de boîtes à moustaches	107
Figure 39 : évolution de la bande active du torrent des Ruines	109
Figure 40 : mesures de l'ajustement morphologique du torrent des Acles	110
Figure 41 : l'évolution de la bande active du torrent des Acles.....	111
Figure 42 : évolution de la bande active du torrent de Roubion	112
Figure 43 : la rétraction de la bande active du torrent de Roubion	113
Figure 44 : vues aériennes des bandes actives torrentielles en 1939-1945.....	115
Figure 45 : La perception du paysage au 18 ^{ème} siècle à travers l'étude de la carte de Cassini	119
Figure 46 : localisation des entités archéologiques recensées dans la vallée de la Clarée... ..	121
Figure 47 : évolution de la population dans la vallée de la Clarée	122
Figure 48 : évolution du nombre d'ovins dans les alpages en vallée de la Clarée.....	124
Figure 49 : évolution de la surface des alpages en vallée de la Clarée	125
Figure 50 : profil en travers de la Clarée en aval de la confluence avec le torrent des Acles	130
Figure 51 : évolution du taux de boisement dans le Briançonnais	134
Figure 52 : l'évolution diachronique du cône de déjection du Ravin des Fournéous	136
Figure 53 : évolution diachronique du cône de déjection du Ravin de Combal.....	139
Figure 54 : évolution du nombre de coulées de débris de moins de 400m entre 1952 et 2000 selon l'altitude d'initiation – massif des Ecrins	141
Figure 55 : évolution de la largeur de la bande active de 3 torrents de la vallée de la Clarée	144
Figure 56 : courbes hypsométriques des torrents de Roubion et des Ruines	146
Figure 57 : localisation des principales sources sédimentaires dans 3 torrents de la vallée de la Clarée	148
Figure 58 : modèle conceptuel de l'ajustement morphologique des torrents de la vallée de la Clarée	150

Figure 59 : pourcentage cumulé des crues torrentielles recensées dans la vallée de la Clarée	160
Figure 60 : localisation des crues torrentielles recensées	161
Figure 61 : répartition mensuelle des crues torrentielles recensées	163
Figure 62 : répartition mensuelle des jours de crue torrentielle recensée	163
Figure 63 : répartition mensuelle des jours d'orage, des jours de crue torrentielle recensée et des jours avec des précipitations supérieures à 30 mm	164
Figure 64 : seuils de déclenchement des laves torrentielles selon les caractéristiques de durée et d'intensité des précipitations	166
Figure 65 : précipitations journalières relevées aux stations de Briançon et Névache lors des jours de crues torrentielles recensées dans la vallée de la Clarée	167
Figure 66 : les différents paramètres des précipitations dans le déclenchement des mouvements de terrain	168
Figure 67 : comparaison entre la répartition annuelle des jours d'orage et des crues torrentielles	169
Figure 68 : représentation schématique des relations entre les prédispositions d'un système torrentiel et les facteurs dégradants dans le déclenchement des laves torrentielles	170
Figure 69 : application de différentes méthodes empiriques d'estimations du volume des laves torrentielles à quelques torrents de la vallée de la Clarée	178
Figure 70 : l'estimation du volume de matériaux mobilisables : confrontation des méthodes empiriques et géomorphologique	179
Figure 71 : classification des différents types de mouvements de terrain	182
Figure 72 : la topométrie dans le torrent des Ruines	186
Figure 73 : torrent des Ruines, profil en long et photographies du lit	187
Figure 74 : torrent de Malefosse, les conséquences morphogéniques de la crue du 18 juin 2002	189
Figure 75 : carte géomorphologie de la confluence supérieure du torrent de Malefosse	191
Figure 76 : cartographie détaillée de deux secteurs du Ravin des Sables	194
Figure 77 : le Ravin de l'Enrouye ; conséquences de la crue du 18 juin 2002	197
Figure 78 : Ravin de l'Enrouye, évolution des profils longitudinaux et transversaux entre mai 2002 et juillet 2005	198
Figure 79 : évolution ponctuelle du lit du Ravin de l'Enrouye (2002-2005)	199
Figure 80 : évolution verticale du profil en long du Ravin de Combal	203
Figure 81 : Ravin de Combal, conséquences morphogènes de la crue du 19 août 2002	205
Figure 82 : impact de la crue de juin 2003 sur le lit du Ravin de Combal	207
Figure 83 : extension et caractéristiques granulométriques de la crue du 24 juillet 2005 sur le cône de déjection du ravin de Combal	210
Figure 84 : évolution du lit torrentiel sur le cône de déjection du torrent de Roubion (2001-2005)	213
Figure 85 : localisation des crues torrentielles du 16 juillet 2006	214

Figure 86 : Ravin de l'Enrouye : MNT de la zone de dépôt de la crue du 16 juillet 2006.	216
Figure 87 : les effets de la crue du 16 juillet 2006 sur le lit du torrent de Roubion	219
Figure 88 : évolution du profil longitudinal du torrent de Roubion dans sa partie aval à la suite de la crue du 17 juillet 2006.....	220
Figure 89 : évolution du lit torrentiel du torrent de la Ruine (2004-2006)	223
Figure 90 : le risque d'obstruction de la Clarée par le Ravin de Combal	229
Figure 91 : répartition des crues torrentielles selon le coefficient de Melton des bassins-versants	231
Figure 92 : localisation de l'habitat dans la vallée de la Clarée	236
Figure 93 : part des résidences secondaires dans l'habitat des vallées de la Clarée et de la Guisane (station de Serre-Chevalier)	237
Figure 94 : structure de l'accueil touristique dans la vallée de la Clarée	238
Figure 95 : date d'achèvement des résidences principales et secondaires dans la vallée de la Clarée	239
Figure 96 : date d'achèvement des résidences principales et secondaires dans la vallée de la Guisane	239
Figure 97: le trafic routier sur les différents axes de communications de la vallée de la Clarée	241
Figure 98: localisation des dégâts pour l'ensemble des crues torrentielles recensées	241
Figure 99 : débits moyens journaliers en 2004 pour la RD 994g et la RN 94	242
Figure 100 : les limites du recensement des crues torrentielles.....	243
Figure 101 : part de la rivière Clarée et des torrents dans le recensement des crues	245
Figure 102 : les principaux ouvrages de correction torrentielle dans la vallée de la Clarée ..	246
Figure 103. : torrent de la Ruine : évolution de l'aménagement du cône de déjection et du coût des travaux de correction torrentielle.....	248
Figure 104. : le projet de correction torrentielle sur le cône de déjection du torrent de la Ruine	249
Figure 105 : Torrent de Roubion : évolution de l'aménagement du cône de déjection et du coût des travaux de correction torrentielle.....	252
Figure 106 : l'aménagement de la confluence Ravin des Sables - Clarée suite aux crues de 1995 et 1999	255
Figure 107 : l'évolution du chenal du Ravin de l'Enrouye suite au curage d'une partie du lit	256
Figure 108 : comparaison entre ajustement morphologique des torrents et recensement des crues torrentielles	259
Figure 109 : conséquences cyndiniques de l'évolution du torrent des Acles.....	261
Figure 110 : évolution diachronique de l'Isclé du Rosier	264
Figure 111 : diagramme conceptuel des interactions torrents-société	268
Figure 112 : représentation schématique de l'évolution des aménagements en réponse à la rétraction des bandes actives	269

Figure 113 : les conséquences cyndiniques du risque d'embâcle de la rivière principale et les différents enjeux soumis à l'aléa torrentiel en Clarée.....	274
Figure 114 : diagnostic de l'emprise de torrents de la vallée de la Clarée sur leur cône de déjection	278
Figure 115 : le caractère exceptionnel de la crue du torrent de Granon du 22 juillet 1988 ...	282
Figure 116 : Torrent de Granon, conséquences morphogènes de la crue du 22 juillet 1988..	282
Figure 117 : évolution de la température globale (surfaces continentales) par rapport à la moyenne 1960-1990	286
Figure 118 : modélisation de l'évolution future de la température de l'atmosphère à l'échelle planétaire	287
Figure 119 : évolution des précipitations dans les Alpes, moyennes sur 30 ans des précipitations journalières.....	288
Figure 120 : évolution probable des précipitations estivales dans les Alpes, comparaison entre les précipitations estivales moyennes de 1971-2000 et 2071-2100.....	289
Figure 121 : évolution probable des températures estivales dans les Alpes, comparaison entre les températures estivales moyennes de 1971-2000 et 2071-2100.....	289
Figure 122 : évolution de la température mensuelle à Briançon	290
Figure 123 : évolution des précipitations mensuelles à Briançon.....	291
Figure 124 : évolution du nombre annuel de jours de pluie supérieure à 30 mm 1974-2003 ..	292
Figure 125 : évolution du nombre annuel d'orages à Briançon 1970-2004.....	293
Figure 126 : les impacts probables du changement climatique sur l'activité torrentielle : les limites de l'approche prospective.	305
Figure 127 : représentation graphique de la définition du développement durable	307
Figure 128 : exemples de propositions de gestion du risque torrentiel.....	313
Figure 129 : synthèse graphique schématique du fonctionnement du système torrent-société dans la vallée de la Clarée	321
Figure 130 : la méthode de levé du profil en long (1).....	359
Figure 131 : la méthode de levé du profil en long (2).....	360
Figure 132 : la méthode de levé du profil en travers	361
Figure 133 : le redressement des photographies aériennes sous ERMapper®	367
Figure 134 : la mesure de la largeur de la bande active torrentielle sous MapInfo®	368
Figure 135 : illustration schématique de la proposition de gestion du risque torrentiel sur les cônes de déjection des torrents de Roubion, des Acles et de la Ruine.....	372
Figure 136 : illustration schématique de la gestion du risque torrentiel sur les Ravins de la Pinatelle, des Sables, de l'Enrouye.....	373
Figure 137 : illustration schématique de la proposition de gestion du risque torrentiel sur le Ravin de Combal.....	374

Table des photographies

Photo. 1 : exemples de l'impact morphologique du contexte géologique.....	42
Photo. 2 : la basse vallée de la Clarée	45
Photo. 3 : aperçu du paysage de la basse vallée de la Clarée.....	52
Photo. 4 : aperçu du paysage de la haute vallée de la Clarée	52
Photo 5 : Torrent des Acles : l'empreinte des formes glaciaires et périglaciaires dans le vallon de l'Opon.....	63
Photo. 6 : Le torrent des Acles : un torrent en partie déconnecté de ses sources sédimentaires	64
Photo. 7 : torrent des Acles : la gorge dans la partie inférieure du chenal	65
Photo. 8 : le Ravin de l'Enrouye	65
Photo. 9 : le chenal du Ravin de l'Enrouye.....	66
Photo 10 : l'utilisation du tachéomètre.....	75
Photo. 11 : digue de gabions déstabilisée dans le Torrent de la Ruine	79
Photo. 12 : exemple de l'efficacité du peignage de matériaux torrentiels par la forêt.....	82
Photo. 13 : aperçu du lit des systèmes torrentiels élémentaires de la vallée de la Clarée	87
Photo. 14 : aperçu du lit des systèmes torrentiels composites de la vallée de la Clarée	89
Photo. 15 : Torrent de Malefosse, le premier barrage en maçonnerie construit en 1907.....	128
Photo. 16 : confluence de la Clarée et de la Durance.....	131
Photo. 17 : Aperçu de l'évolution spontanée de la couverture végétale sur le versant des Fournéous.....	135
Photo. 18 : Le Ravin de Fournéous en 2006	137
Photo. 19 : Aperçu diachronique du torrent du Creuzet	138
Photo. 20 : le bassin-versant du torrent de Roubion.....	147
Photo. 21 : exemple de couverture morainique dans le bassin-versant du torrent de Roubion	156
Photo. 22 : exemple de versant déstabilisé dans le bassin-versant du torrent des Gamattes	156
Photo. 23 : exemple d'éboulis susceptibles d'alimenter un torrent, bassin-versant du Ravin de Combal.....	157
Photo. 24 : le torrent de Malefosse	188
Photo. 25 : Ravin des Sables : crue du 19 septembre 1999.....	193
Photo. 26 : aperçu de l'évolution de la morphologie du lit du ravin de l'Enrouye entre mai 2002 et juillet 2006	200
Photo. 27 : le Ravin de Combal.....	202

Photo. 28 : conséquences de la crue de 19 août 2002 dans le chenal du Ravin de Combal.....	206
Photo. 29 : évolution de la partie amont du lit du Ravin de Combal	211
Photo. 30 : Torrent de Roubion : conséquences de la crue du 16/07/06	218
Photo. 31 : Torrent de la Ruine : la crue du 16/07/06	222
Photo. 32 : le sous-dimensionnement du franchissement de la RD 994 g	224
Photo. 33 : l'obstruction partielle de la Clarée par la crue du Ravin des Sables du 24 juillet 1995	226
Photo. 34 : conséquences de la crue du Ravin des Sables du 19 septembre 1999	227
Photo. 35 : torrent de la Ruine, barrages construits entre 1964 et 1995	247
Photo. 36 : le curage du lit du torrent de Malefosse	253
Photo. 37 : la digue de protection érigée en 2004 en rive droite du torrent des Acles	262
Photo. 38 : évolution comparée de l'utilisation du sol sur les cônes de déjection des torrents du Creuzet et de Roubion	267

Table des tableaux

Tableau 1 : les périmètres RTM dans la vallée de la Clarée	40
Tableau 2 : l'occupation du sol dans la vallée de la Clarée	51
Tableau 3: caractéristiques morphométriques des torrents de la vallée de la Clarée.....	69
Tableau 4 : coefficients de corrélation de Pearson entre les paramètres morphométriques des torrents de la Clarée.....	72
Tableau 5 : évaluation de la fiabilité du recalage géométrique	105
Tableau 6 : quelques caractéristiques des bassins-versants des torrents des Acles, du Roubion et des Ruines.....	145
Tableau 7 : principales sources sédimentaires des torrents de la basse vallée de la Clarée .	155
Tableau 8 : l'évaluation des taux unitaires d'apport sédimentaire des lits torrentiels.....	175
Tableau 9 : estimation du volume des crues torrentielles récentes dans la vallée de la Clarée	180
Tableau 10 : terminologie anglo-saxonne des écoulements torrentiels	184
Tableau 11 : inventaire des crues pour le Ravin de l'Enrouye	195
Tableau 12 : la population des communes de Névache et Val-des-Prés.....	244
Tableau 13 : valeurs de la rétraction de la bande active de la Clarée dans le secteur l'Isclé du Rosier	265
Tableau 14 : les stratégies de défense contre les écoulements torrentiels	309
Tableau 15 : le traitement des données topométriques, exemple de données brutes.....	364
Tableau 16 : le traitement des données topométriques, exemple de données traitées.	365

Table des encadrés méthodologiques

<i>encadré 1 : la méthode de l'analyse morphométrique des cônes de déjection.....</i>	<i>68</i>
<i>encadré 2 : l'utilisation de la topométrie dans l'étude des torrents</i>	<i>73</i>
<i>encadré 3 : l'analyse diachronique de documents iconographiques</i>	<i>98</i>
<i>encadré 4 : la mesure de l'évolution des bandes actives torrentielles</i>	<i>104</i>
<i>encadré 5 : la méthode de lecture des boîtes à moustaches</i>	<i>106</i>
<i>encadré 6 : le recensement historique des crues torrentielles</i>	<i>158</i>
<i>encadré 7 : l'estimation du volume des crues torrentielles</i>	<i>172</i>
<i>encadré 8 : le problème de la terminologie</i>	<i>183</i>
<i>encadré 9 : le comptage granulométrique de la charge grossière de surface</i>	<i>190</i>

Table des abréviations

- A.D.H.A. : Archives Départementales des Hautes-Alpes
- C.E.M.A.G.R.E.F. : CEntre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
- C.E.M.B.R.E.U. : Centre Européen Médical Bioclimatique de Recherches et d'Enseignement Universitaire
- D.D.A.F. : Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt
- D.D.E. : Direction Départementale de l'Equipement
- G.I.E.C. : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
- I.F.N. : Inventaire Forestier National
- I.N.S.E.E. : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
- I.P.C.C. : *Intergovernmental Panel on Climate Change*
- O.N.F. : Office National des Forêts
- P.A.G. : Petit Age Glaciaire
- R.T.M. : Restauration des Terrains de Montagne
- U.N.D.P. : United Nations Development Programme
-
- A_{con} (m): altitude de la confluence du torrent et de rivière principale
- A_{max} (m): altitude maximale du bassin versant
- A_{min} (m): altitude minimale du bassin versant, c'est-à-dire l'apex du cône de déjection
- I.G.M. : Indice Géomorphologique de R. Marie (C.E.M.A.G.R.E.F., 1984)
- L_{cd} (km) : longueur radiale du cône
- L_t : longueur du torrent (m)
- L_{val} (km) : largeur de la vallée
- M_{bv} : coefficient de rugosité de Melton (dénivelée spécifique)
- P_{cd} (°) : pente moyenne du cône de déjection
- P_t (%) : pente moyenne du torrent
- S_{bv} (km²) : surface planimétrique du bassin versant, c'est-à-dire à l'amont de l'apex du cône de déjection,
- S_{cd} (km²) : surface planimétrique du cône de déjection

Résumés

Résumé

La vallée de la Clarée se situe dans le Briançonnais (Hautes-Alpes, France). Son contexte climatique (climat de montagne à tendance méditerranéenne), et géomorphologique (présence d'éboulis, d'une couverture morainique abondante ainsi que de roches sédimentaires sensibles à l'érosion) conjugué à un contexte topographique marqué par la grande énergie du relief sont autant d'éléments qui en font un secteur favorable à l'activité torrentielle.

Cette étude fondée sur différentes approches *in situ* (topométrie, analyse géomorphologique) et diachroniques des cônes de déjection et des lits torrentiels, a permis d'effectuer un diagnostic du comportement actuel des torrents de la basse vallée de la Clarée mais aussi d'en étudier l'évolution depuis la fin du 19^{ème} siècle. En effet, comme ailleurs dans les Alpes, les torrents de la vallée de la Clarée ont connu depuis 150 ans une mutation de leur physionomie marquée par un ajustement morphologique suite au tarissement sédimentaire causé par les modifications environnementales post-PAG. Nos travaux ont permis de souligner le caractère essentiellement spontané de l'ajustement morphologique des torrents dans le secteur étudié. Or, si du point de vue socio-économique, la vallée de la Clarée est longtemps restée en marge de l'essor économique qu'ont connu les stations de sport d'hiver voisines, les communes de la vallée connaissent depuis maintenant une trentaine d'année, une lente reconversion socio-économique marquée par l'émergence du tourisme. Cela a conduit à une évolution des modes de gestion du risque torrentiel qui privilégie désormais la mise en place de vastes systèmes de correction torrentielle sur les cônes de déjection. L'apparent assagissement des torrents, conjugué à l'augmentation de la pression foncière, a favorisé l'aménagement progressif des cônes de déjection torrentiels. Dans le contexte actuel de réchauffement global, les modifications du comportement dynamique des torrents pourraient alors avoir des conséquences notables en terme de risque torrentiel.

Mots clefs : systèmes torrentiels, interactions Nature-Société, gestion du risque torrentiel, rétraction des bandes actives, réchauffement climatique, Alpes.

Abstract

The valley of the Clarée river is located in the Briançonnais (Hautes-Alpes, France). Its climatic conditions (mountain climate with Mediterranean tendency), geomorphological context (presence of scree-covered slope, of an abundant morainic cover as well as sedimentary rocks sensitive to erosion like Triassic limestones and dolomites) combined with a topographic context characterised by the great energy of the relief are many elements which make it a sector favourable to debris flow activity. This study, based on various *in situ* and diachronic approaches of the alluvial fans and the torrential channels, made it possible to carry out a diagnosis of the current behaviour of the torrents of the low valley but also to study their evolution since the end of the 19th century. In fact, like elsewhere in the Alps, the torrents of the valley of Clarée have known for 150 years a change of their aspect marked by a contraction of their active channel on their alluvial fan. From a socio-economic point of view, the valley of the Clarée river remained a long time in margin of the economic progress which the neighbour winter sports resorts have known. However, for now about thirty year, the villages of the valley of Clarée have known a slow socio-economic change characterised by the emergence of tourism. The apparent steadying down of the torrential activity, combined with the increase in the land pressure, have favoured the progressive grading of the alluvial fans. However, in the context of the announced Global Warming, that could have noteworthy consequences in the debris flow risk management.

Keywords: debris flow system, nature-society interactions, debris flow risk management, active channel narrowing, global warming, Alps