HAL
open science

Morphologie et dynamique des laves torrentielles : Applications aux torrents des Terres Noires du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud)

Alexandre Remaître

To cite this version:

Alexandre Remaître. Morphologie et dynamique des laves torrentielles : Applications aux torrents des Terres Noires du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud). Géomorphologie. Université de Caen, 2006. Français. NNT : . tel-00119737v2

HAL Id: tel-00119737

https://theses.hal.science/tel-00119737v2

Submitted on 16 Feb 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE de CAEN/BASSE-NORMANDIE

U.F.R. de GEOGRAPHIE

ECOLE DOCTORALE 'Littératures, Cultures et Sciences Sociales'

Laboratoire GEOPHEN (LETG UMR 6554)
GEOgraphie PHysique et ENvironnement

T H E S E

présentée par

Mr Alexandre Remaître

et soutenue

le 7 décembre 2006

en vue de l'obtention du

DOCTORAT de l'UNIVERSITE de CAEN
Spécialité : Géographie physique, humaine, économique et régionale

Arrêté du 07 août 2006

Morphologie et dynamique des laves torrentielles : Applications aux torrents des Terres Noires du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud)

MEMBRES du JURY

Mme	**Monique Fort**	**Professeur**	**Université Paris 7, Denis Diderot *(rapporteur)***
Mr	**Théo van Asch**	**Professeur**	**University of Utrecht, The Netherlands *(rapporteur)***
Mr	**Daniel Delahaye**	**Professeur**	**Université de Caen Basse-Normandie**
Mr	**Jean-Philippe Malet**	**CR1 CNRS**	**Université de Caen Basse-Normandie**
Mr	**Franck Lavigne**	**Maître de Conférences**	**Université Paris 1 Panthéon Sorbonne**
Mr	**Olivier Maquaire**	**Professeur**	**Université de Caen Basse-Normandie *(Directeur de thèse)***

SOMMAIRE

Remerciements.....5

Résumé / Abstract.....9

Introduction générale.....11

Avant-propos.....19

1ère Partie :
ACTIVITE TORRENTIELLE : DU BASSIN DE 'RISQUE' AU BASSIN VERSANT.....**25**

Chapitre 1 : Les laves torrentielles : morphologie, cinématique et modèles.....27
Chapitre 2 : Morphologie, climat et activité torrentielle du bassin de Barcelonnette.....65
Chapitre 3 : Sites d'études et événements torrentiels survenus entre 1996 et 2004.....113

2ème Partie :
EVENEMENTS TORRENTIELS A L'ECHELLE DU CHENAL.....**141**

Chapitre 4 : Evolution morpho-dynamique du chenal torrentiel de Faucon de 1998 à 2004.....143
Chapitre 5 : Caractérisation physique, hydrodynamique et rhéologique des laves torrentielles et des formations superficielles sources.....205
Chapitre 6 : Analyse de la dynamique torrentielle du torrent de Faucon.....247

3ème Partie :
CINEMATIQUE DES LAVES TORRENTIELLES : APPORT DES SIMULATIONS NUMERIQUES.....**283**

Chapitre 7 : Modélisation des écoulements de laves torrentielles : stratégie et codes.....285
Chapitre 8 : Simulation numérique : scénarios et chaîne de modélisation sur le torrent de Faucon.....305

Conclusion générale.....**331**

Références bibliographiques.....**339**

Table des figures.....*359*
Table des tableaux.....*367*
Liste des symboles.....*371*

Annexes.....**373**

Table des matières.....**483**

Remerciements

A mes parents

Et à ma grand-mère Marthe

Ce mémoire est l'aboutissement d'une recherche, multidisciplinaire et diversifiée, réalisée au sein du *CEntre de Recherches et d'Etudes Eco-Géographiques (CEREG)*, puis de *l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS)* et enfin terminée au laboratoire de *GEOgraphie PHysique et ENvironnement (GEOPHEN) de Caen*. Qu'il me soit permis d'exprimer ici toute ma gratitude et ma reconnaissance envers toutes les personnes qui ont apporté soutien et conseils tout au long de ce travail.

Je tiens tout d'abord à remercier *Olivier Maquaire*, Professeur à l'Université de Caen Basse-Normandie, pour avoir dirigé ce travail. Grâce à ses critiques et à ses conseils, j'ai pu acquérir progressivement la rigueur indispensable pour mener une approche scientifique en géomorphologie dynamique où la quantification des phénomènes prend une place importante. Son souci constant de favoriser les contacts scientifiques les plus pertinents, d'optimiser les conditions de recherches et de m'impliquer dans la rédaction des appels d'offres nationaux ont sans aucun doute permis d'éveiller une vocation scientifique. Je le remercie de la confiance accordée, notamment pour avoir favorisé mon recrutement deux années de suite comme Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherches à l'Université Louis Pasteur. Je salue également son soutien et son implication envers mon travail malgré l'éloignement géographique et le peu de temps que lui laisse ses activités de recherches et sa charge d'enseignement. Je porte en haute estime sa compétence et la position qu'il défend sur le rôle de la géomorphologie dynamique dans le domaine des Sciences de la Terre.

Je remercie *Monique Fort*, Professeur à l'Université de Paris VII, responsable de l'équipe DYNMIRIS, *Daniel Delahaye*, Professeur à l'Université de Caen Basse-Normandie et directeur du laboratoire GEOPHEN, *Théo van Asch*, Professeur à l'Université d'Utrecht, *Franck Lavigne*, Maître de Conférences à l'Université de Paris I, et *Jean-Philippe Malet*, CR1 CNRS au laboratoire GEOPHEN, d'avoir accepté d'être membre du jury de ce doctorat. Tous ont souscrit sans hésiter à cette tâche supplémentaire, malgré leur emploi du temps surchargé.

Cette thèse a été réalisée grâce à l'obtention d'une allocation de recherche MENRT, puis à un poste d'ATER. Nous avons, par ailleurs, bénéficié des financements des programmes nationaux *MOTE* (ACI-CatNat, 2000-2001) et *ECLAT* (PNRN, 2001-2002), et du programme européen *ALARM* (2001-2004).

Je tiens à remercier particulièrement *Jean-Philippe 'Statler' Malet*, pour son amitié de tous les instants et pour son aide précieuse, notamment dans la caractérisation rhéologique des matériaux et dans l'utilisation des modèles de déclenchement, de propagation et de dépôt. Je souhaite à quiconque de pouvoir travailler un jour avec quelqu'un comme *Jean-Philippe*, son abnégation, sa rigueur, et ses compétences sont autant d'atouts pour mener à bien une recherche de ce type.

Par ailleurs, cette thèse n'aurait pu aboutir sans la collaboration de nombreuses personnes qui ont apporté une aide indispensable, et à qui j'exprime toute ma reconnaissance et ma gratitude :

- à *Maurice Meunier*, du Cemagref de Grenoble, pour m'avoir fait profiter de ses connaissances approfondies des aspects méthodologiques, théoriques et numériques de l'analyse des épisodes de laves torrentielles ;

- à *Christophe Ancey*, de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, pour les nombreux échanges et conseils apportés en rhéologie des fluides naturels et pour le prêt d'un rhéomètre ;

- à *Dominique Laigle*, du Cemagref de Grenoble, pour sa disponibilité et son aide pour les simulations numériques ;

- à *Didier Richard*, du Cemagref de Grenoble, pour les discussions au cours de nos rencontres, notamment lors de l'Université d'Eté sur les Risques Torrentiels à Briançon en 2001 ;

- à *Michel Peyron* et à ses collègues du service RTM de Barcelonnette, pour leur disponibilité et leur aide, notamment pour la recherche de documents historiques relatifs à la torrentialité dans le bassin de Barcelonnette ;

- à *Anne-Véronique Auzet*, de l'institut de Mécanique des Fluides et des Solides, Strasbourg, pour ses conseils et services, le prêt de matériel et pour avoir accepté, pour quelques missions, de venir se confronter aux formations superficielles du torrent de *Faucon* ;

- à *Eric Bardou*, de l'IGRA, Université de Lausanne, pour ses démonstrations et ses conseils en rhéométrie ;

- à *Santiago Begueria*, chargé de recherche à l'IPE de Saragosse, pour nos échanges fructueux et son aide dans l'utilisation des modèles d'étalement ;

- à *Bruno Ambroise*, de l'institut de Mécanique des Fluides et des Solides, Strasbourg, pour ses conseils précieux et bénéfiques, et la rigueur de son analyse.

Je suis très honoré d'avoir eu l'occasion de discuter des résultats d'analyse ou de modélisation, de manière informelle ou au cours de réunion de travail, avec *Johannes Hübl et Dieter Rickenmann* de l'Université de Vienne, les Professeurs *Laurent Vulliet, Christophe Bonnard et Lyesse Laloui*, de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, *Richard Iverson*, de l'US Geological Survey, *Jim O'Brien*, Tetra Technologies, Arizona et *Hiroshi Suwa*, de l'Université de Kyoto. Je remercie également *Jacques Locat*, du Département de Géologie et Génie Géologique de l'Université Laval, Québec, pour son aide dans la caractérisation des matériaux dans le cadre du séjour de *Jean-Philippe Malet* dans son laboratoire.

Un grand merci aux enseignants, ingénieurs et doctorants rencontrés pendant mes séjours au Centre of Landscape Dynamics de l'Université d'Utrecht, Pays-Bas et au Laboratoire de

Mécanique des sols de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne : *Mattéo Moreni, Tom Bogaard, Rens van Beek et Théo van Asch*.

Dans un travail de thèse sur les risques torrentiels, marqué par une forte composante terrain, le travail d'équipe est primordial. Que tous les étudiants de Licence, Maîtrise et DEA, de Strasbourg ou d'ailleurs, qui ont participé activement à des campagnes de terrain, ou tout simplement aidé à porter du matériel dans des conditions difficiles, trouvent ici l'expression de ma reconnaissance. Merci à *Stéphane Pierre*, avec qui j'ai partagé mes premières expériences sur le torrent de Faucon. Merci à *Sébastien Klotz*, *Emmanuel Truchet*, *Arnaud Ritzenthaler*, *Fabien Huser*, *Julien Guillon, Pascal Locat* pour leur aide sur le terrain et dans la caractérisation des matériaux en laboratoire. Merci à *Elise Beck*, *Virginie Sautrey* et *Sophie Retailleau* pour leur aide, notamment lors des mesures de nivellement et de l'élaboration de la base de données sur les seuils des torrents de Faucon et de Champerousse. Merci à *Yannick Thiery* pour son aide précieuse dans la mise en page finale de ce document dans les dernières semaines, et pour son aide sur le terrain, je l'en remercie sincèrement. Merci également à *Martine Trautmann* du Laboratoire d'Analyse des Sols de l'Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, pour son accueil chaleureux tout les matins, son café et sa bonne humeur communicative. Un grand merci à l'équipe des 'jeunes' de la Faculté de Géographie de Strasbourg pour les bons moments partagés (à l'heure du café !) : *Romain, Karine, Damien, Stéphanie*, *Bouchra*, … en espérant n'avoir oublié personne !

Je remercie également les amis qui m'ont toujours soutenu pendant ces longues années d'études, en particulier *David, Laurent et Déborah, Frédéric, Arnaud et Jean-Nicolas, Matthias, Ethel, Mélanie, Julien et Corinne, Angelo* ... que ceux que j'ai oublié me pardonne !

Enfin, je tiens à remercier ma famille, et mes parents en particulier, qui ont toujours été là quand j'avais besoin de leur soutien. Leur présence à mes cotés lors des moments difficiles et leurs constants encouragements ont permis de créer les conditions bénéfiques à un travail de rédaction serein au cours des derniers mois.

Résumé :

Les 'laves torrentielles' constituent un risque naturel majeur dans la plupart des zones de montagne. Ce terme désigne des volumes importants d'un mélange d'eau, de sédiments de toute taille et de matières organiques, fortement concentré s'écoulant dans les torrents de montagne. L'énergie considérable mise en jeu et la taille parfois considérable des bassins versants torrentiels rendent souvent peu efficaces les solutions techniques de protection contre ces écoulements. Traditionnellement, les études cherchant à évaluer les volumes sédimentaires potentiellement mobilisables portent soit sur la production détritique des versants, soit sur la fourniture sédimentaire uniquement en sortie de bassin versant, mais rarement sur l'évaluation des matériaux sources potentiellement mobilisables provenant à la fois du lit et des versants. Ainsi, des travaux scientifiques ont été engagés sur la base d'une meilleure connaissance du fonctionnement des laves torrentielles. Pour cela, nous avons développé une approche fondée sur des mesures et des observations in-situ, des essais de caractérisation physique, géomécanique et rhéologique et une modélisation numérique. Le site expérimental du torrent de Faucon (Alpes du Sud), où deux importantes laves se sont déclenchées au cours de ces dix dernières années, a été choisi pour cette étude. La complexité des laves ne permet pas d'utiliser un seul code couplé, ainsi pour chacune des trois phases des laves (déclenchement, propagation et dépôt/étalement) des modèles spécifiques ont été utilisés. Cette thèse contribue à améliorer la connaissance scientifique des processus torrentiels et propose de nouvelles pistes de recherche pour le développement de futurs modèles.

Mots Clés : lave torrentielle, aléa torrentiel, géomorphologie, sédimentologie, rhéologie, modélisation

Abstract :

Debris flows constitute a major natural risk in mountainous areas. Debris flows consist of a highly concentrated mixture of soil, rock, wood debris and water which flows rapidly downvalley in a series of surges with steep fronts that consist mostly of large boulders. The considerable energy involved and the great size of torrential watersheds often render inefficient any techniques of protection. Generally, the studies trying to estimate these volume of debris flow concern either the detrital production of slopes, or the sediment supply only in exit, but rarely the erosion/deposition process along the pathway and the neighbouring slopes. A scientific work has been carried out to deal with this problem on the basis of a better knowledge of debris flow processes. This approach is based on in-situ observations and measurements, geomechanical and rheological tests and finally numerical modelling. The Faucon torrent, where two important debris flows occurred during the last ten years, has been chosen as experimental study site. Due do the complexity of the phenomena, the use of only one code is not possible. Therefore, a specific numerical approach has been carried out for each stage of this phenomenon (triggering, runout and spreading). This thesis thus contributes to improved scientific knowledge of the torrent processes, and brings further informations for the development of future models.

Key Words: *debris flow, torrential hazard, geomorphology, sedimentology, rheology, modelling*

INTRODUCTION GENERALE

CONCEPTS ET MISE EN EVIDENCE DU PROBLEME

Cette recherche s'intègre dans le cadre des travaux menés sur **les aléas naturels**, en particulier pour la définition, la connaissance, la prévision et l'évaluation de **l'aléa géomorphologique (aléa 'mouvements de terrain')** en terme d'intensité et d'occurrence spatiale et temporelle. Les **laves torrentielles** (*debris flows*) sont un type particulier de mouvements de terrain. Elles peuvent affecter des petits chenaux temporaires sur de courtes distances comme l'ensemble d'un appareil torrentiel. Le caractère imprévisible du phénomène (dans l'espace et le temps), ainsi que le nombre et la variété des facteurs déclenchant rendent délicate l'appréciation de cet aléa.

Les laves torrentielles sont des **glissements de 'type écoulement**' (*flow-like landslides, mass flows*), elles peuvent être boueuses, granulaires, canalisées ou non. A l'échelle du globe, elles sont présentes dans la plupart des zones montagneuses. Caractérisées par un **comportement fluide** des matériaux, les laves torrentielles constituent un réel danger en raison de leurs importantes capacités de transport et de submersion, de leurs vitesses de propagation élevées et de leurs phénoménales forces d'impact. Elles sont singulièrement dangereuses lorsqu'elles surviennent dans des zones où se localisent de nombreux biens exposés à forts enjeux socio-économiques et humains. Les dommages aux infrastructures et les nombreuses victimes peuvent affecter l'économie d'une région toute entière, notamment dans les pays en voie de développement. Les catastrophes survenues lors des vingt dernières années en France ou à l'étranger ont clairement montré l'existence d'une forte demande sociale face à ce phénomène pour répondre à de nombreuses questions en suspens sur son occurrence spatiale et temporelle.

Le terme lave torrentielle désigne un mélange fluide, fortement concentré, d'eau et de particules solides dont le diamètre s'étend du micron au mètre (concentration volumique solide ϕ >.0.50) qui s'écoule dans un chenal torrentiel à des vitesses comprises entre 1 et 20 $m.s^{-1}$ survenant dans la plupart des cas après de longues et/ou fortes pluies. Les volumes concernés par ces écoulements vont de quelques milliers à plusieurs millions de m^3, les distances de transport s'étendent de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres Deux grands types de laves torrentielles sont distingués : les laves torrentielles à matrice boueuse, très riches en éléments fins (argiles, limons et silts), et les laves torrentielles à matrice granulaire riches en éléments sableux et grossiers.

Trois grandes phases sont distinguées lors d'une lave torrentielle : les phases de déclenchement, de propagation et de dépôt.

Lors de la phase **de déclenchement**, les mécanismes sont extrêmement variés d'un bassin versant à l'autre, et d'ailleurs, pour un même bassin, plusieurs mécanismes peuvent être observés. Ceci rend difficile la mise en place de moyens de protection et de prévention efficaces. Chaque appareil torrentiel, avec ses spécificités, doit faire l'objet d'une étude approfondie.

Deux grands mécanismes de déclenchement sont habituellement distingués : l'un où la zone source est multiple, l'autre où la zone source est unique :

- **dans le cas de zones sources multiples et distribuées**, le déclenchement d'une lave torrentielle est lié d'abord à l'érosion diffuse, lente et continue de tout ou partie de la surface du bassin-versant, puis à une concentration dans le chenal torrentiel

des eaux chargées en sédiments. Dans ce cas, les volumes transportés ne dépassent pas généralement quelques dizaines de milliers de m^3 ;

- **dans celui d'une zone source unique**, la lave torrentielle se déclenche à la suite d'un glissement de terrain situé à proximité du chenal torrentiel, soit parce que tout ou partie du volume déplacé se liquéfie, soit parce qu'il provoque un embâcle qui en cédant brutalement libère un volume d'un mélange de matériaux et d'eau pouvant atteindre plusieurs dizaines de milliers de m^3.

Les mécanismes de déclenchement sont fortement liés aux **facteurs de prédisposition** du bassin versant concerné (conditions géologiques, géomorphologiques, hydrologiques, hydrogéologiques) et aux **facteurs déclenchant** *stricto sensu* (climatiques). Ces différents facteurs interviennent à travers divers processus complexes et multiples conduisant souvent à une connaissance imparfaite des mécanismes de déclenchement. Généralement, l'eau est le facteur prépondérant, aussi bien dans la phase de préparation (saturation progressive des matériaux sources, accumulation de débris, etc.) que dans la phase de déclenchement proprement dite (forçages atmosphériques liés à des pluies exceptionnelles -en intensité et/ou en durée- et/ou liés à la fonte rapide d'un manteau neigeux). Son action sera d'autant plus efficace que les facteurs de prédisposition du bassin versant seront favorables (contexte hydrogéologique, organisation du réseau de drainage, etc.).

Les facteurs de prédisposition ont également un rôle très important dans l**es processus d'érosion et de dépôt de la lave torrentielle** pendant sa propagation. En fonction des conditions morphologiques du chenal (pente du profil en long, tracé du chenal, nature des formations superficielles potentiellement mobilisable, etc.) la lave torrentielle pourra incorporer des matériaux supplémentaires par érosion du lit et/ou des berges, ou au contraire pourra déposer une partie des matériaux transportés. Ces variations de volumes peuvent être très importantes au cours d'un événement, le volume déposé dans le chenal ou sur le cône pourra être 10 à 20 fois supérieur au volume de la lave au moment de son déclenchement. Ce phénomène est souvent appelé **contribution** ou alimentation. Les matériaux incorporés vont avoir une influence sur la texture de la lave torrentielle, et donc sur son comportement.

OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

La recherche menée dans le cadre de ce travail a pour objectif d'apporter des éléments de réponses, des pistes de recherches sur quelques points du phénomène lave torrentielle dans son ensemble, en s'intéressant aux phases de déclenchement, de propagation et de dépôt du phénomène. Le cadre général de la recherche peut être structuré par trois grandes questions :

- Quel peut être **l'apport des outils géomorphologiques** dans l'étude et la compréhension **des trois phases** d'une lave torrentielle ?
- Quelles sont **les modalités de fonctionnement des zones d'érosion et/ou de dépôts** pendant la propagation d'une lave torrentielle ?
- Quelle stratégie doit-on mettre en œuvre pour appréhender **l'extension des zones menacées** pour différents scénarios (en terme de **volumes,** de **rhéologies,** etc.) ?

Les laves torrentielles sont un phénomène sédimentaire unique. Contrairement à l'hydraulique fluviale où les matériaux solides proviennent soit de l'amont pour les matières en suspension, soit du lit de la rivière pour le charriage, les matériaux solides dans les écoulements torrentiels ont une multitude d'origines (affouillements de berges, apports des affluents, glissements de terrain, etc.). Ces sources de matériaux ne constituent pas plusieurs points particuliers du système mais bien le phénomène essentiel. Pour prédire leur

évolution et pour donner des informations utiles aux experts et/ou aux aménageurs, il paraît fondamental **d'intégrer ces processus sédimentaires d'apports de matériaux solides dans les modèles numériques d'écoulement**, afin que ces derniers puissent reproduire, de la manière la plus réaliste qu'il soit, ces phénomènes complexes. Pour ce travail, plusieurs modèles d'écoulement, basés sur des lois d'écoulements ou des structures différentes, seront utilisés. La démarche proposée dans ce travail est de sélectionner plusieurs modèles existants pour les caler/valider sur des observations afin de vérifier leur applicabilité.

Dans le cadre de cette thèse, les objectifs scientifiques sont les suivants :

- Définir **les particularités des laves torrentielles boueuses**, dans le contexte d'un **bassin versant marneux**, en terme de **morphologie** (mécanismes de déclenchement, de propagation et de dépôts), de **sédimentologie** (identification des matériaux sources, classification des écoulements) et **de rhéologie** (définition des conditions d'écoulements naturels et de mélanges artificiels de formations superficielles) ;
- Etablir des **scénarios de fonctionnement** des laves torrentielles boueuses dans les bassins marneux *'contrastés'* à partir d'**observations de terrain** et des **caractéristiques physiques** des matériaux ;
- Tester et valider différents types de **modèles de propagation** de laves sur des évènements de laves torrentielles boueuses selon différents modèles rhéologiques ;
- Tester l'effet de différentes configurations sur la propagation et l'étalement des laves, à partir de simulations numériques, avec **apport de matériaux après la phase de déclenchement**, localisation et hauteur des **seuils torrentiels**, etc., pour des volumes ou des caractéristiques rhéologiques variables.

Des recherches ont été entreprises ces dernières décennies sur les modèles de propagation et de dépôts des écoulements de laves torrentielles. Très peu de modèles ont pu être calés/validés sur des évènements réels. Ainsi les observations morphologiques, les analyses sédimentologiques et rhéologiques des dépôts de laves torrentielles et des formations superficielles sources, acquises depuis 1996 sur le bassin versant du torrent de *Faucon* constituent un apport important de ce travail. Ces informations ont été choisies comme critères de référence des opérations de calage/validation des modèles sélectionnés.

A court-terme, cette étude se veut être un apport à la connaissance générale du phénomène lave torrentielle. La comparaison entre les observations, les analyses sédimentologiques et rhéologiques et les résultats des modèles numériques doivent permettre d'améliorer la connaissance du phénomène d'une part, et fournir **des éléments de réflexion sur le développement** de futurs modèles numériques, d'autre part.

A moyen- et long-termes, la stratégie développée dans le cadre de cette recherche doit pouvoir être employée de manière robuste et efficace par les gestionnaires du risque *lave torrentielle*. Les objectifs évoqués plus haut doivent à terme être remplis pour :

- Déterminer avec précision **les torrents susceptibles de générer ou non une lave torrentielle**, et définir précisément l'extension de la zone potentiellement à risque. Pour des catastrophes récentes, comme celle de *Sarno-Quindici*, l'extension de l'aléa a été fortement sous-estimée. En effet, en présence de phénomènes brutaux et imprévisibles susceptibles de menacer des vies humaines, il semble opportun de délimiter les zones de danger, en tant que support à la planification des secours ;
- Définir efficacement (ratio coût/temps) **les zones de déclenchement et de contribution potentielles** des laves torrentielles pour fournir une aide aux services gestionnaires chargés de la mise en place d'un dispositif de correction torrentielle et/ou du déplacement des populations menacées. A l'heure actuelle, de par les

difficultés liées à leur exploitation (logiciels associés, interface non conviviale, validité du code numérique, etc.), l'utilisation des modèles numériques pour résoudre ce type de problème reste insignifiante. Dans l'immense majorité des cas seul le jugement de l'expert fait encore loi ;

- Favoriser l'élaboration d'une **base de données sur l'ensemble du massif alpin**, regroupant les descriptions précises des évènements type *lave torrentielle*. Dans les chroniques historiques sur l'activité d'un torrent ou d'un secteur particulier, les évènements sont souvent peu explicités, ou alors mal identifiés (une lave torrentielle est notifiée comme une crue par exemple). Une harmonisation et un regroupement des informations dans une base de données accessible aux praticiens, aux chercheurs et aux autorités concernées sont fortement souhaités, comme cela peut se trouver aux Etats-Unis ou au Canada.

La recherche engagée a donc pour objectif de fournir des éléments tangibles de réflexion pour l'élaboration future de modèle prédictif efficace, simple d'utilisation et fiable. Ces modèles doivent à terme être capable (1) de prédire avec un minimum d'informations la survenance d'une lave torrentielle et (2) de prévoir son extension spatiale en fonction des volumes des zones potentielles de déclenchement et de contribution.

CADRE GENERALE DE LA RECHERCHE

Cette étude a pour cadre général les Alpes du Sud de la France, et plus particulièrement les zones où affleurent **les marnes noires du Callovien-Oxfordien**, connues pour leur grande susceptibilité aux mouvements de terrain. L'activité torrentielle dans cette partie des Alpes a été très intense au cours des derniers siècles ; les formations marneuses alliées aux formations superficielles glaciaires et périglaciaires, et aux nappes de charriage fournissant régulièrement d'importants stocks de matériaux mobilisables par les torrents. Avant 1850, associée à ces facteurs, l'intense activité agro-pastorale (déboisements et défrichements massifs durant le 18ème et le 19ème siècle) a contribué à faciliter le déclenchement de crues et/ou de laves torrentielles particulièrement meurtrières et dévastatrices et, le développement de puissants appareils torrentiels. Ces successions de manifestations torrentielles ont conduit à la création des services de *Restauration des Terrains de Montagne* (RTM) dans ce secteur des *Alpes-de-Haute-Provence*. Une très vaste campagne de correction torrentielle et de reboisement des torrents les plus dangereux a alors été entreprise. Actuellement, plusieurs torrents actifs sont localisés dans les Alpes du Sud, respectivement d'*Ouest* en *Est* et du *Nord* au *Sud*, le torrent du *Boscodon* (*Hautes-Alpes*), les torrents du *Riou-Bourdoux* et du *Faucon* (Alpes-de-Haute-Provence), les torrents du *Tuebi* et de la *Maiola* (*Alpes Maritimes*). De nombreuses laves torrentielles se sont déclenchées dans ces appareils torrentiels provoquant, dans la plupart des cas, de très importants dégâts. Tous ces torrents évoluent dans des terrains majoritairement argilo-schisteux, fortement anthropisés.

Le **bassin de *Barcelonnette*** est un cadre adapté aux objectifs de cette recherche, 'la vallée des torrents' est le siège de nombreux appareils torrentiels actifs (le *Riou-Bourdoux*, le *Faucon*, l'*Abeous*, le *Riou-Chanal*, les *Sanières*, etc.). Parmi eux, nous avons eu l'opportunité de travailler sur **le torrent de *Faucon*** où deux importantes laves torrentielles se sont produites ces dernières années (1996 et 2003). Le torrent de *Faucon* est un site particulièrement intéressant pour la recherche envisagée : des dimensions suffisantes et représentatives (près de 10 km^2 de superficie, 6,5 km de long), une lithologie variée (marnes noires, calcaires, flyschs et formations superficielles), des équipements de protection torrentielle, et une activité récente permettant l'observation fine.

La recherche trouve son origine dans les travaux menés, dans le bassin de *Barcelonnette*, par une équipe du *Centre d'Etudes et de Recherches Eco-Géographiques* (CEREG) de *Strasbourg* animée par le Professeur *Jean-Claude Flageollet* au début des années quatre-vingt. De nombreux travaux ont été engagés dans ce bassin, notamment dans le cadre de trois projets de recherche européens successifs associant différentes universités européennes : *EPOCH*[1] (1991-1993), *TESLEC*[2] (1994-1996) et *NEWTECH*[3] (1996-1998). A ces programmes succèdent plusieurs autres projets nationaux, soutenus par l'*Institut National des Sciences de l'Univers (INSU)* et le *Ministère de la Recherche* dans le cadre du *Programme National Risques Naturels (PNRN)* et de l'*Action Concertée Incitative Catastrophes Naturelles (ACI-CatNat)* : *ACI-CatNat Mote*[4] (2000-2001), et *PNRN-Eclat*[5] (2001-2002) coordonnés par *Olivier Maquaire*. Enfin, le programme européen ALARM[6] (2001-2004) a permis d'engager de nombreuses investigations supplémentaires.

Ces projets de recherche avaient pour objectif, (1) de caractériser les mécanismes de transformations de glissements-coulées en laves torrentielles, (2) de développer des techniques d'auscultation adaptées, (3) de caractériser et modéliser les changements de comportement des laves torrentielles au cours de leur propagation, (4) de définir l'extension de la zone à risque en fonction de la rhéologie évolutive des laves torrentielles.

Plusieurs thèses ont été financées grâce à ces projets successifs, elles ont centré leurs efforts sur le glissement-coulée de *Super-Sauze* (*D. Weber*, 2001 ; *M. Schmutz*, 2000 et *J.Ph. Malet*, 2003). La recherche a débuté, à *l'Université Louis Pasteur* à *Strasbourg*, en décembre 2000, au *Centre d'Etudes et de Recherches Eco-Géographiques (CEREG, UMR 7007 ULP-CNRS-ENGEES)*, et s'est poursuivie à partir de Janvier 2001, à *l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS, UMR 7516, ULP-CNRS)*. Depuis Décembre 2004, elle s'est achevée dans le laboratoire *GEOPHEN* (LETG UMR 6554) à *l'Université de Caen Basse-Normandie*. En complément des soutiens matériels, administratifs et financiers, cette thèse a bénéficié de l'appui technique, scientifique et thématique de plusieurs équipes de recherche rassemblées dans un pôle de compétences pluridisciplinaires faisant office de comité scientifique. Ce pôle de compétences associe des géomorphologues, des géologues, des géotechniciens, des hydrologues, des géophysiciens et des rhéologues. Les laboratoires suivants ont été impliqués dans cette recherche :

- le Cemagref, Unité de Recherche 'Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches', Grenoble (*C. Ancey, D. Laigle, M. Meunier, D. Richard*) ;
- le Département de Géologie et de Génie Géologique, Université Laval, Quebec (*J. Locat*) ;
- le Laboratoire de Mécanique des Sols, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (LMS-EPFL), Lausanne (*L. Laloui, G. Gruaz, L. Vulliet*) ;
- le Utrecht Centre of the Environment and Landscape Dynamics (UCEL), Université d'Utrecht (*T. van Asch*).

---

[1] *EPOCH:* The Temporal Occurrence and Forecasting of Landslides in the European Community*, EC-DG XII, Contrat No. 90-0025, Coordinateur : J.-C. Flageollet, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.*

[2] *TESLEC:* The Temporal Stability and Activity of Landslides in Europe with Respect to Climatic Change*, EC-DG XII, Contrat No. EV5V-CT94-0454, Coordinateur : R. Dikau, Universität Bonn, Bonn, Germany.*

[3] *NEWTECH:* New Technologies for Landslide Hazard Assessment and Management in Europe*, EC-DG XII, Contrat No. ENV-CT96-0248, Coordinateur : J. Corominas, Universitad Polytechnica de Catalunya, Barcelona, Spain.*

[4] *ACI-CatNat Mote :* Modélisation, Transformation et Ecoulement des Coulées Boueuses dans les Marnes*, Coordinateur : O.Maquaire, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.*

[5] *PNRN-Eclat :* Ecoulement, Initiation et Contribution des Laves Torrentielles dans les Bassins Marneux*, Coordinateur : O.Maquaire, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.*

[6] *ALARM:* Assessment of LAndslides Risks and Mitigation in mountainous areas*, EC-DG XII, Contrat No. EV6-2001-0018, Coordinateur : S. Silvano, CNR-IRPI Padova, Italy.*

Cette recherche sur les *'laves torrentielles'* s'est intéressée aux trois phases du phénomènes : le déclenchement, la propagation et le dépôt. La complexité du phénomène et la variété des processus physiques concernés impliquent une approche interdisciplinaire, faisant appel à des connaissances très pointues dans des disciplines diverses. La problématique de l'étude d'un tel phénomène va donc être différente en fonction de la (géo)discipline considérée :

- pour le **géomorphologue** ou le **géologue**, les écoulements de type laves torrentielles sont considérés comme un processus sédimentaire entre une zone source à l'amont et une zone de dépôt à l'aval, la phase d'écoulement proprement dite est très peu considérée. L'échelle d'étude s'étend du bassin versant au bief torrentiel ;
- pour le **rhéophysicien,** la démarche consiste à expliquer les comportements macroscopiques du fluide (vitesses, déformations, étalement, etc.) en étudiant la physique 'locale' de la microstructure (seuil de contrainte, arrangement des grains, etc.) de l'écoulement. Les processus d'écoulement et d'étalement sont évoqués en terme de hauteur critique d'écoulement, de gradient de cisaillement et de lois de comportement ;
- pour **l'ingénieur civil**, le comportement d'un tel écoulement se situe à l'interface de la mécanique des fluides et de l'hydraulique ;

La problématique d'étude des écoulements de type laves torrentielles peut donc être appréhendée différemment en fonction de sa propre vision du phénomène. Aux vues de la complexité de ces écoulements (non stationnarité du milieu physique, échelles spatio-temporelles différentes pour les processus élémentaires, forte hétérogénéité à la fois au sein de l'écoulement et dans le milieu naturel affecté, non-linéarité du système), il semble opportun d'avoir une approche transdisciplinaire, s'appuyant à la fois sur une approche naturaliste (observations), expérimentale (*in situ* et en laboratoire), conceptuelle et modélisatrice. C'est dans cet esprit que la recherche proposée a été effectuée, en s'appuyant en particulier sur l'étude du torrent de *Faucon* et des évènements de type laves torrentielles qui s'y sont produits.

STRUCTURE DE LA THESE

La thèse est structurée en trois grandes parties, regroupant un total de huit chapitres. Ainsi, les résultats sont présentés en tenant compte successivement de différentes échelles spatiales (allant d'un bassin de 'risque' à un bief torrentiel) et temporelles permettant d'appréhender la dynamique et la répartition des laves torrentielles au cours du temps.

La ***première partie*** dresse en premier lieu un état de l'art des connaissances actuelles sur les laves torrentielles, puis présente les caractéristiques du bassin de risque torrentiel (bassin de Barcelonnette) et son activité torrentielle en liaison avec les conditions météo-climatiques et, enfin décrit quatre torrents en particulier qui ont connu des événements torrentiels lors de ces dix dernières années.

Le ***premier chapitre*** présente la problématique générale et expose la méthodologie utilisée. Ainsi, la terminologie des mouvements de terrain de type écoulement et plus particulièrement des 'laves torrentielles' est présentée, en évoquant les caractéristiques morphologiques de ces écoulements (mécanismes et zones de déclenchement, propagation et dépôts). Ce chapitre discute le point des connaissances actuelles et les besoins de recherche associés. Les entités fonctionnelles d'une lave torrentielles, la relation entre l'occurrence de tels évènements et leur bassin versant sont décrites et discutées en s'appuyant sur des références essentiellement européennes et nord-américaines décrivant

des évènements de type lave torrentielle. Un bilan des connaissances sur le comportement des laves torrentielles (rhéologie) est ensuite présenté, les différentes approches sont discutées. Puis, un état de l'art des modèles de propagation et d'étalement de laves torrentielles est présenté, en insistant sur leur domaine de validité, leur applicabilité et les orientations futures des outils numériques. Enfin, la méthodologie utilisée dans ce travail est exposée point par point, pour les trois phases de la lave.

Le ***deuxième chapitre*** expose les grands traits morphologiques (aspects géographiques, contexte structural, héritage glaciaire, etc.), l'historique de l'activité torrentielle et les caractéristiques climatiques (traits généraux et spécificités du climat *ubayen*) du *bassin de Barcelonnette.* L'activité torrentielle est analysée en confrontant l'historique des évènements (répartition temporelle et spatiale) aux séries météo-climatiques associées (précipitations annuelles, mensuelles, journalières). Enfin, pour comprendre pourquoi certains torrents sont plus actifs que d'autres, les caractéristiques morphologiques et morphométriques de plusieurs bassins versants torrentiels sont confrontées.

Le ***troisième chapitre*** décrit plus précisément les caractéristiques géographiques et morphologiques des sites de recherches (les torrents de *Faucon*, site principal et les torrents de l'*Abeous*, du *Bourget* et des *Sanières*), les enjeux socio-économiques menacés par les écoulements de laves torrentielles sont évoqués et discutés. La présentation des sites d'études et la description d'événements torrentiels survenus dans ces sites (essentiellement en terme de dégâts associés) sont successivement abordées.

La ***deuxième partie*** est consacrée à l'étude de trois événements torrentiels survenus sur le torrent de *Faucon*. Cette étude porte à la fois sur la morphologie (du lit et des versants) et sur les matériaux (dépôts torrentiels et formations superficielles sources).

Le ***quatrième chapitre*** analyse la morphologie fine du torrent de *Faucon* après trois événements torrentiels survenus en 1996, 2002 et 2003. Les trois évènements sont décrits pour des zones 'homogènes' en insistant sur le fonctionnement de ces zones (zones d'érosion/dépôt dans le chenal, description de l'état du lit, des berges torrentielles, des versants contigus et des seuils torrentiels). Enfin, les investigations menées sur une zone potentielle de déclenchement (le glissement de terrain de *Champerousse*) sont décrites.

Dans le ***cinquième chapitre*****,** les caractéristiques sédimentologiques, hydrodynamiques, géotechniques et rhéologiques des dépôts de laves torrentielles et des matériaux sources (issus des zones '*réelles*' ou '*potentielles*' de déclenchement et d'alimentation) sont analysées. Après avoir défini le type d'écoulement associé aux dépôts étudiés, les analyses comparatives entre les matériaux sources et les dépôts de laves sont présentées. Les lois de comportement des matériaux sont définies et l'évolution des caractéristiques rhéologiques en fonction de la granulométrie et de la teneur en eau est discutée. Des essais rhéologiques sur des mélanges artificiels de '*matériaux sources*' sont présentés et comparés aux caractéristiques rhéologiques des dépôts de laves torrentielles.

Le ***sixième chapitre*** est une synthèse entre les observations sur le torrent de *Faucon* (Chapitre 4) et les caractérisations des matériaux (Chapitre 5). Une interprétation du fonctionnement, en terme de volumes écoulés et de types de matériaux impliqués, de l'appareil torrentiel de *Faucon* pour chacun des événements de 1996, 2002 et 2003 est proposée. Cette interprétation est présentée pour les phases de déclenchement, de propagation et de dépôt. Pour la phase de déclenchement, les mécanismes de déclenchement et les volumes associés sont estimés et discutés. Pour la phase de propagation, les paramètres hydrauliques (volumes globaux et caractéristiques d'écoulement) et l'évolution des caractéristiques des matériaux pendant la propagation (sédimentologie et rhéologie) sont confrontés et analysés. La phase de dépôt est analysée en évoquant la distribution spatiale des dépôts de laves torrentielles dans le chenal et sur le

cône. Enfin, une étude statistique des caractéristiques des biefs torrentiels du *Faucon* est réalisée sur la base d'une analyse en composantes principales (ACP) et d'une classification hiérarchique ascendante (CAH). Les résultats de ces analyses statistiques sont confrontés aux observations relatives à la lave de 2003.

La ***troisième partie*** concerne l'utilisation des modèles numériques dans l'étude des phases de déclenchement, de propagation et de dépôt (étalement).

Le ***septième chapitre*** est consacré à la mise en place d'une stratégie pour la réalisation de simulations numériques et à la présentation des codes de calcul. Les scénarii de la modélisation numérique pour le déclenchement, la propagation et le dépôt (étalement) sont successivement abordés. Deux codes (*SEEP / W*, *FLAC* 2-D) ont été sélectionnés pour la phase de déclenchement, trois codes numériques (intégrant des lois de comportement viscoplastiques) ont été sélectionnés pour la phase de propagation (*Bing*, *Cemagref 1-D*, *DFM-Janbu*), le code numérique bidimensionnel *Cemagref 2-D* a été sélectionné pour modéliser l'étalement. Une étude de sensibilité est présentée, les données d'entrée les plus sensibles sont identifiées et les limites d'utilisation des codes numériques sont évoquées. Les modèles de propagation et de dépôt (étalement) sont calés/validés sur les évènements de laves du torrent de *Faucon*.

Dans le ***huitième chapitre***, des scénarii d'évènements de laves sont exposés. Ces scénarii, accompagnés d'une marge d'erreur liée aux limites d'application des codes numériques, sont proposés comme un exemple d'utilisation des codes pour une gestion de l'aléa 'lave torrentielle'. Les résultats pour trois scénarii de déclenchement (deux par un glissement de terrain, un par des ruptures de berges) sont présentés. Plusieurs scénarii de propagation, suivant la localisation du déclenchement et le type de matériaux sources, sont ensuite analysés et discutés. L'introduction de la contribution dans les simulations de la propagation (selon trois méthodes) est réalisée pour le code *DFM-Janbu*. Un essai de quantification du rôle des seuils (scénarii en fonction du nombre de seuils et de leur positionnement dans le chenal torrentiel) est proposé à l'aide des codes numériques *Cemagref 1-D* et *Bing*. Enfin, les volumes minimaux pour atteindre les zones à fort enjeu (cône de déjection) sont estimés à l'aide des codes numériques ; les caractéristiques des étalements associés à ces volumes et calculées par les codes numériques sont indiquées et discutées.

Ce travail sur l'analyse de l'aléa 'lave torrentielle boueuse' est une contribution aux recherches menées depuis quelques années maintenant. Il fournit des données sur le fonctionnement des laves torrentielles boueuses, et cherche avant tout à susciter l'intérêt de la communauté scientifique sur ces aspects morphologiques, sédimentologiques et rhéologiques. Un effort particulier sur les méthodes d'observations des laves torrentielles, et sur l'intégration des processus de contribution dans les codes numériques doit être poursuivi.

Avant-propos

DES TRAGEDIES POUR LA PRISE DE CONSCIENCE DU RISQUE

En 1976, lors d'une enquête de l'UNESCO, certains pays ont indiqué que les instabilités gravitaires de versant étaient inexistantes, ou peu importantes sur leur territoire (Bénin, Egypte, Ile Maurice, Singapour, Soudan). Pourtant, compte tenu de **la variété des phénomènes d'instabilités**, peu de régions échappent à leurs manifestations (Flageollet, 1988). Les instabilités gravitaires de versant se rencontrent sous toutes les latitudes. De très nombreux pays sont concernés par ces instabilités à des degrés divers et certaines régions plus particulièrement. Trois grands **facteurs déclenchant** peuvent être à l'origine de ces instabilités : de fortes précipitations (passage d'un cyclone tropical, mousson), un séisme, ou bien encore une activité volcanique. En première approximation, les zones d'aléas **'*mouvements de terrain*'** peuvent correspondre grossièrement à l'extension des zones concernées par ces aléas cycloniques, sismiques et volcaniques (Alexander, 1993 ; Ledoux, 1995, Dauphiné, 2001 ; Veyret-Mekdjian, 2001 ; Veyret, 2003).

Les pays les plus touchés par l'aléa *'mouvements de terrain'* et qui paient le plus lourd tribu en terme de victimes sont la Chine, les pays andins, les pays caucasiens, le Japon, l'Inde, l'Italie, les Etats-Unis d'Amérique, le Canada et les pays de l'arc alpin. Ces mouvements sont particulièrement destructeurs au Japon, au Canada et en Italie (Berz, 1992). Les conséquences de ces mouvements de terrain peuvent être **meurtrières et destructrices**, mais leurs ampleurs n'atteignent pas celles des inondations, des cyclones tropicaux ou bien encore des séismes, du fait essentiellement de leur faible extension spatiale (Ledoux, 1995). En moyenne, les bilans indiquent que les catastrophes occasionnées par les mouvements de terrain font entre 800 et 1 000 morts par an dans le monde (Aleotti & Chowdhury, 1999). Varnes (1981) estimait, qu'entre 1971 et 1974, quelques 600 personnes avaient été tuées chaque année par des mouvements de terrain. Environ 90% de ces victimes se localisaient dans les régions situées dans et autour de l'océan pacifique.

Les mouvements de terrain ont marqué les esprits, notamment lors de la survenance d'évènements catastrophiques particulièrement meurtriers. En 1963, le glissement du *Vajont* sur *le Mont Toc* (Dolomites, Italie) a provoqué la chute de plusieurs millions de m^3 de matériaux dans le lac de retenue d'un barrage hydroélectrique, entraînant la formation d'une gigantesque lame d'eau qui a débordé par dessus le barrage. La lame d'eau a dévasté la ville de *Longarone* à l'aval, provoquant la mort de plus de 2 000 personnes (Kiersch, 1964 ; Muller, 1968). Ce glissement de terrain a occasionné le plus de victimes en Europe. Plus récemment, en 1985, la ville *d'Armero* (Colombie) a été dévastée par les coulées boueuses du *Nevado del Ruiz* causant la mort de 23 000 victimes (Pierson *et al.*, 1990). En 1994, les inondations survenant dans la région *piémont* (Italie) ont entraîné la mort de 70 personnes, dont 20 par des glissements de terrain. En 1998, à *Sarno* et *Quindici* (Campanie, Italie), 161 personnes ont été tuées par des coulées boueuses de débris et des laves torrentielles (Cinque *et al.*, 2000 ; Guzzetti, 2000 ; Aleotti et Polloni, 2003 ; Calcaterra *et al.*, 2003).

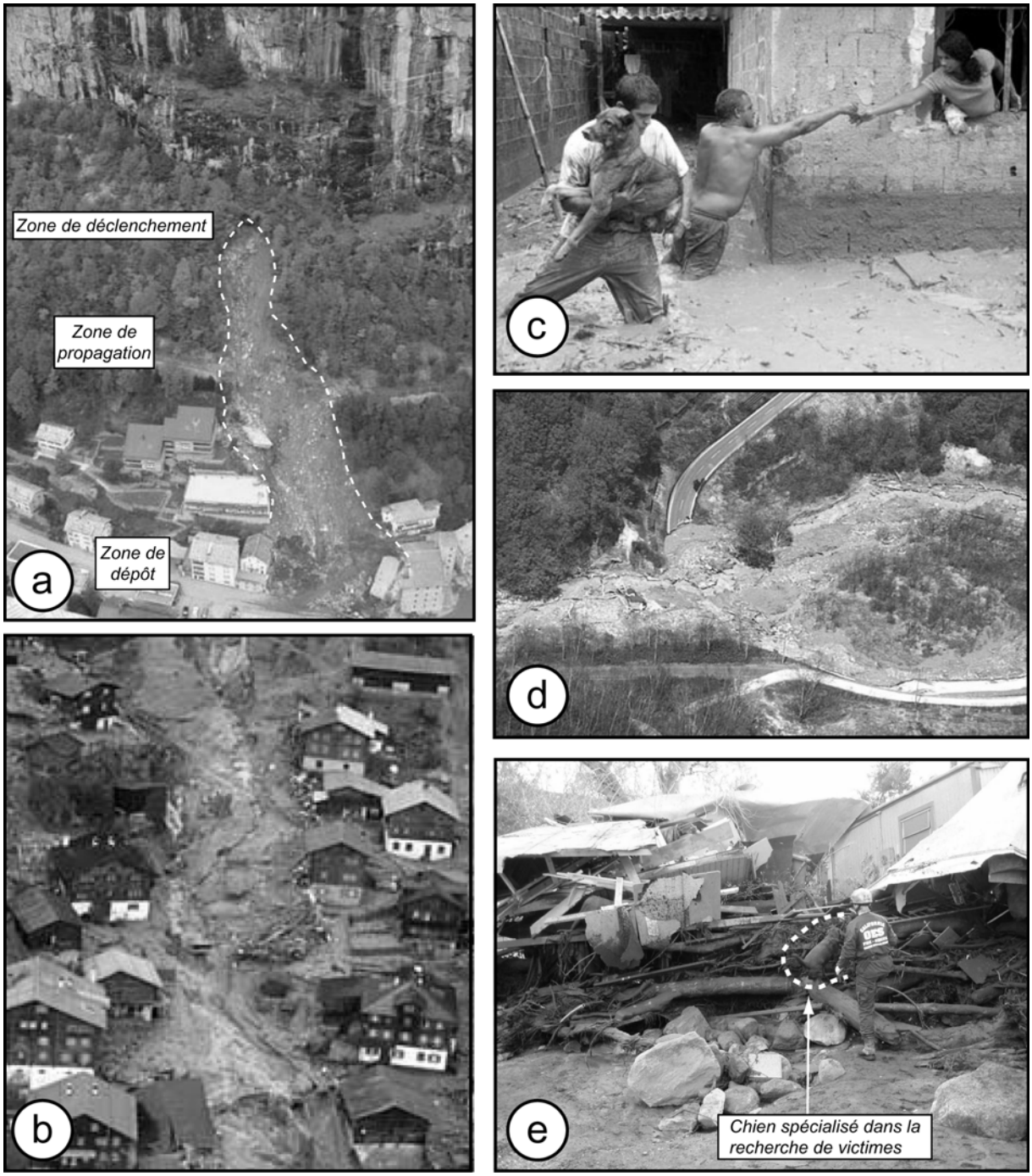


Figure AP.1 *: Mouvements de terrain rapides catastrophiques et dégâts associés.*

a : Coulée de boue de l'ovaille de Gondo (Valais, Suisse) en 2000 ;
b : Lave torrentielle de Schlans (Grisons, Suisse) en 2000 ;
c : Des habitants de Angra dos Reis (Rio, Brésil) surpris par une coulée de boue en 2002 ;
d : Route coupée par la lave torrentielle de Hashi (Japon) en 2004 ;
e : Une équipe sinophile américaine à la recherche de survivants après les laves torrentielles meurtrières dans l'état de Miranda au Venezuela en 1999.

Au Brésil, les coulées de boues de *Pétropolis* (1998) et d'*Angra dos Reis* (2000) (Fig. AP.1c) ont entraîné la mort de plus de 10 000 personnes. En 2000, la coulée de boue de *l'ovaille de Gondo* (Valais, Suisse) a fait près d'une dizaine de victimes (Fig. AP.1a). La même année, les laves torrentielles de *Schlans* (Suisse) ont entraîné la destruction d'une partie du village et le décès d'une dizaine d'habitants (Fig. AP.1b). En 2001, l'état de *Miranda* au Venezuela a

été ravagé par des laves torrentielles particulièrement meurtrières causant la mort de près de 15 000 victimes (Fig. AP.1e) (Perez, 2001).

En France, en 1248, l'effondrement d'une partie du flanc Nord du *Mont Granier* en Savoie (France) a entraîné la destruction de cinq villages et la mort de 2 000 à 5 000 personnes. En 1930, les crues torrentielles du *Tarn* ont provoqué la mort de 200 personnes et 20 000 personnes sinistrées (Ledoux, 1995). En 1970, 72 personnes sont mortes dans un sanatorium du plateau *d'Assy* (France) suite à des coulées de boue. Les crues et les laves torrentielles du 14 Juillet 1987 au *Grand Bornand* ont ravagé un camping et 23 victimes y furent dénombrées.

Près de **7 000 communes françaises** sont concernées par le **risque 'mouvement de terrain'**, dont un tiers avec un niveau de gravité fort vis-à-vis des populations (Bourrelier, 1997). Sur ces 7 000 communes, **4 500** sont exposées à des **risques liés aux activités torrentielles**. Situées généralement en zones de moyenne ou de haute montagne, ces communes sont menacées par des instabilités de versants (éboulements, glissements, coulées) et par une activité torrentielle (crues et laves torrentielles). D'autres communes, localisées dans des zones de plaines ou de plateaux, sont menacées par des instabilités liées à l'exploitation ou à la dissolution du sous-sol (Maquaire, 2005).

Les coûts des mouvements de terrain aux Etats-Unis, au Japon, dans les régions alpines (Autriche, France, Italie et Suisse) et en Inde sont sensiblement similaires (1 à 5 Milliards d'Euro par an) bien qu'il soit probable que les coûts actuels soient plus élevés au Japon. D'après Aleotti et Chowdhury (1999), en Italie, dans les 45 dernières années, les catastrophes naturelles provoquent des dommages dont les coûts sont estimés à 1,8 Milliards d'Euro chaque année et même à 4 Milliards d'Euro durant la décennie 1980 (Catenacci, 1992). Dans les pays en voie de développement, ces catastrophes peuvent ralentir considérablement l'économie de la région, ainsi les dommages liés aux mouvements de terrain atteignent 1-2 % du produit national brut.

La sensibilité sociale aux risques naturels (mais aussi technologiques et sociétaux) s'est accrue sous l'effet d'une pression démographique et économique constante, et de la mobilité des populations qui ont une confiance excessive dans les systèmes de protection ou d'alerte mis en place (Charlier et Decrop, 1997). Les habitants d'*Armero* en Colombie ont rebâti leurs habitations sur le même site, et les milliers d'habitants établis sur les flancs du *Vésuve* dans la baie de *Naples* (Italie) ne semblent pas s'inquiéter d'une éventuelle éruption catastrophique. De plus en plus, les populations perdent la '*mémoire du risque*'.

La question actuelle est de savoir si le risque '*mouvement de terrain*' est plus élevé aujourd'hui dans nos sociétés qu'hier. Il est difficile d'affirmer que ces phénomènes sont plus nombreux en raison du manque de données historiques fiables sur une longue période. Les archives sont assez disparates et inégales selon les époques et les régions du monde. En France, les archives mentionnent précisément les sinistres liés aux mouvements de terrain depuis seulement quelques décennies. Des informations plus précises et systématiques sont disponibles depuis 1982 en relation avec la loi multirisque (loi n°82-600 du 13 juillet 1982) sur l'organisation de la sécurité civile, la protection de la forêt et la prévention des Risques Naturels et Technologiques majeurs (Toutain, 2001) et en particulier son volet 'indemnisation des Catastrophes Naturelles'. Toutefois, d'après Besson (1996), les déclarations de sinistres ne cessent d'augmenter depuis maintenant près de 20 ans.

Face à la multitude de phénomènes plus ou moins dramatiques se produisant régulièrement, les gouvernements doivent arriver à un consensus sur le niveau de risque accepté qui correspond finalement à un choix politique. Cela doit être compatible avec le maintien du développement économique local et national et avec la demande sociale de protection face à chacun des risques. Le risque « zéro » n'existant pas, les gouvernements peuvent choisir

soit ***le secours et l'indemnisation*** *soit* ***la prévention*** dans le traitement des risques. Mais, ils s'appuient parfois sur les deux. Pour l'indemnisation comme pour la prévention, il existe de grandes différences de choix et de prise en charge dans les différents pays de l'Europe de l'Ouest comme de l'Union Européenne, en général. Le degré de centralisation et les dépenses engagées sont très différents. Certains pays privilégient les actions publiques via les différentes administrations, d'autres ont plutôt recours au secteur privé par les compagnies d'assurances (Maquaire, 2005). Le système français d'assurance a systématisé l'indemnisation des victimes par le biais d'une caisse commune de solidarité alimentée par des cotisations générales, mais n'a paradoxalement pas encouragé les populations à se prévenir du risque (Maquaire, 2002 ; Veyret, 2003).

En 1997, Bourrelier soulignait que le poids économique des risques naturels en France était modéré. En effet, chaque année une somme de 0.8 à 1 milliard d'euros était récoltée par les compagnies d'assurance. Sur cette somme, 700 millions étaient redistribués aux sinistrés. Or, maintenant, la somme consacrée aux indemnisations a fortement augmenté. Le coût est devenu tellement élevé, que les politiques ont pris des mesures pour encourager la prévention au détriment de l'indemnisation à travers la loi dite Barnier du 2 février 1995 qui instaure par le décret n°95-1089 les Plans de Prévention des Risques Naturels prévisibles et qui se substitue à l'ensemble des dispositions précédentes. Ceci s'est traduit également par une augmentation significative des franchises d'assurance (multipliée par deux ou par trois) dans les communes déjà sinistrées et déclarées '*Catastrophes Naturelles'*. et le renforcement de l'information des populations (loi dite Bachelot de 2003 par exemple).

Il existe ainsi une forte demande sociale pour la définition et la prévention de ces risques naturels. Cette prévention doit répondre à des objectifs précis : prévision spatiale et temporelle, prise en compte de mesures préventives et gestion de ces risques dans l'aménagement du territoire. Dans cet objectif, les scientifiques ont à fournir des réponses adaptées à la diversité des situations rencontrées, à la fois pour la connaissance des phénomènes (processus, fonctionnement), pour leur cartographie préventive et pour leur modélisation.

Le cadre théorique de l'évaluation et de la gestion du risque '*mouvements de terrain*' ont été essentiellement basés sur les travaux menés par Varnes entre la fin des années 70 et le début des années 80 (Varnes, 1978, 1984). D'autres auteurs ont complété ses travaux, en discutant notamment les définitions d'**aléas**, de **vulnérabilité** et de **risque,** comme par exemple et sans être exhaustif, Einstein, 1988 ; Antoine et Giraud, 1992 ; Fell, 1994 ; Flageollet, 1996 ; Fell & Hartford, 1996 ; Leroi, 1996 ; Leone *et al.*, 1996 ; Morgenstern, 1997 ; Petraschek & Kienholtz, 2003.

L'évaluation de l'aléa '*mouvement de terrain*' vise à mieux comprendre les processus qui sont à l'origine du déclenchement ou de la réactivation de ces mouvements, en tentant de cerner le rôle respectif des facteurs *prédisposants (ou de prédisposition)* et des facteurs *déclenchants* (Almeida-Teixeira *et al.*, 1991 ; Casale et Margottini, 1999 ; Dikau, 1999, 2004 ; Dikau *et al.,* 1996a ; Dikau *et al*., 1996b ; Flageollet, 1988, 1995). Ceci revient à caractériser le fonctionnement général d'un site potentiellement instable, en tentant de répondre à la question : quels sont la nature et le niveau d'aléa redoutés dans tel ou tel secteur ? Formulé autrement, la prévention des aléas '*mouvements de terrain*' implique que ces phénomènes soient caractérisés par une *intensité, une occurrence spatiale et une occurrence temporelle*, en répondant au moins à ces quatre questions : **où, quand, comment et pourquoi le phénomène se produira ?** La figure AP.2. synthétise ce cadre théorique d'évaluation et de gestion des mouvements de terrain.

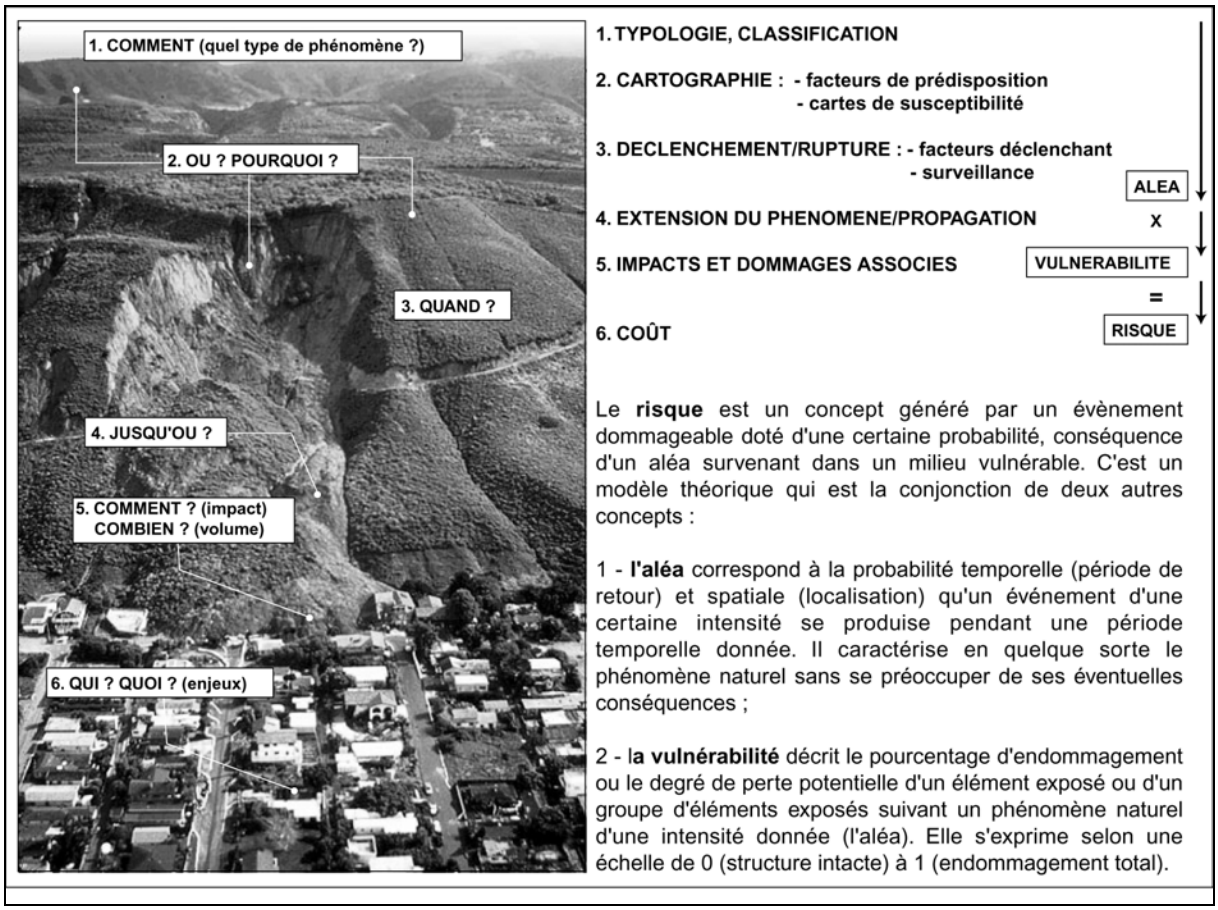


Figure AP.2 *: Les différentes composantes du risque illustrées par le glissement de La Conchita, Californie, Etats-Unis, modifiée de Leroi (1996) et Malet (2003). Les notions de risque, aléa et vulnérabilité sont définies par Varnes (1978).*

C'est dans ce cadre de la prévention des risques naturels que s'inscrivent les recherches menées dans ce travail. Elles s'intéressent **a**ux risques liés aux **'*laves torrentielles*'**, et plus particulièrement à **l'étude de cet aléa** dans un bassin à risque, **le bassin de *Barcelonnette*,** situé dans les *Alpes-de-Haute-Provence*.

1ERE PARTIE : ACTIVITE TORRENTIELLE : DU BASSIN DE 'RISQUE' AU BASSIN VERSANT

La ***première partie*** dresse en premier lieu un état de l'art des connaissances actuelles sur les laves torrentielles, puis présente les caractéristiques du bassin de risque torrentiel (bassin de *Barcelonnette*) et son activité torrentielle en liaison avec les conditions météo-climatiques et, enfin décrit quatre torrents en particulier qui ont connu des événements torrentiels lors de ces dix dernières années.

Le ***premier chapitre*** présente la problématique générale et expose la méthodologie utilisée. Ainsi, la terminologie des mouvements de terrain de type écoulement et plus particulièrement des '*laves torrentielles*' est présentée, en évoquant les caractéristiques morphologiques de ces écoulements (mécanismes et zones de déclenchement, propagation et dépôts). Ce chapitre discute le point des connaissances actuelles et les besoins de recherche associés. Les entités fonctionnelles d'une lave torrentielles, la relation entre l'occurrence de tels évènements et leur bassin versant sont décrites et discutées en s'appuyant sur des références essentiellement européennes et nord-américaine décrivant des évènements de type lave torrentielle. Un bilan des connaissances sur le comportement des laves torrentielles (rhéologie) est ensuite présenté, les différentes approches sont discutées. Puis, un état de l'art des modèles de propagation et d'étalement de laves torrentielles est présenté, en insistant sur leur domaine de validité, leur applicabilité et les orientations futures des outils numériques. Enfin, la méthodologie utilisée dans ce travail est exposée point par point, pour les trois phases de la lave.

Le ***deuxième chapitre*** expose les grands traits morphologiques (aspects géographiques, contexte structural, héritage glaciaire, etc.), l'historique de l'activité torrentielle et les caractéristiques climatiques (traits généraux et spécificités du climat *ubayen*) du bassin de *Barcelonnette.* L'activité torrentielle est analysée en confrontant l'historique des évènements (répartition temporelle et spatiale) aux séries météo-climatiques associées (précipitations annuelles, mensuelles, journalières). Enfin, pour comprendre pourquoi certains torrents sont plus actifs que d'autres, les caractéristiques morphologiques et morphométriques de plusieurs bassins versants torrentiels sont confrontées.

Le ***troisième chapitre*** décrit plus précisément les caractéristiques géographiques, morphologiques des sites de recherches (les torrents de *Faucon*, site principal et les torrents de l'*Abeous*, du *Bourget* et des *Sanières*), les enjeux socio-économiques menacés par les écoulements de laves torrentielles sont évoqués et discutés. La présentation des sites d'études et la description d'événements torrentiels survenus dans ces sites (essentiellement en termes de dégâts associés) sont successivement abordées.

Chapitre 1 : 'LES LAVES TORRENTIELLES' : MORPHOLOGIE, CINEMATIQUE ET MODELES

Les phénomènes d'écoulements gravitaires désignent un mélange d'eau, de sédiments et de débris se déplaçant sous la forme d'écoulement sur une pente naturelle en zone de montagne. Dans la littérature, ces écoulements gravitaires peuvent prendre le nom de crue, de transport solide, de lave torrentielle, de coulée de débris, d'avalanche de débris, de glissement-coulée, de lahar, etc.

Dans certains cas, il est très difficile pour un gestionnaire ou pour un scientifique de distinguer, avec rigueur et précision, un phénomène d'un autre. Ce chapitre est donc consacré au rappel des phénomènes d'écoulements de ***'laves torrentielles'***, expression française traduisant le terme anglo-saxon de '***debris flows'*** ou de ***'mudflows'***. L'étude et la compréhension des laves torrentielles requièrent à la fois un vocabulaire spécifique et adapté, et une approche multidisciplinaire liée à l'extraordinaire variété des processus et des mécanismes contrôlant leur déclenchement, leur propagation et leur dépôt.

Une bonne connaissance de ces écoulements est fondamentale afin d'améliorer les techniques de protection jusqu'ici grandement empiriques. La compréhension de l'aléa et la gestion du risque '*lave torrentielle*' nécessitent d'agir à tous les niveaux, du déclenchement au dépôt, en utilisant les compétences du mécanicien des fluides, de l'ingénieur géotechnicien, du géo(morpho)logue, du géographe, de l'économiste et de l'aménageur.

Les laves torrentielles ont été identifiées et étudiées par de nombreux chercheurs depuis maintenant plusieurs dizaines d'années (Tricart, 1957, 1958, 1960 ; Takahashi, 1978, 1981 ; Costa, 1984 ; Johnson et Rodine, 1984 ; Davies, 1986 ; Pierson, 1986 ; van Steijn *et al.*, 1988 ; Suwa, 1989 ; Meunier, 1991 ; Coussot et Meunier, 1996 ; Iverson, 1997a, 2003, Reid *et al.*, 1997 ; Cojean et Bonnet-Staub, 1998 ; Evans *et al.*, 2001, Johnson, 2003 ; Malet *et al.*, 2004a). Ces études ont concerné tout un ensemble de points spécifiques : les observations *in situ*, les caractéristiques rhéologiques des écoulements, les situations de déclenchement d'un point de vue météo-climatique et géomorphologique, la composition granulométrique des matériaux, etc. Néanmoins, les divergences de vocabulaire et des définitions dans la littérature, rendent complexes les transferts et les échanges d'information de l'expert au gestionnaire, mais aussi entre des experts de disciplines différentes. Par exemple, des géologues utilisent des termes différents pour qualifier un seul et même événement (Innes, 1983).

Ce constat incite à clarifier au plus tôt la définition des phénomènes (morphologie, comportement, mécanismes de déclenchement, modèles de comportement, etc.) par un état de l'art sur l'étude des laves torrentielles pour faire :

- ressortir les questionnements scientifiques soulevés par l'étude de ces écoulements ;
- identifier clairement les besoins de recherche, et ;
- proposer une méthode d'analyse de l'aléa adaptée.

1.1. Concepts et classification des écoulements de masse dans les zones montagneuses et place des laves torrentielles

'Les 'laves torrentielles' sont des volumes importants (de quelques m^3 jusqu'à plusieurs millions de m^3) d'un ***mélange*** *d'eau, de sédiments (jusqu'à plusieurs mètres de diamètre) et de matières organiques,* ***fortement concentré*** *(entre 45 et 80% en volume de fraction solide dans l'écoulement) s'écoulant dans les torrents de montagne'* (Coussot, 1996).

'*Ce mélange de sols saturés en eau, de roches et de débris divers va s'écouler à des vitesses plus ou moins élevées dans le chenal torrentiel' (*Swantson et Swanson, 1976).

Classiquement, on distingue les laves torrentielles **à matrice granulaire** (pauvres en matériaux fins, riches en matériaux sableux et graveleux) des laves **à matrice cohésive ou boueuse** (riches en matériaux limono-argileux). Le cas particulier des lahars qui concernent les milieux volcaniques (Pierson, 1985 ; Lavigne, 2000, 2004 ; Lavigne *et al.*, 2000 ; Thouret, 2002) ne sera pas évoqué dans ce travail.

1.1.1. Où se situent les écoulements torrentiels par rapport aux mouvements de terrain ?

La description des écoulements torrentiels et leur classification au sein des autres mouvements de terrain ont fait l'objet de nombreux travaux (Beverage et Culbertson, 1964 ; Varnes, 1978 ; Hansen, 1984 ; Bradley et McCutcheon, 1985 ; Pierson et Costa, 1987 ; Sheko, 1988 ; Coussot, 1993 ; Richard, 1995 ; Coussot et Meunier, 1996 ; Bonnet-Staub, 1999 ; Hungr *et al.*, 2001, etc.). Dans ces travaux, les critères de description et de distinction entre les différents phénomènes varient d'un auteur à l'autre. Citons entre autres : le mécanisme de déclenchement, les caractéristiques du bassin versant, la composition granulométrique, la concentration volumique solide, la rugosité du lit, la vitesse de propagation, la pente du lit, la durée de l'épisode, le comportement du matériau, etc.

Bradley et McCutcheon (1985) expliquent que les classifications existantes se contredisent parfois quand elles sont basées uniquement sur des critères quantitatifs comme la vitesse ou la fraction solide. Les classifications basées sur la micro-structure des matériaux ou sur les caractéristiques rhéophysiques de l'écoulement sont bien souvent difficiles à appliquer dans la pratique, car elles nécessitent la connaissance de données spécifiques, rarement recueillies par les autorités compétentes après un événement. C'est le cas de la classification de Pierson et Costa (1987) qui nécessite la définition d'un taux de déformation (exprimée par une vitesse moyenne).

Ainsi, des termes différents sont utilisés pour décrire un seul et même phénomène, rendant plus complexe les échanges entre les différentes communautés scientifiques concernées. Les critères de description employés dans ce travail reprennent en partie la classification de Varnes (1978) (Tab. 1.1) et de Hungr *et al.* (2001) qui associent des informations sur le mode de déplacement (chute, basculement, glissement, extension latérale, écoulement, complexe ; *fall, topple, slide, spread, flow, complex*) et le type de matériau mobilisé (roche, débris ou matériel grossier, sol ou matériel fin ; *rock, debris, earth*). La catégorie '*complexe*' regroupe des mouvements de terrain qui associent deux ou plusieurs modes de déplacement. C'est notamment le cas des glissements-coulées (*earthflow*) qui se déclenchent comme un glissement de terrain mais connaissent ensuite un déplacement sous la forme d'un écoulement plus ou moins rapide (Colas et Locat, 1993 ; Malet, 2003).

Tableau 1.1 : *Classification des mouvements de terrain selon le type de mouvement et le type de matériau concerné (Varnes, 1978).*

<table>
<tr><th colspan="3" rowspan="3">Type of movement</th><th colspan="3">Type of material</th></tr>
<tr><th rowspan="2">Bedrock</th><th colspan="2">Engineering soils</th></tr>
<tr><th>Coarse</th><th>Fine</th></tr>
<tr><td colspan="3">Falls</td><td>Rock fall</td><td>Debris fall</td><td>Earth fall</td></tr>
<tr><td colspan="3">Topples</td><td>Rock topple</td><td>Debris topple</td><td>Earth topple</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Slides</td><td>Rotational</td><td rowspan="2">Few units</td><td>Rock slump</td><td>Debris slump</td><td>Earth slump</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Translational</td><td rowspan="2">Rock block slide
Rock slide</td><td rowspan="2">Debris block slide
Debris slide</td><td rowspan="2">Earth block slide
Earth slide</td></tr>
<tr><td>Many units</td></tr>
<tr><td colspan="3">Lateral spreads</td><td>Rock spread</td><td>Debris spread</td><td>Earth spread</td></tr>
<tr><td colspan="3" rowspan="2">Flows</td><td rowspan="2">Rock flow
(deep creep)</td><td>Debris flow</td><td>Earthflow</td></tr>
<tr><td colspan="2">(soil creep)</td></tr>
<tr><td colspan="6">Complex combination of two or more principal types of movement</td></tr>
</table>

Maquaire (2002) évoque les compléments et les précisions apportés à la nomenclature de Varnes (1984) à l'aide de différents critères comme : *l'état d'activité* (actif, en suspens, réactivé, inactif, Dikau *et al.*, 1996a), *le type d'activité* ou *la morphologie* (simple, complexe, composite, emboîté, multiple, Cruden et Varnes, 1996), *la vitesse de déplacement* (extrêmement lente, très lente, modérée, rapide ; très rapide, extrêmement rapide, Cruden et Varnes, 1996), *les matériaux affectés* et leur comportement géotechnique (Sassa, 1985) et *la proportion relative d'eau et des matériaux solides* dans la masse en mouvement (Meunier, 1991, 1994).

Maquaire (2002) souligne que dés que l'on s'intéresse à l'évaluation de l'aléa ou du risque mouvement de terrain, il est préférable de considérer **la vitesse de déplacement comme critère de classification**. La vitesse des mouvements de terrain intervient directement dans l'appréciation du niveau de vulnérabilité. Cette dernière augmente avec la vitesse car un mouvement extrêmement rapide, quelque soit son volume, entraîne un plus grand nombre de morts ou de dégâts qu'un mouvement lent. Cette vitesse de déplacement traduit donc bien l'ampleur ou la gravité d'un phénomène et donc, indirectement le niveau d'aléa et de risque, car elle offre ou non la possibilité à l'homme de s'en échapper lorsque le phénomène se déclenche et se propage (Flageollet, 1988). C'est d'ailleurs selon ce critère que les mouvements de terrain sont distingués dans le guide « PPR mouvements de terrain » (Collectif, 1999).

Ainsi, selon la vitesse de déplacement, deux ensembles peuvent être distingués : les ***mouvements lents***, pour lesquels la déformation est progressive avec ou sans rupture, mais en principe sans accélération brutale. Ces mouvements peuvent être surveillés et contrôlés, et ne menacent pas directement la sécurité des personnes. Les ***mouvements rapides*** peuvent comporter des accélérations brutales. Ils sont scindés en deux groupes, selon le mode de propagation des matériaux, en masse ou à l'état remanié.

Pour les *mouvements lents*, on peut distinguer :

- les glissements rotationnels, translationnels*, etc. (rotationnal slide, translationnal slide, etc.*) qui correspondent au déplacement en masse, le long d'une surface de rupture circulaire, curviligne, plane ou complexe, de sols cohérents (marnes ou argiles) ;
- les basculements (*topple*) de roche, de débris ou de sol ;
- l'affaissement (*subsidence*), déformation lente en surface avec ou sans fractures due à l'évolution de cavités naturelles ou artificielles (carrières souterraines ou mines -fer, sel, charbon, etc.-), des dépressions circulaires ou ovales apparaissent en surface ;

- le tassement (*sinking*) par consolidation de terrains compressibles (vases, tourbes, …) ;
- le retrait-gonflement (*shrinking-swelling*) de formations argileuses en fonction de la teneur en eau ;
- la solifluxion (*creeping*) de matériaux plastiques sur faible pente.

Pour les *mouvements rapides et brutaux*, on peut distinguer deux sous-groupes, selon le mode de propagation des matériaux, *en masse* ou à *l'état remanié*. Le premier groupe comprend :

- les effondrements (*brutal subsidence*) qui résultent de la rupture brutale de voûtes de cavités souterraines naturelles ou artificielles ;
- les chutes de pierres ou de blocs (*fall*) provenant de l'évolution mécanique de falaises ou d'escarpements rocheux très fracturés ;
- les éboulements et écroulements (*rockfall*) de pans de falaises ou d'escarpements rocheux selon des plans de discontinuité préexistants ;
- certains glissements rocheux (*rock slide*).

Le second groupe comprend :

- les laves torrentielles (*channelized debris-flow*) qui résultent du transport de matériaux à l'état remanié en coulées visqueuses ou fluides dans le lit de torrents de montagne ;
- les coulées boueuses *(mudflow, mudslide)*, qui proviennent généralement de l'évolution du front des glissements. Leur mode de propagation est intermédiaire entre le déplacement en masse et le transport fluide ou visqueux.

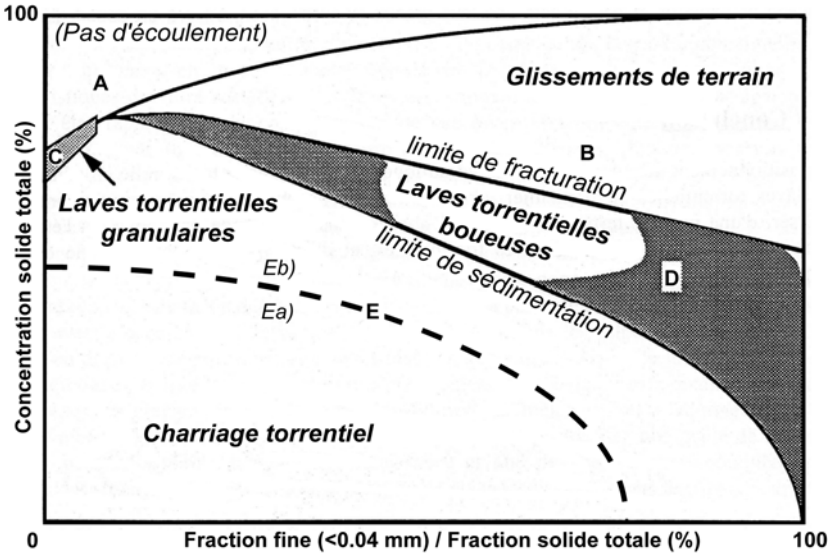


Figure 1.1 *: Classification des écoulements naturels saturés sur forte pente selon la composition granulométrique de l'écoulement et la concentration solide totale (Coussot, 1993).*

Zone A : (pas d'écoulement) faible fraction de particules très fines et forte concentration solide totale ;
Zone B : (glissements de terrain) grande fraction de particules très fines et forte concentration solide ;
Zone C : (laves torrentielles granulaires) fraction de particules très fines très faible et saturation en eau ;
Zone D : (laves torrentielles boueuses) fraction de particules très fines moyenne et concentration solide importante ;
Zone E (charriage torrentiel) fraction de particules très fines moyenne ou faible et concentration solide faible. Dans la zone Ea, la concentration solide totale est trop faible pour qu'une évolution vers une lave soit possible. Le mélange conserve ses caractéristiques ou dégénère en écoulement hyperconcentré (Meunier, 1991). Dans la zone Eb, les écoulements sont suffisamment concentrés pour que l'on ait une évolution probable de l'écoulement vers une lave granulaire ou boueuse, s'il y a un apport d'énergie suffisant.

Les laves torrentielles sont un type particulier de mouvements de terrain et occupent une place à part. Dans la classification proposée par Coussot (Fig. 1.1), l'auteur tient compte de la composition granulométrique de l'écoulement et de la concentration volumique solide totale pour distinguer les différents types d'écoulements naturels. Les laves torrentielles occupent une place différente en fonction de leur composition granulométrique. Les laves torrentielles boueuses (D) se situent entre la limite de sédimentation et la limite de fracturation, à l'interface entre les glissements de terrain (B) et le charriage torrentiel (E). Les laves torrentielles granulaires (C) occupent une place beaucoup plus restreinte, entre le charriage torrentiel (E) et l'absence d'écoulement (A).

Comme le souligne Meunier (1991) et Coussot (1993) les conditions de formation d'une lave torrentielle granulaire sont plus rares car leur domaine (en termes de granulométrie et de concentration solide totale) est beaucoup moins étendu que celui des laves torrentielles boueuses. Sur la figure 1.1, la contiguïté entre les laves torrentielles boueuses et les glissements de terrains montre en réalité qu'un glissement de terrain peut se transformer en laves torrentielles par fluidification de la masse glissée (Iverson *et al.*, 1997 ; Malet *et al.*, 2003a, 2004b, 2005).

Dans la classification de Meunier (1991), selon le type de matériau concerné (cohésif ou granulaire) et la teneur en eau, les laves torrentielles se situent à l'interface de l'écoulement hyperconcentré d'une part et du glissement de terrain (axe des matériaux cohésifs), de la chute de blocs et de l'écroulement (axe des matériaux granulaires) d'autre part.

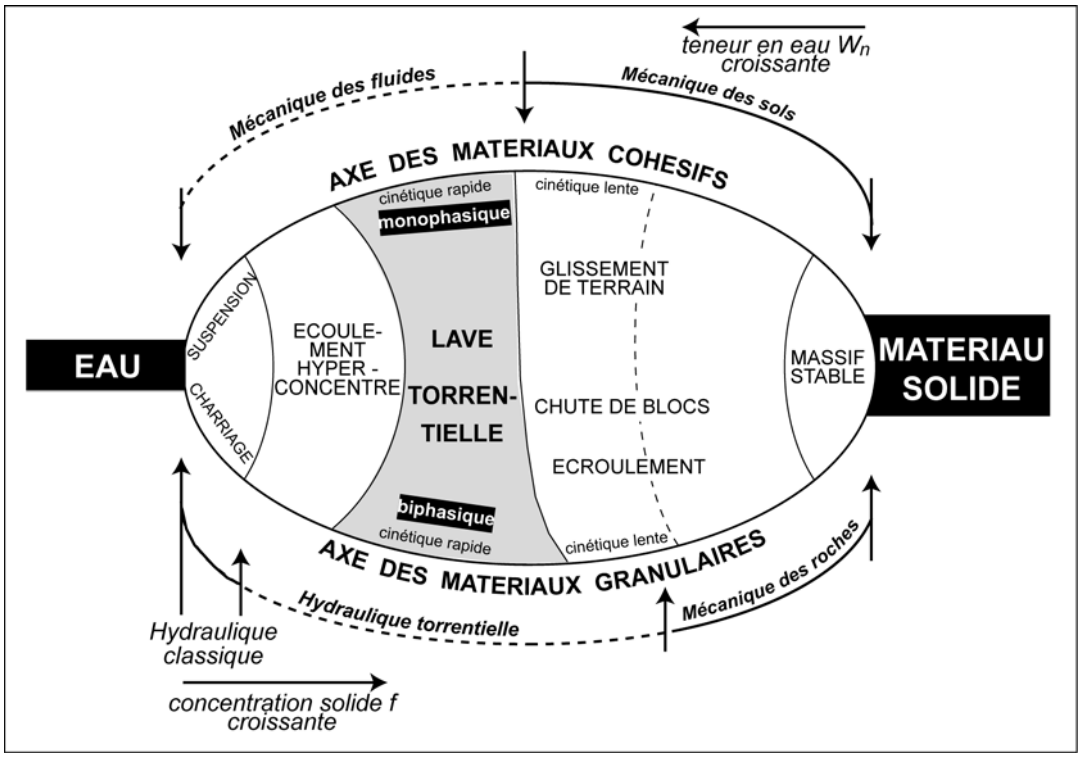


Figure 1.2 *: Classification des mouvements de terrain selon le type de matériau concerné et la teneur en eau (Meunier, 1991).*

En partant du pôle ***'eau'*** (Fig. 1.2), le scientifique tentera de déterminer à partir de quelle charge solide, le matériau solide transporté modifie la loi de comportement du mélange et influe sur la hauteur de l'écoulement. Autrement dit, à partir d'une certaine limite de concentration solide, la façon de procéder 'classiquement' (équations de l'eau, hydraulique fluviale) n'est plus possible. En augmentant la charge solide au sein de l'écoulement, on passe progressivement à l'hydraulique fluviale (charriage, suspension), puis à l'écoulement hyper-concentré et enfin aux laves torrentielles.

Si l'on part maintenant du pôle ***'matériau solide'***, on étudie à partir de quelle teneur en eau un mouvement peut se déclencher. La problématique scientifique consiste à étudier la rupture et les conditions de stabilité des terrains. On cherche à déterminer à partir de quelle(s) limite(s) (relativement méconnue(s)) un écoulement ou un mouvement de terrain (glissement, éboulement, écroulement) pourrait se transformer en lave torrentielle ; c'est le domaine de l'hydraulique torrentielle (Meunier, 1991).

Ces deux approches (pôle eau, pôle matériau solide) illustrent parfaitement la complexité des écoulements torrentiels et posent le problème de leur déclenchement qui peut intervenir soit par un enrichissement progressif en matériau solide d'un écoulement d'eau (pôle eau vers pôle matériau solide), soit par une saturation en eau progressive d'un matériau solide (pôle matériau solide vers pôle eau).

Les différentes classifications montrent en tout cas que les rapports entre les écoulements torrentiels et les mouvements de terrain sont étroits.

1.1.2. Typologie des écoulements torrentiels

Les écoulements torrentiels se différencient des écoulements fluviaux par la charge solide transportée. Deux grandes familles d'écoulements torrentiels peuvent être distinguées :

La **'lave torrentielle'** (Fig. 1.3a), terme employé pour la première fois par Schlumberger au 19ème siècle, désigne tout un ensemble de phénomènes d'écoulements divers et variés (coulée de boue, avalanche de débris, lahars, etc.) dont la particularité est de former un mélange très concentré (ϕ > 0.50) d'eau et de particules solides s'écoulant à des vitesses élevées (de l'ordre du m.s^{-1}) et survenant dans un torrent de montagne après de longues et/ou fortes pluies (Johnson, 1984). Du point de vue du mécanicien des fluides, les laves torrentielles sont un écoulement transitoire par bouffées (succession de vagues de lave) capable de transporter des gros blocs en surface et sur le front des bouffées (Suwa et Okuda, 1983 ; Meunier, 1991).

Les ***laves torrentielles à matrice boueuse*** (*à dominante argileuse*, ou encore *cohésive*) ont une apparence d'écoulement monophasique, les ***laves torrentielles à matrice granulaire*** sont biphasiques car les deux phases, solide et liquide, sont fortement dissociées (Meunier, 1991).

Certains auteurs incluent la matière organique dans les éléments de base des laves torrentielles, comme Hungr *et al.* (1987) qui trouvent des pourcentages de matières organiques au sein des dépôts de laves torrentielles supérieures à 6%. Cette matière organique est constituée principalement de troncs d'arbres et de branches broyées.

L'**'écoulement hyperconcentré'** (Fig. 1.3b) désigne une catégorie d'écoulement où la charge solide guide la loi de comportement de l'ensemble de l'écoulement. Dans ce cas, l'écoulement n'est plus newtonien comme dans le domaine de l'hydraulique fluviale, la hauteur de l'écoulement n'est plus assimilable à la hauteur d'eau, et le débit irrégulier est associé à une augmentation de la capacité de transport. Ces écoulements peuvent concerner aussi bien des matériaux fins (Li et Yuan, 1983) que des matériaux granulaires (Smart et Jaeggi, 1983). Ils diffèrent des laves torrentielles sur plusieurs points : il n'y a pas de front, la taille des éléments grossiers n'excèdent pas quelques centimètres.

Contrairement aux *coulées de débris* qui peuvent se déclencher en tout endroit d'un versant (Fig. 1.3c), les laves torrentielles et les écoulements hyperconcentrés se répètent toujours dans un chenal torrentiel. Ce chenal va être creusé, rempli, remodelé au fur et à mesure des événements torrentiels.

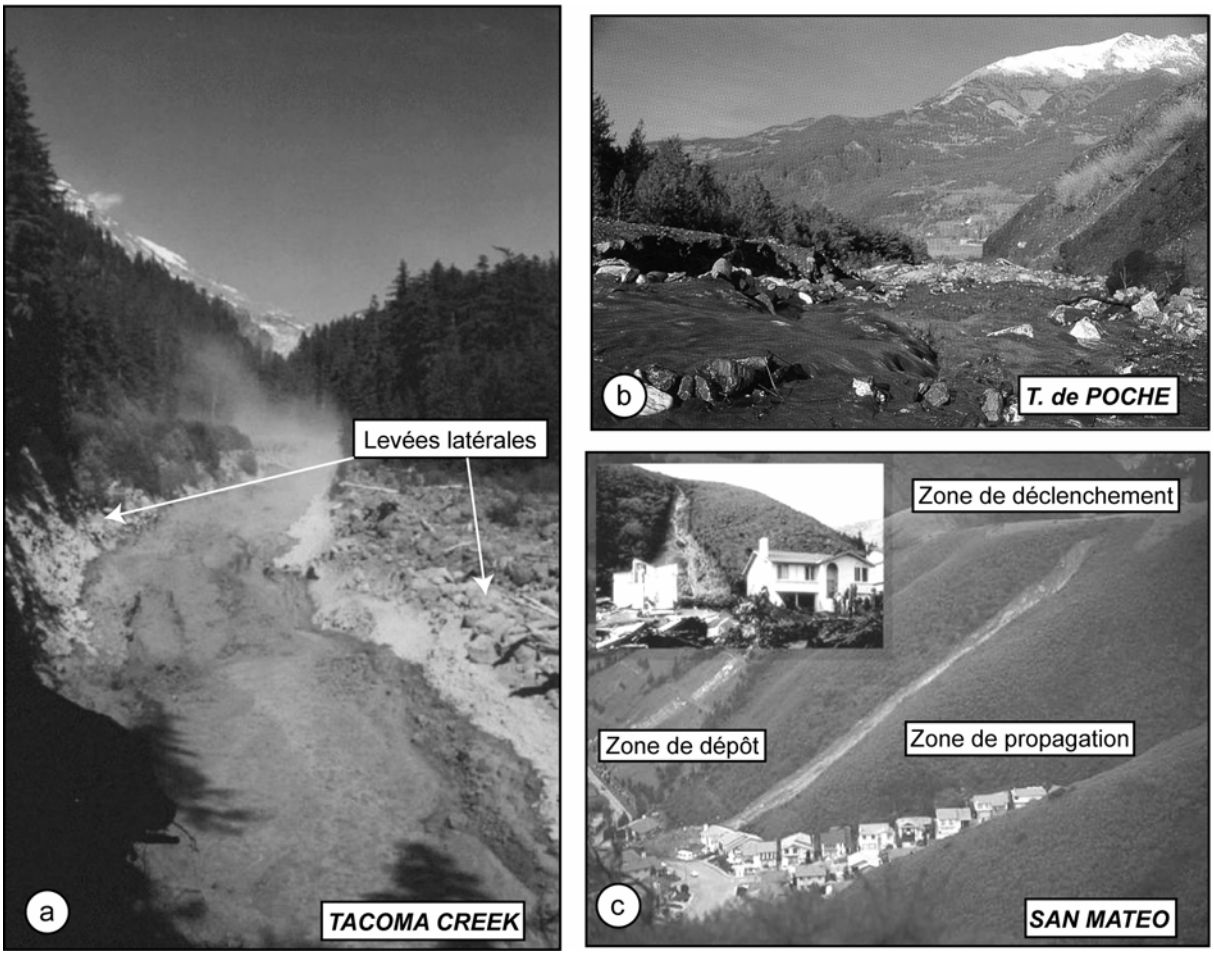


Figure 1.3 : *Les écoulements de masse rapides à très rapides.*

a : lave torrentielle à Tacoma Creek (Mt Rainier, Juillet 1988) ;
b : crue torrentielle et écoulements hyperconcentrés dans le torrent de Poche, Alpes-de-Haute-Provence (Sivan, 2000) ;
c : coulée de débris sur une pente rectiligne et un terrain homogène (Cannon et Ellen, 1985).

La terminologie adoptée pour parler de ces écoulements dans la littérature reste floue et vague. Cela contribue notamment à rendre difficile l'exploitation des documents d'archives, où les expressions *coulées boueuses*, *crues torrentielles* et *coulées de terre* apparaissent souvent, sans précisions supplémentaires. Néanmoins, dans tous les cas, l'écoulement type '*laves torrentielles*' se forme **lorsque l'alimentation en matériaux permet un mélange plus ou moins homogène**. Ainsi, pour qu'une lave torrentielle se forme, il faut que des matériaux soient disponibles. Or cette disponibilité est différente en fonction des conditions climatiques locales, mais aussi et surtout, en fonction de la géomorphologie du bassin torrentiel. Certaines lithologies et/ou formations superficielles, essentiellement les roches meubles et/ou tectonisées (éboulis, schistes argileux, calcaires marneux, marnes, etc.) sont plus sensibles que d'autres à l'érosion, et sont favorables au déclenchement de laves torrentielles (D'Agostino, 1996, Rolland, 1998).

Les laves torrentielles apparaissent donc comme **un phénomène intermédiaire** entre les crues torrentielles et les glissements de terrain. Néanmoins, des différences importantes existent entre ces phénomènes, représentées pour la plupart par des seuils pour certaines caractéristiques : teneur en eau, vitesse de déplacement, morphologie des dépôts, répétitivité spatiale et temporelle, etc. A la suite de ces brèves définitions, replacées dans le contexte général des classifications des mouvements de terrain, il convient de présenter maintenant en détail les conditions et les types de mécanismes de déclenchement, la cinématique et la morphologie des laves torrentielles.

1.2. Caractéristiques des laves torrentielles et éléments de définition

1.2.1. Les caractéristiques générales des laves torrentielles

De nombreuses laves torrentielles ont été décrites dans la littérature, mais malgré leur fréquence, **rares sont les observations directes et *in situ* au moment de l'événement** (Genevois *et al.*, 2001 ; Marchi *et al.*, 2002 ; Hürlimann *et al.*, 2003 ; Johnson, 2003). Les différentes observations décrivent plusieurs particularités des laves torrentielles.

Elles se localisent dans **un chenal torrentiel** bien délimité et modelé au fur et à mesure des crues et des laves torrentielles. Elles érodent leur lit par une « mise au gabarit » de celui-ci. Les sections les plus étroites sont rabotées pour permettre le passage de la lave torrentielle ; au contraire les sections plus larges sont comblées jusqu'au gabarit. Les **torrents à « lave » présentent des signes d'érosion/dépôt** dans le lit torrentiel et un cône de déjection d'une taille souvent considérable (Benda et Cunda, 1990 ; Sorriso-Valvo *et al.*, 1998 ; Brochot et Marchi, 2000), construit par les dépôts des évènements successifs.

Elles ont l'apparence d'un fluide « monophasique », ou tout au moins homogène du point de vue de l'observateur à une certaine échelle (Richard, 1995). Néanmoins, **l'écoulement d'une lave torrentielle n'est pas uniforme**, il présente un caractère fortement transitoire, par **bouffées successives** (Pierson, 1980 ; Costa, 1987). Lors d'un même événement, ces bouffées peuvent être très nombreuses (jusqu'à une centaine). Dans les Alpes françaises, les observations de laves torrentielles dénotent au plus une demi-douzaine de bouffées par événement (Sauret, 1987). Ces bouffées peuvent être séparées par des écoulements plus fluides (eau chargée, écoulement hyperconcentré). Les délais entre chaque bouffée sont très variables, et fonction de la taille du bassin versant concerné, de la morphologie du profil en long, etc.

D'un point de vue **spatial**, la répartition des teneurs en eau et donc des pressions interstitielles au sein de la masse est très variable du fait de l'hétérogénéité granulométrique induite par les bouffées successives (Iverson, 1997a, 2003). D'un point de vue **temporel**, les teneurs en eau varient au gré de la dilution progressive de l'écoulement quand la charge solide se dépose progressivement. La présence d'un chenal torrentiel bien délimité est important pour transporter l'eau de surface intégrée aux bouffées, maintenir des épaisseurs d'écoulement critiques et faciliter le classement granulométrique (Malet, 2003).

La **capacité de transport des laves torrentielles est énorme**. Elles sont capables de transporter des très gros blocs (volume de plusieurs m^3) qui « flottent » à la surface du fluide. Par rapport aux glissements de terrain, un gradient de vitesse élevé tend à laisser les blocs en surface (granoclassement inverse) et à accumuler les plus gros à proximité du front de la lave et aux marges de l'écoulement (Johnson et Rodine, 1984 ; Berti *et al.*, 1999).

Aucun tri granulométrique n'est observé dans les dépôts de laves torrentielles. Par conséquent, lors des phases de dépôt, les particules les plus grossières ne sont pas abandonnées plus favorablement que les particules de tailles plus modestes (Johnson et Rodine, 1984). Le dépôt s'opère plus généralement par arrêt en masse de l'ensemble d'une coulée ou d'une partie (notamment lors des débordements latéraux), lorsque les conditions (pente, hauteur d'écoulement, teneur en eau, etc.) ne permettent plus son mouvement (Fannin et Rollerson, 1993). Dans la majorité des cas, la crue 'liquide' survenant immédiatement après le passage de la lave torrentielle nettoie en partie le chenal torrentiel en évacuant une partie des dépôts de la lave restés dans le chenal torrentiel.

Pour compléter ces caractéristiques générales des laves torrentielles, l'analyse de leurs dépôts et notamment l'analyse de la répartition granulométrique permettent de distinguer plusieurs entités morphologiques fonctionnelles.

1.2.2. Entités morphologiques fonctionnelles des laves torrentielles

Les laves torrentielles se décomposent en plusieurs entités morphologiques fonctionnelles, elles sont représentées sur la figure 1.4 : le ***front*** constitué des éléments les plus gros, le ***corps*** et la ***queue***.

Quand le front atteint le cône de déjection, le matériau s'étale et la lave s'arrête en formant un lobe très épais quand la résistance frictionnelle du front est suffisante pour ralentir le mouvement fluide des particules plus fines du corps (Major, 1997, 2000 ; Iverson, 1997a, 1997b, 2003).

L'écoulement **par bouffées** résulte (1) de la présence d'un front grossier et d'un gradient de vitesse hétérogène au sein de l'écoulement, (2) des variations de la configuration topographique du chenal torrentiel, et (3) d'une alimentation en matériaux solides supplémentaires pendant la propagation, et/ou de la remise en mouvement d'une lave torrentielle stagnant dans une ravine (Bardou, 2002).

Cet écoulement par bouffées conduit à des pics de débits jusqu'à quarante fois supérieurs aux débits extrêmes de crues fluviales (Hungr, 2000), expliquant entre autre leur formidable force d'impact (Deymier *et al.*, 1994 ; Suwa *et al.*, 2003 ; Zanchetta *et al.*, 2004). Ces observations attestent du **caractère fortement non-linéaire** du phénomène, ainsi que de la rhéologie variable de l'écoulement. Cette variabilité va se retrouver au niveau de la granulométrie.

1.2.3. Granulométrie des laves torrentielles

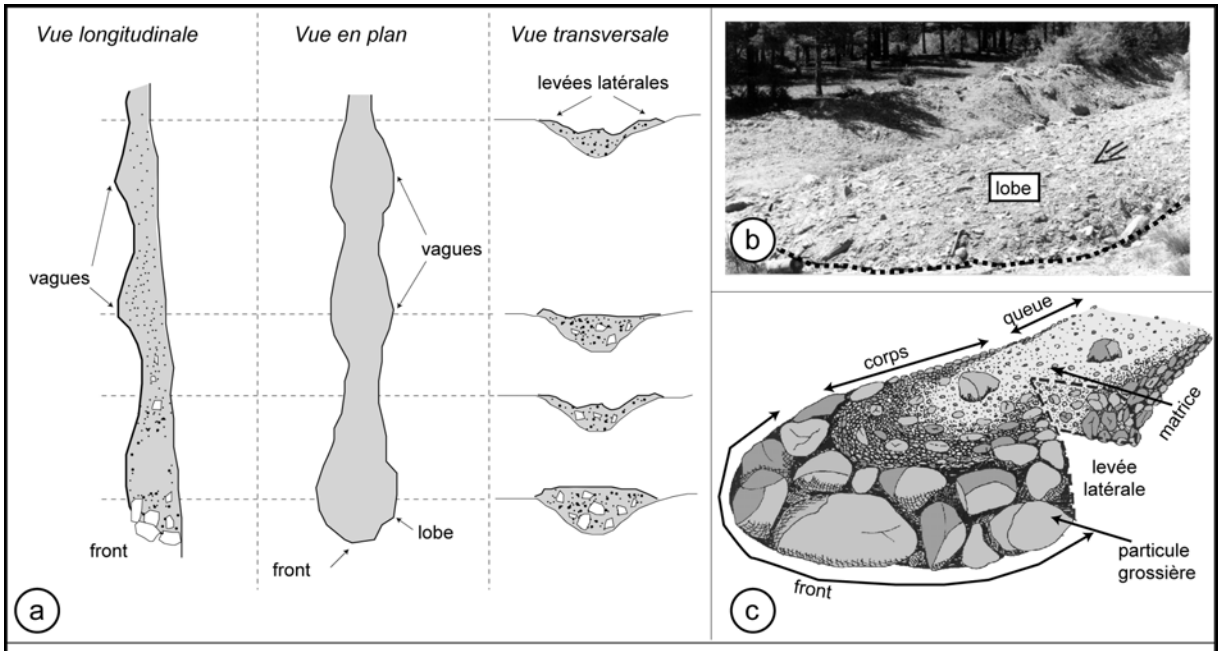
La composition granulométrique typique d'une lave torrentielle s'étend des argiles aux blocs, ces derniers pouvant atteindre des diamètres supérieurs à plusieurs mètres. La distribution granulométrique des dépôts de laves torrentielles va fortement dépendre de la granulométrie des matériaux (roches et formations superficielles) impliqués dans l'écoulement (Bonnet-Staub, 1998). Appréhender la granulométrie d'une lave torrentielle n'est pas toujours simple du fait principalement de l'étendue de son spectre granulométrique (Tacnet *et al.*, 2000 ; Maquaire *et al.*, 2003).

Les classifications des matériaux grossiers (dépôts de mouvements de masse, éboulis, moraines, etc.) sont valables sur des échantillons écrêtés à 2, 10 ou 20 mm. Ceci essentiellement pour faciliter les comparaisons entre des dépôts provenant de bassins versants différents.

Les deux grands types de laves torrentielles se distinguent de par leur texture (Meunier, 1991 ; Bliejenberg, 1998 ; Bonnet-Staub, 1998 ; Ancey, 2001a) :

- **Les laves torrentielles à matrice granulaire** (*granular debris flow*) sont riches en matériaux sableux, gravillonaires et rocheux. Les silts, les limons et les argiles sont présents en très petite quantité. Elles naissent dans des bassins versants ou affleurent principalement des roches cristallines ou métamorphiques peu météorisées, ou bien encore des tabliers d'éboulis vifs. Le déclenchement survient le plus souvent après un écroulement ou un éboulement catastrophique, ou alors par la mobilisation de tabliers d'éboulis (Bliejenberg, 1998) ;

▪ **Les laves torrentielles à matrice boueuse** *(muddy debris flow)* décrivent un écoulement intermédiaire, où les éléments grossiers sont ennoyés dans une matrice riche en éléments fins (Ancey, 2001a). Elles naissent dans des bassins versants ou affleurent principalement des formations schisteuses, argileuses, ou bien encore marneuses.



Les **laves torrentielles** se décomposent en plusieurs **entités morphologiques fonctionnelles** :

Le front, qui comme son nom l'indique se trouve à l'avant de l'écoulement. Il est composé principalement de blocs et des particules les plus grosses. Leur concentration résulte des processus de ségrégation et de migration pendant l'écoulement (Pierson et Costa, 1987). Le front peut être accompagné parfois d'une écume boueuse, qui résulte des chocs provoqués par le roulage et la saltation des plus gros blocs à l'avant du front (Bardou, 2002) ;

Le corps constitue la partie centrale de la lave, représentant la plus grande partie du volume écoulé. La granulométrie est homogène et le matériel, majoritairement fin, est complètement saturé. Le corps de la lave est le dernier à s'écouler du fait de sa saturation complète en eau. De part sa position privilégiée, il est lessivé et évacué par la phase de crue survenant après la lave torrentielle proprement dite ;

Les levées latérales (ou bourrelets) sont constituées de matériaux aux caractéristiques granulométriques proches de ceux du front, avec des éléments grossiers de plus petites tailles. Ces matériaux proviennent du front, dont les pertes viennent s'accumuler progressivement sur les marges, à l'arrière. Les levées surviennent lorsque l'épaisseur sur les marges de la lave torrentielle n'est plus suffisante, ou lorsque l'écoulement n'est plus confiné (étalement sur le cône, super-élévation sur les berges). Elles se déposent parallèlement à l'axe de la lave. Elles sont observables à la suite d'un événement ;

La queue de la lave torrentielle ne peut plus être considérée comme un écoulement de lave torrentielle *stricto-sensu* d'un point de vue rhéologique. En effet, la granulométrie, composée majoritairement d'éléments fins, est semblable à celle d'un écoulement hyper-concentré. La queue érode souvent les derniers dépôts mis en place par le corps et est à l'origine de surfaces d'érosion parfois très importantes.

Figure 1.4 *: Morphologie et entités fonctionnelles d'une lave torrentielle.*

a : profil longitudinal, vue en plan et profil transversal d'une lave torrentielle ; la succession de bouffées successives et les dépôts relatifs sont indiqués (modifiée d'après Johnson et Rodine, 1984) ;
b : photographie d'un lobe de lave torrentielle sur le torrent de Faucon (modifiée de Remaître et al., 2005a) ;
c : les entités fonctionnelles d'une lave torrentielle (modifiée d'après Bardou, 2002).

A partir d'analyses granulométriques pratiquées sur des dépôts de laves torrentielles prélevés dans une douzaine de bassins versants alpins, Bonnet-Staub (1998) a proposé un seuil granulométrique pour distinguer ces deux types de laves torrentielles (Fig. 1.5). Il ressort de ces analyses que **le seuil de 20% d'éléments inférieurs à 50 µm sur la fraction**

inférieure à 20 mm constitue la limite entre les deux. Ainsi, une lave est dite 'granulaire' lorsqu'elle contient moins de 20% de limons et d'argiles ; elle est dite 'boueuse' ou 'cohésive' dans le cas contraire.

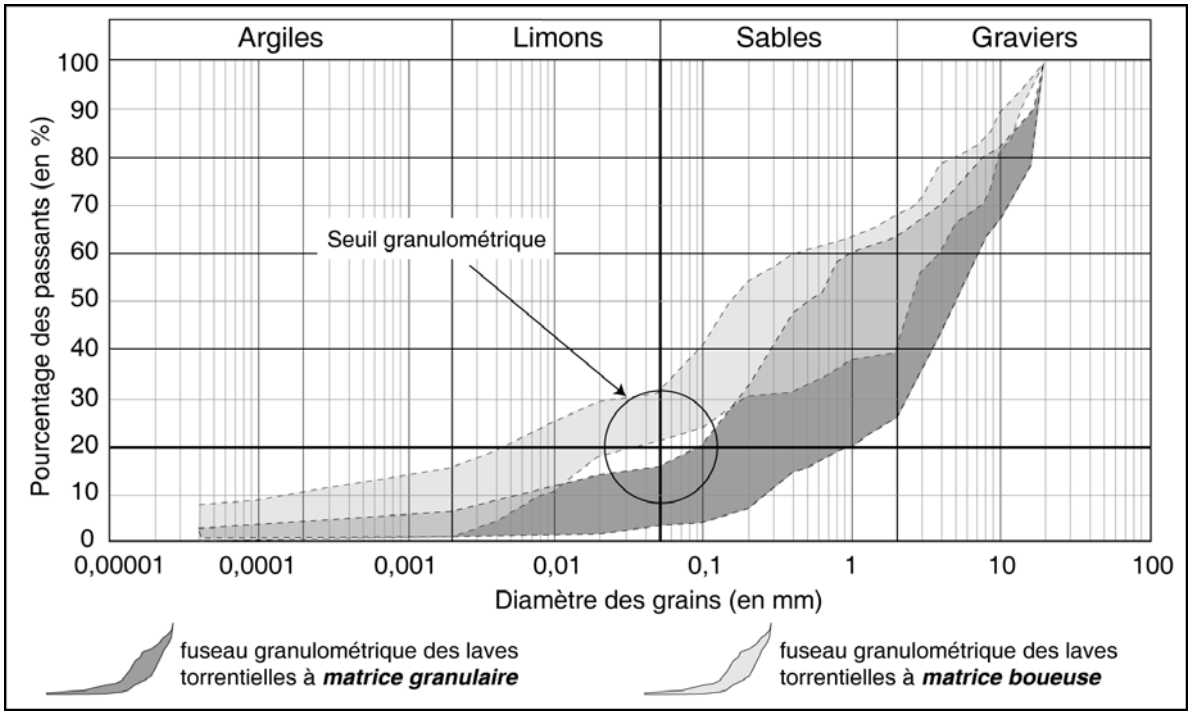


Figure 1.5 *: Classification granulométrique de Bonnet-staub (1998) des dépôts de laves torrentielles (écrêtés à 20 mm).*

Toutefois, la granulométrie des laves torrentielles va évoluer le long de son parcours et peut fortement varier pour un même événement au gré de l'incorporation de matériaux supplémentaires au cours de la propagation. Une lave torrentielle peut changer de type au gré de sa progression (Remaître *et al.*, 2005a) : ceci est surtout vrai pour les laves déclenchées dans des bassins versants géologiquement contrastés. **L'enrichissement en matériau de la lave pendant sa progression constitue la contribution** (Pierson, 1980 ; Jibson, 1989 ; Corominas, 1995). Elle fait partie intégrante de la cinématique des laves torrentielles, dont la description détaillée constitue notre prochain point.

1.3. Cinématique des laves torrentielles

La cinématique fait appel aux notions relatives à la **dynamique temporelle du mouvement**. Chaque type de mouvements de terrain connaît différents types d'évolution temporelle. Flageollet (1996) note que certains de ces mouvements peuvent stopper immédiatement et définitivement après le déclenchement (chutes de blocs, écroulement, etc.), alors que d'autres connaissent une activité cyclique (écoulement torrentiel).

Pour les glissements de terrain, Vaunat et Leroueil (2002) distinguent quatre stades d'activité temporelle sur le plan de la cinématique (Fig. 1.6a) :

- *le stade de pré-rupture*, lorsque la masse initiale est encore continue et caractérisée par une amorce de rupture progressive ou du fluage ;
- *le stade de rupture*, caractérisé par la formation d'une surface de cisaillement continue à l'ensemble de la masse instable ;
- *le stade de post-rupture* décrit le comportement de la masse de la phase de propagation à la phase d'arrêt (dépôt) ;

- *le stade de réactivation* quand la masse glissée s'écoule le long de surfaces pré existantes. La réactivation est soit occasionnelle et soudaine, soit continue et caractérisée par un rythme saisonnier des vitesses de déplacement.

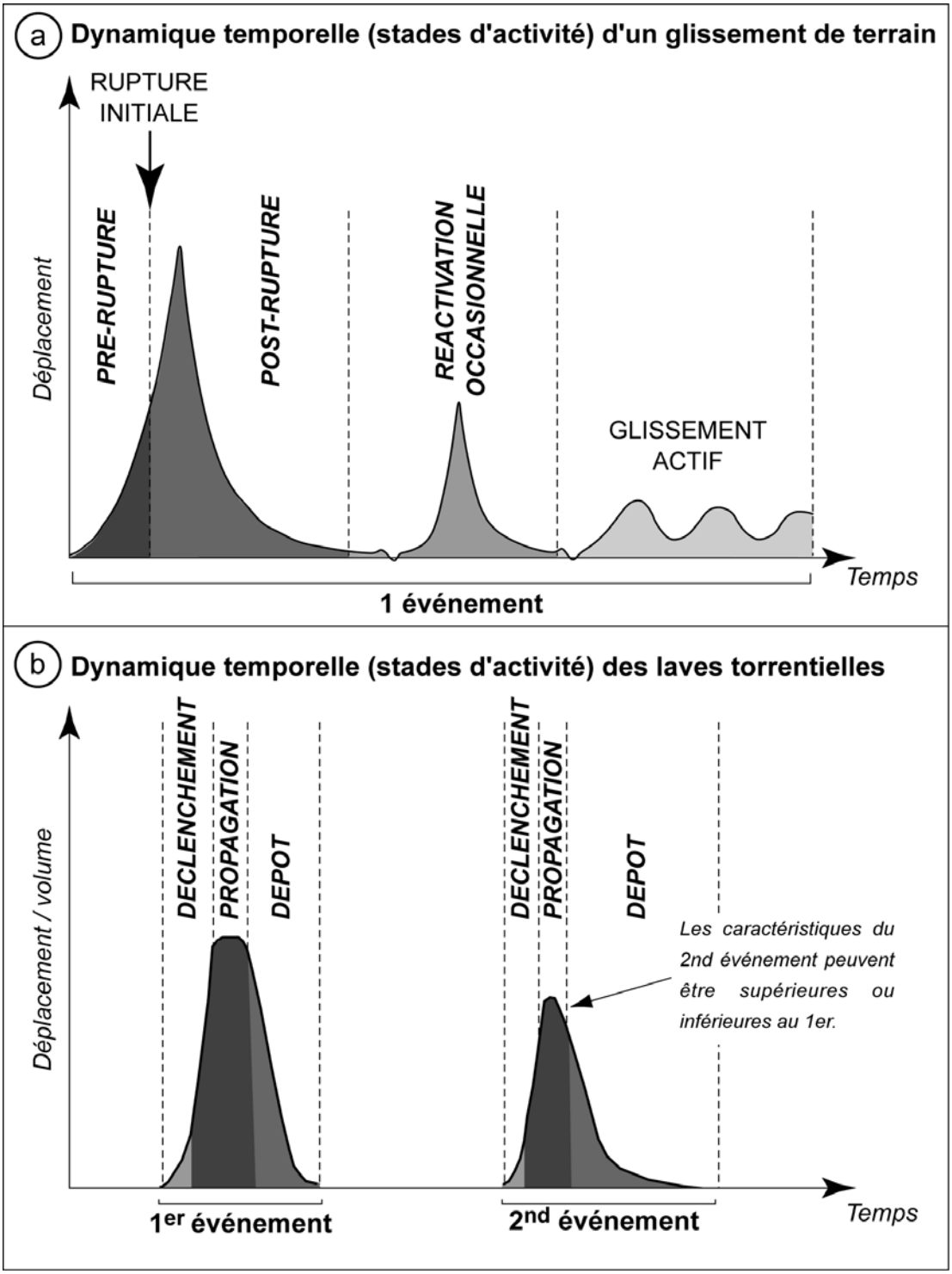


Figure 1.6 *: Comparaison entre la dynamique temporelle (a) des glissements de terrain et (b) des laves torrentielles (modifiée de Vaunat et Leroueil, 2002).*

Cette dynamique temporelle n'est réellement pas adaptée à la dynamique des laves torrentielles. On parlera plutôt **des phases de déclenchement, propagation et de dépôt (étalement)**, plus représentatives de ces phénomènes (Fig. 1.6b). La notion de réactivation ne peut pas être utilisée dans le cas des laves torrentielles, on préfèrera celle d'occurrence

avec la succession d'événements. Selon les événements successifs, les trois phases vont se succéder au cours du temps, dans un même chenal, et vont présenter des caractéristiques différentes en termes de volume, de type, de comportement, etc. Des différences profondes peuvent aussi exister entre chaque événement, en termes de mécanisme de déclenchement, de localisation de la zone de déclenchement et de volume (Stock et Dietrich, 2003). Ces trois phases sont intimement liées aux caractéristiques du bassin versant concerné : géologie, géomorphologie, hydrologie, hydrogéologie, occupation du sol, climat, etc. Nous allons successivement évoquer les mécanismes et la morphologie de chacune de ces phases. Enfin, nous évoquerons les lois de comportement des laves torrentielles qui interviennent à la fois dans les phases de propagation et de dépôt (étalement).

1.3.1. Le déclenchement

Les laves torrentielles se produisent dans toutes les zones montagneuses et sous toutes les latitudes. La connaissance des mécanismes de déclenchement des laves torrentielles est d'une première importance dans l'objectif d'une gestion du risque '*lave torrentielle'* :

- pour permettre une prévision spatio-temporelle de ces phénomènes ;
- pour mettre en place une politique de surveillance des zones potentiellement à risque.

En première approximation, observant que les fluides constitutifs des laves torrentielles résultent d'un mélange d'eau et de solides (§ 1.1.2), il paraît assez naturel de décomposer le problème en deux phénomènes qui se rejoignent. Pour qu'une lave torrentielle puisse se déclencher, il faut à la fois **une crue liquide** et **des matériaux solides disponibles**. La survenance de la crue va dépendre des conditions météorologiques (Wilson et Wieczorek, 1995 ; Dai *et al.*, 1999), et de l'état hydrique initial du bassin versant (Johnson et Sitar, 1990 ; Ambroise, 1998 ; van Asch *et al.*, 1999) alors que la disponibilité des matériaux solides va dépendre essentiellement des caractéristiques géomorphologiques du chenal et du bassin versant torrentiel (Costa, 1984 ; Lu et Cruden, 1996).

1.3.1.1. Conditions climatiques associées au déclenchement

L'eau est la cause exclusive du déclenchement. Les laves sont fréquemment associées à des évènements météorologiques extrêmes, tels que les orages, les cyclones et les fontes brutales de neige ou de glace. Sauf sur les émissaires glaciaires dont les débits extrêmes sont la conséquence de ruptures de poches d'eau indépendantes des conditions météorologiques, des précipitations intenses sont nécessaires pour que s'amorce le processus de transport solide (Anderson et Sitar, 1995). Ces précipitations vont contrôler les phénomènes de saturation des sols, de perte de cohésion capillaire des sols non saturés, la recharge des nappes et la montée des pressions interstitielles (Reid *et al.*, 1997).

Les études menées depuis le début des années 1980, ont montré le rôle important joué par les caractéristiques des sols du bassin versant concerné dans le déclenchement des laves torrentielles (Caine, 1980 ; Govi *et al.*, 1985 ; Cannon et Ellen, 1985 ; Capecchi et Focardi, 1988 ; Filice et Versace, 1990). Zaruba et Mencl (1969), ont démontré que **l'état initial d'imbibition des sols** (sur des périodes allant d'un mois à deux ans) est un facteur important. Ils ont calculé que la probabilité d'occurrence d'un écoulement augmente sensiblement avec des seuils de précipitations antécédentes cumulées. Dans la région de *Hong Kong*, Lumb (1975) a vérifié pour des sols résiduels que des événements de type laves torrentielles ou glissements de terrain peuvent se déclencher quand les pluies journalières dépassent les 100 mm ou quand les pluies antécédentes sur quinze jours sont supérieures à 350 mm. Campbell (1975) a mis en évidence, pour des sols à forte capacité d'infiltration de la *Californie du Sud*, que deux conditions sont nécessaires pour que des laves torrentielles soient déclenchées : les pluies saisonnières doivent dépasser 250 mm et

l'événement orageux doit avoir une intensité minimale de 6 mm.h^{-1}. Sur les torrents japonais, Okuda *et al.* (1979) ont observé des laves torrentielles se produisant lors de précipitations d'une intensité de 42 mm.h^{-1} pendant 10 minutes sur sol saturé. Crozier et Eyles (1980) prennent en considération **les précipitations journalières et l'état hydrique du sol** pour définir des seuils au delà duquel une coulée de débris peut se déclencher (Fig. 1.7).

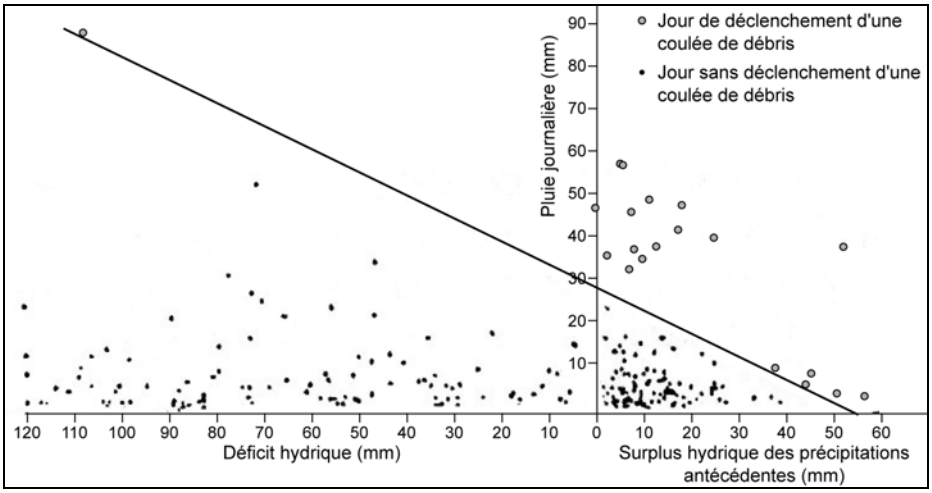


Figure 1.7 *: Distribution des jours de déclenchement de coulées de débris en fonction des précipitations journalières et de l'état hydrique du sol pour la région de Otago en Nouvelle Zélande (Crozier et Eyles, 1980).*

Wieczorek et Sarmiento (1988) ont déterminé un seuil nécessaire au déclenchement d'une lave torrentielle en confrontant l'intensité horaire et la durée d'un épisode pluvieux (Fig. 1.8). La courbe enveloppe en pointillé représente la limite au delà de laquelle toute précipitation sera à l'origine d'une lave torrentielle.

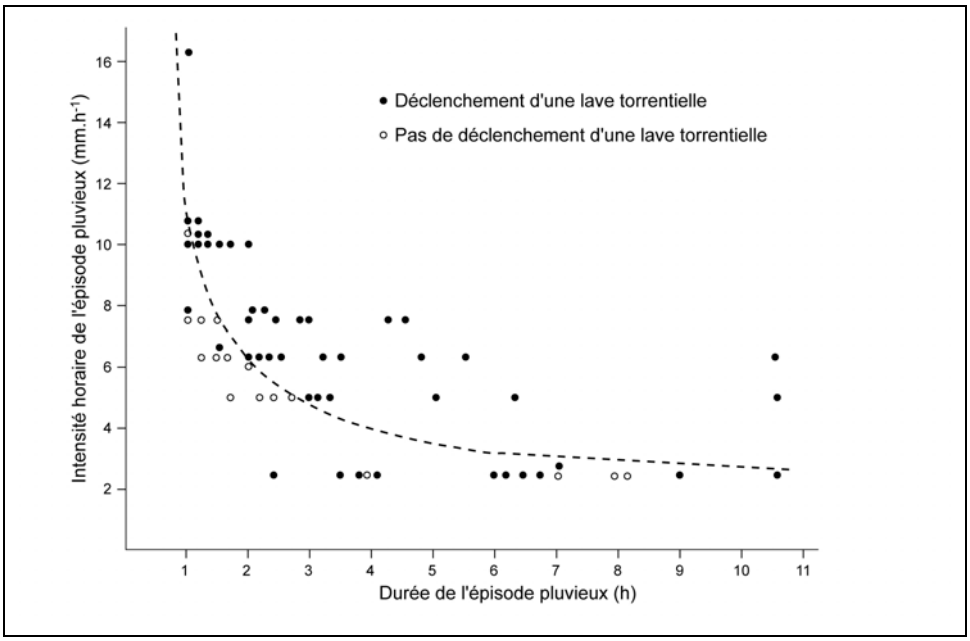


Figure 1.8 *: Relation entre la durée et l'intensité horaire d'un épisode pluvieux dans la région de La Honda en Californie (Wieczorek et Sarmiento, 1988).*

La ligne en pointillés représente le seuil au delà duquel une lave torrentielle se déclenche.

Les seuils déterminés dans toutes ces études sont difficilement applicables à d'autres bassins versants du fait de leur caractère fortement 'régional' (Rickenmann, 1999 ; Fan *et*

al., 2003). Il est parfois impossible de définir de tels seuils à cause d'un manque de données pluviométriques provenant de stations suffisamment proches de la zone de déclenchement. Ces seuils démontrent toutefois le rôle important des épisodes pluvieux en terme d'intensité et de durée, et de l'état hydrique initial des sols.

L'analyse fine des chroniques pluviométriques (au moins au pas de temps journalier) et des données historiques constituent une étape nécessaire dans le cadre de l'évaluation de l'aléa '*lave torrentielle*' dans un bassin versant.

1.3.1.2. Mécanismes de déclenchement et facteurs de prédisposition

Nous avons évoqué dans la section précédente le rôle important des précipitations dans le déclenchement des laves torrentielles. **Or toutes les fortes précipitations ne déclenchent pas systématiquement des laves torrentielles**.

En étudiant les torrents de l'*Arve* dans le massif alpin français, Peiry (1987) a montré que, (1) en dépit du caractère très local des précipitations orageuses, des bassins torrentiels voisins, aux conditions environnementales sensiblement identiques, ne connaissent pas forcément des transports solides et/ou des laves torrentielles concomitants ; (2) que sur un même torrent, la fréquence des laves est susceptible de varier très rapidement dans le temps, sans qu'elle puisse être reliée à un changement des conditions hydro-météorologiques. Ce constat montre bien que **les précipitations sont un facteur nécessaire mais pas suffisant**.

La phase de déclenchement des laves torrentielles ne peut se réaliser que si des **matériaux mobilisables et disponibles sont présents** quelque part dans le bassin versant (Wieczorek *et al.*, 2000). Ces matériaux sont rendus disponibles par les **processus géomorphologiques** de versant préparant et mettant en mouvement les débris qui alimentent les transports solides torrentiels. Ces processus, fortement non-linéaires et fonctionnant selon des seuils mal définis, ont certaines propriétés :

- ils fonctionnent chacun suivant une dynamique qui leur est propre, sur des pas de temps différents et très souvent indépendamment de l'évolution des thalwegs (Sauret, 1987). Tous les matériaux mis en mouvements « par le haut » (glissement, éboulisation, etc.) ne gagnent pas forcément le réseau de drainage, mais peuvent rester « en transit » sur le versant, en dehors de toute influence torrentielle (Tricart, 1958) ;
- ils fonctionnent pour la plupart sous l'influence de la gravité sur des matériaux déjà préparés par d'autres processus (météorisation, etc.), et où l'eau joue un rôle prépondérant dans beaucoup de cas ;
- ils se relaient pour acheminer les débris jusque dans la zone influencée par le torrent. Parfois, la remise en mouvement des matériaux nécessite au préalable, une nouvelle phase de préparation dont la durée est très variable (cas d'un glissement de terrain 'dormant' réactivé par des conditions hydro-météorologiques exceptionnelles).

L'origine des matériaux impliqués dans une lave torrentielle est très **variable** (chenal torrentiel, berges, versants contigus, affluents, etc.). Elle est fonction essentiellement du nombre de **zones sources**. La classification de Johnson et Rodine (1984) définit deux types de laves torrentielles en fonction du nombre de zones de déclenchement de l'événement. C'est la classification la plus communément admise. Elle distingue :

- ***'les laves générées à partir d'une seule source de matériaux'*** : dans ce cas les mécanismes de déclenchement sont généralement des mouvements de masse

conséquents (glissements de terrain affectant des volumes variables) pour lesquels le volume mobilisé à la source est relativement important et correspond globalement au volume total transporté ;

- ***'les laves générées à partir de plusieurs zones sources'*** : les matériaux proviennent de différentes zones sources non contiguës. Le volume contributif de chaque source est généralement faible en comparaison du volume total transporté par la lave. Les mécanismes de déclenchement correspondent alors le plus souvent à des petits arrachements de matériau en tête d'escarpement de ravines ou de rigoles.

Le deuxième type de lave torrentielle fait apparaître ici la notion de **zones de contribution**, qui fournissent des matériaux supplémentaires à la lave torrentielle pendant sa propagation et après son déclenchement. Les zones de contribution se localisent essentiellement dans les zones à proximité immédiate du chenal torrentiel et peuvent prendre plusieurs formes : tête de ravine, lit torrentiel, berge torrentielle, glissement superficiel, etc. Des travaux récents (Jibson, 1989 ; Hungr *et al.*, 2002 ; Vandine et Bovis, 2002) ont montré que pour certaines laves torrentielles déclenchées en *Colombie Britannique* (Canada) le volume des zones de contribution constituait entre 40 et 90% du volume total de l'événement. Ces zones de contribution sont particulièrement présentes dans les torrents développés dans des lithologies 'fragiles', comme les schistes et les marnes.

Le déclenchement des laves torrentielles peut être dû à plusieurs mécanismes. A partir de la classification de Johnson et Rodine (1984), plusieurs auteurs ont tenté de faire une typologie des mécanismes de déclenchement (Crosta et Marchetti, 1990 ; Meunier, 1991 ; Bonnet-Staub, 1998).

La classification multicritère proposée par Crosta et Marchetti (1990) est une approche intéressante, utilisant **une combinaison de facteurs déclenchant** comme le type de mécanisme, la valeur de pente, la topographie, la présence ou non de végétation, etc. Quatre types de mouvements déclenchant sont identifiés : (1) les glissements superficiels non canalisés, (2) les glissements superficiels canalisés, (3) les avalanches de débris sur les interfluves, (4) les torrents de débris déclenchés dans les gorges. Les quatre types de mouvements se distinguent essentiellement par la lithologie associée aux zones sources. Dans les cas (1) et (2), les glissements de terrain vont concerner des substrats meubles, alors que dans les cas (3) et (4), les avalanches et les torrents de débris vont concerner des tabliers d'éboulis, ou des couloirs d'avalanches développés dans un substrat rocheux.

Meunier (1991) distingue les *laves à genèse 'mouvements de terrain'* des *laves à genèse 'hydrologiques'*. Dans le premier cas, la lave torrentielle est déclenchée suite à un apport localisé de matériau dans le chenal torrentiel. Cette alimentation provient dans la plupart des cas d'un glissement de terrain (Fig. 1.9a) ou d'un écroulement (Fig. 1.9b). Dans un second cas, la pluie en provoquant un débit ruisselé se charge en matériaux solides par un processus d'érosion s'étendant à tout le bassin versant (alimentation surfacique). Puis la concentration des petits chenaux dans le lit torrentiel donne naissance à une lave torrentielle (Fig.1.9c). Malet (2003) note que les laves torrentielles déclenchées à partir des glissements de terrain sont théoriquement les plus dangereuses car leur volume au moment du déclenchement est potentiellement plus important que le volume libéré par une lave déclenchée par un autre processus. Ceci est particulièrement vrai dans le cadre d'un bassin versant taillé dans un substrat résistant, où l'érosion pendant la propagation est faible (Iverson *et al.*, 1997). La typologie de Meunier reste tout de même ambiguë. En effet, le terme de déclenchement 'hydrologique' proposé par Meunier peut laisser croire que le déclenchement 'mouvements de terrain' ne fait pas appel à l'hydrologie, ce qui n'est pas vrai. Le terme 'hydraulique' paraît mieux approprié.

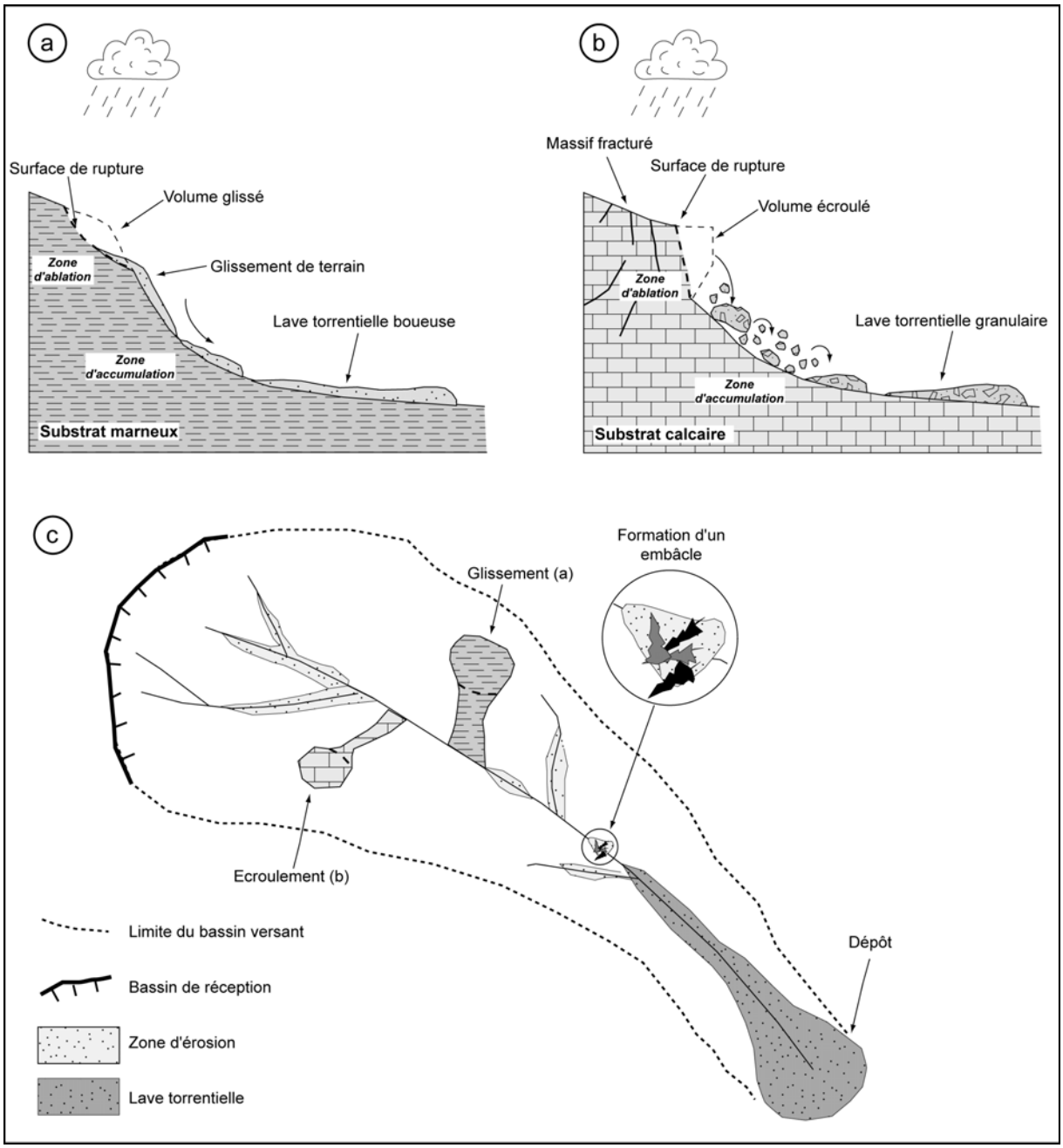


Figure 1.9 *: Mécanismes de déclenchement des laves torrentielles (modifiée de Meunier, 1991).*

a : schéma simplifié du déclenchement d'une lave torrentielle boueuse par un glissement de terrain ;
b : schéma simplifié du déclenchement d'une lave torrentielle granulaire par un écroulement ;
c : schéma simplifié des divers types de mécanismes de déclenchement et de contribution d'une lave torrentielle.

En s'appuyant sur l'étude géomorphologique d'une dizaine de bassins versants alpins, Bonnet-Staub (1998) distingue plusieurs **mécanismes de déclenchement :**

- impact des gouttes de pluie, ruissellement avec écoulement rapide, qui entraînent le ravinement ;
- glissement de terrain mobilisé en laves torrentielles ;
- glissement de terrain qui fournit du matériau au torrent, liquéfaction des dépôts torrentiels saturés suite à l'impact du glissement ;
- mobilisation de produits de versant par combinaison de solifluxion et de mouvements de versant ;

- liquéfaction de formations de pente granulaires sous l'effet de forts gradients hydrauliques ;
- incision et ruptures de berges ;
- ruptures de barrages naturels formés dans le chenal ;
- mobilisation des dépôts en transit dans le chenal et érosion du lit torrentiel ;
- augmentation du niveau de nappe et déstabilisation du chenal et des berges ;
- rupture de poches d'eau sous-glaciaire, ou émergence de réseaux d'écoulement karstique souterrains ;
- rôle du permafrost et du dégel des sols, alors saturés et meubles, qui peuvent être mobilisés en laves torrentielles.

Cette typologie, très exhaustive, a l'avantage de bien rendre compte des mécanismes divers qui peuvent aboutir au déclenchement d'une lave torrentielle. Cependant, il paraît probable que ces mécanismes, dans leur grande majorité, ne peuvent pas déclencher à eux seuls une lave torrentielle. Ils contribuent plutôt à alimenter la lave après son déclenchement (contribution).

Ainsi, ces différentes typologies ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients. En synthétisant, nous pouvons résumer que les laves torrentielles peuvent se déclencher suivant plusieurs mécanismes, qui peuvent concerner **une zone particulière** (Cas 1 de la classification de Johnson) ou **plusieurs zones distribuées** dans le bassin versant (Cas 2 de la classification de Johnson). Les zones fournissant les matériaux à la lave torrentielle vont être appelé '**zones sources**'. **Dans le premier cas, il y aura une source unique**, **alors que dans le second cas, il y aura une zone source de déclenchement *stricto-sensu*, et une ou plusieurs zones sources de contribution. Dans les deux cas**, les mécanismes à l'origine de la fourniture de matériaux vont être des processus de versants (glissement de terrain, éboulement, écroulement, etc.) et des processus torrentiels (érosion du lit, sapement de berge, rupture d'embâcle).

1.3.2. La propagation des laves torrentielles

Après la phase de déclenchement *stricto sensu*, les laves torrentielles peuvent être vues à l'échelle macroscopique comme une matière en déformation continue, cinématiquement monophasique et se comportant comme un fluide homogène (Bardou, 2002). Elles vont se propager dans le chenal d'écoulement en abandonnant des dépôts dans le chenal et incorporer d'autres matériaux accumulés dans le lit du torrent ou arrachés aux berges.

Comme nous l'avons vu dans la section précédente, le volume de la lave va évoluer au gré de sa progression en fonction des matériaux incorporés et déposés. Les propriétés des laves torrentielles en cours de propagation sont très variables, conséquence de la variété de la nature lithologique des matériaux incorporés, des variations topographiques du chenal d'écoulement, etc.

Cette variabilité associée aux propriétés rhéophysiques de la masse en mouvement va rendre l'écoulement de lave torrentielle fortement transitoire. Les pulsations intermittentes dans l'écoulement vont donner lieu à l'émission de bouffées successives, plus ou moins espacées dans le temps. **Chaque bouffée peut être considérée comme un ensemble indépendant, avec ses propres caractéristiques** (vitesse de propagation, volume, hauteur d'écoulement, densité globale du mélange, etc.). Ces bouffées peuvent être la conséquence d'une alimentation en matériaux solides supplémentaires (contribution), ou de la remise en mouvement d'une lave torrentielle préalablement stoppée dans le chenal torrentiel (§ 1.2.2.).

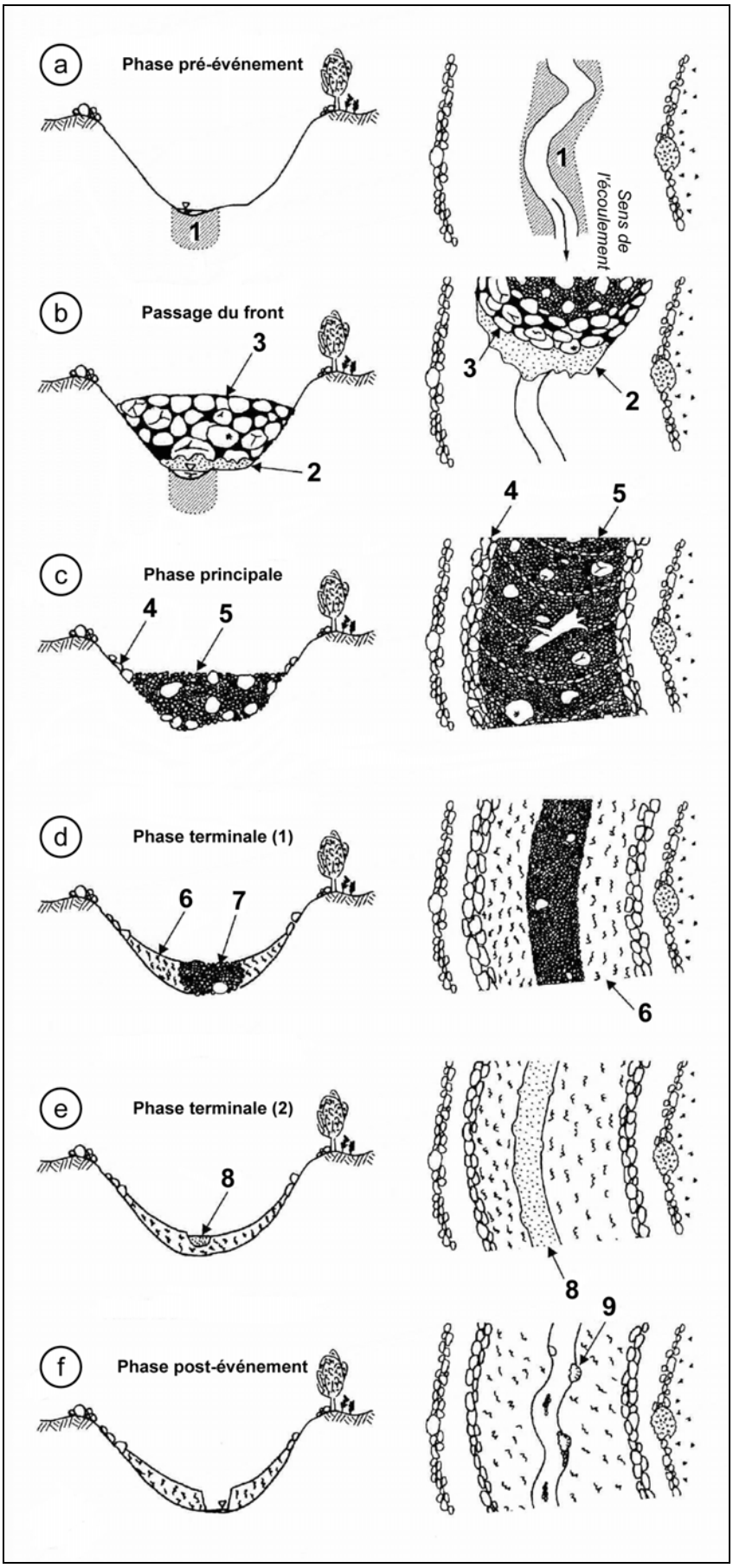


Figure 1.10 *: Les différentes phases d'une lave torrentielle (modifiée de Bardou, 2002).*

Cinq phases successives (Fig. 1.10) durant la propagation de la lave torrentielle sont distinguées à partir des observations de Bardou (2002) sur des torrents suisses :

- *'la phase pré-événement'* (Fig. 1.10a) : l'auteur a observé dans certains cas, l'apparition d'un bulbe d'humectation sous-jacent à l'écoulement. Des forages dans le lit ont permis l'observation de ce bulbe sans pouvoir déterminer à quelle profondeur se développe cette zone saturée. Ce bulbe serait en fait une concentration d'eau interstitielle « chassée » par la lave torrentielle à l'avant du front ;
- *'la phase frontale'* (Fig. 1.10b) : le front apparaît, la section qu'il occupe dans le chenal correspond à la section maximale d'écoulement. Le front est parfois accompagné de fortes turbulences créant un nuage d'embruns boueux. Dans la plupart des cas, le liquide qui forme le pré-front est un écoulement de type hyperconcentré. Le front est à chaque fois associé à un corps et des bourrelets latéraux, mais pas forcément séparé de la bouffée suivante par une queue. A l'arrière, les traces du passage du front son visibles ;
- *'la phase principale'* (Fig. 1.10c) : le corps s'écoule après le passage du front. Cet écoulement s'observe pendant une dizaine de minutes et est constitué d'un mélange eau-fine-granulats. Dans certains cas, l'écoulement se prolonge pendant plus d'une heure. L'essentiel du volume total de l'évènement s'écoule durant cette phase. Si la configuration topographique (pente, confinement, obstacles, etc.) du chenal le permet, les matériaux du corps de la lave vont déborder et former des levées ;
- *'la phase terminale'* (Fig. 1.10d et e) : la queue de la lave torrentielle fait suite au corps. L'écoulement perd de sa puissance et la section est comblée partiellement par des dépôts. L'écoulement devient plus fluide, migrant progressivement vers un écoulement hyperconcentré, puis en une crue hydraulique fortement chargée. Les blocs se déplacent par roulage ;
- *'la phase post-événement'* (Fig. 1.10f) : durant cette phase de décrue, l'écoulement va *'nettoyer'* une partie du chenal. La reprise du matériau prend la forme d'érosion de berges, de petits glissements superficiels et de remaniement des dépôts des phases précédentes.

Ce schéma se reproduit entre chaque bouffée, et constitue dans certains cas un des principaux moteurs de l'érosion de la lave torrentielle. Bardou (2002) souligne que certaines laves torrentielles *'glissent'* sur les parois du lit torrentiel sans provoquer d'érosion notable du chenal. Toujours selon le même auteur, l'érosion du lit est forte quand (1) la résistance des matériaux du lit et des versants contigus est faible, (2) le volume et le débit de la lave sont suffisamment importants pour éroder son lit.

Nous ne discuterons pas dans cette section du comportement (rhéologique) des laves torrentielles, il fera l'objet d'un point spécifique (§ 1.3.4) car il intervient aussi dans la phase de dépôt des laves torrentielles.

1.3.3. Le dépôt des laves torrentielles

La grande majorité des laves torrentielles dépose l'essentiel de leurs matériaux sur un cône de déjection. Ces dépôts prennent la forme soit de levées le long du chenal torrentiel, soit de lobes lorsqu'il s'agit de dépôts de débordement. Certaines laves peuvent s'écouler sur plusieurs kilomètres, en empruntant le lit de la rivière torrentielle dans laquelle elles se jettent. Ceci a notamment été le cas lors des crues de 1965 du torrent de la Ravoire à Pontamafray (Savoie), où certaines laves torrentielles se sont écoulées dans la vallée de l'Arc sur près de 7 km (Bonnet-Staub, 1998).

L'arrêt des laves torrentielles est commandé principalement par **cinq critères** (Meunier, 1991) :

- une diminution locale de la pente ;
- un élargissement du chenal d'écoulement qui s'accompagne d'un étalement de la lave ;
- un débordement au niveau des berges et un étalement consécutif ;
- un obstacle dans le chenal (seuil, embâcle naturel, etc.) ;
- un changement brutal de direction du chenal provoquant une remontée de la lave torrentielle sur le versant opposé et son arrêt.

Les études morphologique, géométrique, granulométrique et géotechnique des dépôts de laves torrentielles permettent d'évaluer l'intensité du phénomène, la possible localisation de la (ou les) zone(s) source(s) et éventuellement le mécanisme de déclenchement. L'étude approfondie des dépôts constitue une étape essentielle dans l'évaluation de l'aléa lave torrentielle, car cela peut permettre également d'avancer des hypothèses sur les scénarios possibles de déclenchement, de propagation d'une lave et de mettre en évidence les endroits éventuels où les laves torrentielles peuvent déborder, s'accélérer ou s'arrêter (conditions d'écoulement, critères d'arrêt).

Ces conditions d'écoulement et ces critères d'arrêt de la lave torrentielle sont intimement liés à la loi de comportement du mélange. Les caractéristiques des écoulements de laves torrentielles dans le chenal torrentiel vont évoluer au fur et à mesure des obstacles rencontrés et en fonction des conditions topographiques locales (§ 1.3.1 et 1.3.2). Le prochain point dresse une synthèse sur les lois de comportement des écoulements de type lave torrentielle.

1.3.4. Lois de comportement des laves torrentielles

Les premiers travaux systématiques pour comprendre les aspects physiques des laves torrentielles ont été entrepris par Johnson (1965) et Yano et Daido (1965), qui décrivent les propriétés des laves torrentielles. Pour appréhender *'la physique'* des laves torrentielles, de nombreux auteurs ont cherché à approcher empiriquement le comportement des laves torrentielles en combinant :

- des observations de l'écoulement et des mesures de vitesse et de viscosité *in situ* pendant un événement (Okuda *et al.*, 1980 ; Li et Yuan, 1983 ; Johnson, 1984 ; Pierson, 1980, 1986) ;
- des observations du chenal torrentiel et des zones de dépôts *in situ* après un événement (Fink *et al.*, 1981 ; Pierson, 1985, 1995 ; Whipple et Dunne, 1992 ; Major, 1996) ;
- des observations et des mesures à partir d'expérimentations en laboratoire (Takahashi, 1991 ; Khegai *et al.*, 1992 ; Iverson et Lahusen, 1989, 1993).

Toutes ces observations ont révélé :

- que **les laves torrentielles se comportent comme un écoulement turbulent, non-uniformes** (Iverson, 1997a) ;
- l'apparente **variabilité de la rhéologie** des laves torrentielles et de leur **comportement changeant et complexe** (Iverson, 2003). En effet, le comportement de ces suspensions concentrées varie à l'échelle de l'événement au cours de la propagation (Iverson et Vallance, 2001) par incorporation et/ou dépôts de matériaux (Jakob *et al.*, 2000), agitation du fluide (Savage, 1984) et variation de la pression interstitielle (Iverson et Denlinger, 2001a, b).

Depuis la première proposition de Johnson (1965) qui décrivait le comportement des suspensions concentrées (coulée de boue, coulée de débris, lave torrentielle) comme des fluides visco-plastiques, le débat reste d'actualité :

- sur la définition de la loi de comportement la plus adéquate pour décrire le comportement complexe des laves torrentielles (Johnson, 1965 ; Yano et Daino, 1965 ; Savage, 1984 ; Savage et Hutter, 1989 ; Takahashi, 1991 ; Coussot, 1993, 1994 ; Iverson, 1997a) ;
- sur le bien fondé d'une approche rhéologique (Iverson, 2003).

Dans l'approche rhéologique, le front et le corps de lave sont considérés, à une échelle d'observation globale, comme des fluides homogènes à déformation continue. Deux grandes familles de lois de comportement rhéologiques ont été progressivement adoptées :

- les laves torrentielles à lois de comportement boueux ;
- les laves torrentielles à lois de comportement granulaire.

Elles reprennent les deux groupes définis préalablement par la granulométrie (§ 1.2.3).

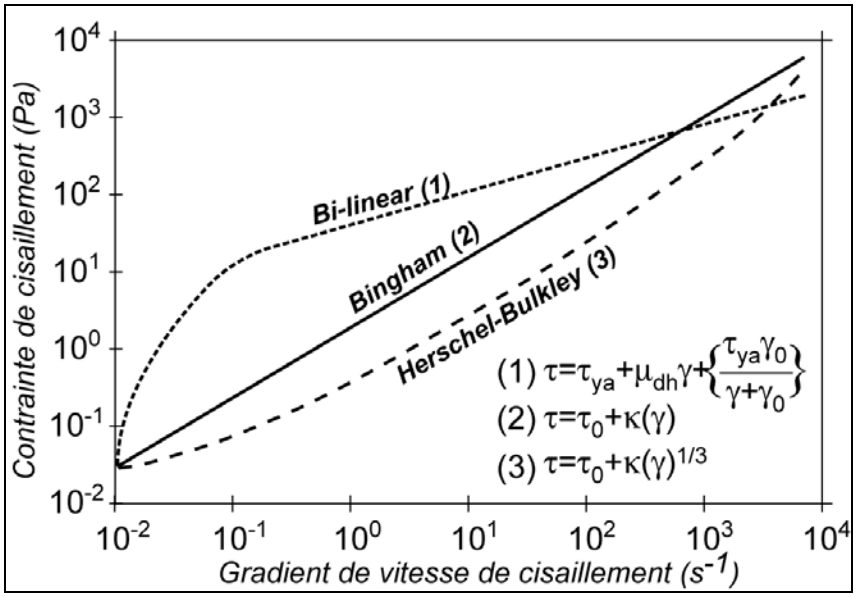


Figure 1.11 *: Rhéogramme type de trois laves torrentielles boueuses à lois de comportement visco-plastique (modifiée de Remaître et al., 2005b).*

Différents **modèles rhéologiques** visco-plastiques ont été développés pour les laves torrentielles *'boueuses'* (Fig. 1.11) : (1) le modèle *bilinéaire* (Colas et Locat, 1993), le modèle de *Bingham* (Johnson, 1984) ou bien encore le modèle d'*Herschel-Bulkley* (Coussot, 1993). Les lois de comportement visco-plastiques considèrent les laves torrentielles comme des fluides newtoniens à seuil, qui ne peuvent se mettre à couler sans qu'une certaine contrainte leur soit appliquée (de valeur minimale variant en fonction du mélange). L'existence du **seuil de contrainte** s'explique par la présence dans la structure de liaisons entre les éléments constitutifs du mélange (Coussot, 1997). Les modèles proposés sont des modèles empiriques qui nécessitent d'être calés aux mesures rhéologiques effectuées en laboratoire.

Pour les laves torrentielles granulaires, une alternative à l'approche rhéologique classique, basée sur **la théorie du mélange,** a été développée par Iverson et Denlinger (2001a, b). Cette théorie trouve sa source dans les travaux de Hutter *et al.* (1996) et Iverson (1997a) qui décrivent l'écoulement comme un mélange dans lequel les variations de la pression interstitielle au sein de l'écoulement expliquent les mécanismes de propagation (Iverson, 1997a) et d'étalement (Major, 1997, 2000 ; Major et Iverson, 1999). La théorie du mélange

élimine la notion d'une loi rhéologique unique pour l'ensemble du phénomène lave 'torrentielle', elle propose une loi de comportement spécifique pour les phases solides, liquides et d'interface entre le liquide et les grains (Iverson, 2003).

La version de la théorie du mélange employée par Iverson (1997a) et Iverson et Denlinger (2001a) propose de définir le comportement de la phase solide comme un corps frictionnel de *Coulomb*, et le comportement de la phase liquide par une loi de comportement d'un fluide visqueux non newtonien. L'interface entre les deux phases est représentée par un couplage entre la loi d'écoulement des fluides de *Darcy* et le principe de contrainte effective de *Terzaghi* (Savage et Iverson, 2003). Iverson (2003) précise que l'utilisation de la théorie des mélanges de *Coulomb* permet de décrire le comportement des laves torrentielles depuis le déclenchement de l'écoulement jusqu'aux phases de dépôt et de consolidation des matériaux après le dépôt proprement dit.

Ces hypothèses font actuellement débat au sein de la communauté scientifique. Si la théorie d'Iverson (2003) semble fonctionner pour des écoulements à très faibles pourcentages de matériaux fins (< 5%), l'approche rhéologique permet d'expliquer les distances de parcours élevées pour des écoulements de laves torrentielles boueuses (Ancey, 1999, 2002). Le choix d'une loi de comportement pour une lave torrentielle doit tenir compte des caractéristiques physiques de l'écoulement. Pour faire le choix le plus approprié, il est préalablement nécessaire de réaliser des analyses en laboratoire et *in situ* sur la granulométrie et la morphologie des dépôts, pour définir le type d'écoulement (granulaire ou boueux). La définition de la loi de comportement est donc indispensable dans un objectif de modélisation de l'écoulement d'une lave torrentielle pour les phases de propagation et de dépôt.

1.3.5. Conclusion

Les laves torrentielles sont des écoulements naturels qui traduisent les crises érosives des bassins versants torrentiels. Elles se situent entre les glissements de terrain et le charriage ordinaire (§ 1.1.1). Contrairement à d'autres mouvements de masse, elles se répètent dans le chenal torrentiel. Suivant la composition granulométrique, deux grands types de laves torrentielles sont distinguées : les laves à matrice granulaire et celles à matrice boueuse (§ 1.2.3).

Les laves se déclenchent la plupart du temps à la suite d'un épisode pluvieux particulièrement intense ou long (§ 1.3.1.1). Elles se déclenchent suivant plusieurs mécanismes (§ 1.3.1.2), qui peuvent concerner une zone source particulière ou plusieurs zones sources distribuées dans le bassin versant (zone source de déclenchement *stricto-sensu*, et une ou plusieurs zones sources de contribution). Les mécanismes à l'origine de la fourniture de matériaux vont être des processus de versant (glissement de terrain, éboulement, écroulement, etc.) et des processus torrentiels (érosion du lit, sapement de berge, rupture d'embâcle).

Les processus liés à la contribution n'ont pas toujours été pris en compte dans l'étude des laves torrentielles, malgré que certains auteurs aient clairement démontré l'existence de variations de volumes remarquables entre la zone de déclenchement et la zone de dépôt (Hungr *et al.*, 1984 ; Jibson, 1989 ; Corominas, 1995 ; Jakob *et al.*, 1997 ; Remaître *et al.*, 2005a). Les volumes issus des zones de contribution peuvent changer la granulométrie de la lave torrentielle au cours de sa propagation (§ 1.3.2). Ce qui va avoir pour principale conséquence de faire varier les caractéristiques rhéologiques de l'écoulement pendant la propagation. Ainsi par exemple, une lave torrentielle granulaire lors de son déclenchement peut évoluer vers une lave torrentielle boueuse par incorporation des matériaux fournis par l'érosion du lit et des berges pendant la propagation (Bardou, 2002 ; Remaître *et al.*, 2005b). La variation des caractéristiques rhéologiques rend délicat le choix de la loi de comportement et du modèle.

1.4. Modélisation numérique des laves torrentielles

Les difficultés rencontrées à la fois pour observer en direct les laves torrentielles et reproduire en laboratoire ces écoulements ont conduit les chercheurs à développer des modèles numériques capables de reproduire ces écoulements complexes pour prévoir les trajectoires, l'extension de la zone menacée, etc.

Si les premiers travaux sur la modélisation numérique des laves torrentielles datent du début des années 70 (Johnson, 1970), de nombreux et importants développements ont été entrepris lors de la dernière décennie (Hungr, 2000 ; Laigle et Marchi, 2000 ; Massimo, 2000 ; Ghilardi *et al.*, 2001). Deux grandes familles de modèles sont considérées :

- la première famille considère la lave comme **un fluide monophasique uniforme**, commandé par un seuil d'écoulement (Johnson, 1970 ; Liu et Mei, 1989 ; Coussot et Proust, 1996 ; Malet *et al.*, 2003a ; Locat *et al.*, 2004). Cette approche est issue du domaine de la mécanique des fluides (réduction de la contrainte de cisaillement dans toute la masse) où le comportement du fluide est viscoplastique ou frictionnel. Cette approche est utilisée dans le cas de laves torrentielles *'boueuses'*, riches en matériaux fins ;
- la deuxième famille considère l'écoulement de lave torrentielle comme **un fluide bi-phasique**, composé de particules élémentaires (ou grains) évoluant au sein d'un fluide interstitiel (Takahashi 1991 ; Davies et McSaveney, 2003, Iverson, 2003). Elle est issue du domaine de la mécanique des sols (réduction de la contrainte de cisaillement le long de plans de cisaillement, pressions interstitielles). Cette approche est utilisée pour des laves torrentielles *'granulaires'*, très pauvres en matériaux fins.

Certains modèles hybrides combinent des éléments provenant des deux approches. Les hypothèses des modèles sont uniquement valables pour des écoulements hydro-mécaniquement stables, où le frottement sur les parois (limites latérales de l'écoulement) contrebalance la force de gravité, et pour un régime permanent. L'objectif commun de ces modèles est de prédire les caractéristiques d'un écoulement en termes de distance de parcours, de vitesse et de débit (solide/liquide), de hauteur d'écoulement, d'épaisseur des dépôts. Hungr (1995) évoque les points devant être pris en compte dans le développement d'un modèle numérique d'une lave torrentielle :

- le volume du mouvement doit être variable, **fonction de l'incorporation de matériaux 'extérieurs' pendant l'événement (contribution)** et du dépôt d'une partie des matériaux le long du chenal d'écoulement ;
- le modèle doit prendre en compte **un large panel de lois d'écoulement** (rhéologie). La rhéologie doit être capable de **varier pendant sa propagation** ;
- le modèle doit permettre de modéliser de grands déplacements (distances de parcours kilométriques), en tenant compte des éventuelles arrivées extérieures de matériaux (affluents et zones de contribution) ou d'une diffluence du chenal d'écoulement (typiquement sur le cône de déjection) ;
- l'utilisation du modèle doit être aisée, l'interface conviviale, pour faciliter les analyses à rebours et le(s) calage(s)/validation(s) sur des événement réels.

Les modèles de propagation sont, pour la plupart, unidimensionnels et les modèles d'étalement sont bidimensionnels.

1.4.1. Les modèles de propagation

Deux grands groupes de modèles existent pour simuler une propagation d'un matériau le long d'une pente, les différents type de modèles ont fait l'objet d'une synthèse par Durville (1992) : l**es modèles mécaniques et les modèles rhéologiques**.

1.4.1.1. Les modèles mécaniques

Le premier groupe utilise des **modèles 'mécaniques'**. Il assimile le matériau à un corps élastoplastique rigide qui glisse le long d'une surface de discontinuité. C'est la notion de '*propagation avec frottement*' (Hutchinson, 1986 ; Sassa, 1988).

Le coefficient de frottement peut être constant durant la propagation ou variable en fonction du déplacement et de la vitesse de la masse (Cartier et Pouget, 1988 ; Davis *et al.*, 1990).

Sassa (1988) a développé un modèle frictionnel à deux paramètres qui combine un angle de frottement apparent à la base (*sled model*) et un rapport de pressions interstitielles dans la masse rigide pour modéliser la propagation et l'étalement de l'avalanche de débris du volcan *Ontake* (Japon).

Le modèle multi-éléments proposé par Anma *et al*. (1988) suppose la présence de plusieurs blocs rigides glissant successivement et indépendamment. Hutchinson (1986) considère que la rupture survient au début du mouvement par un excès de pressions interstitielles conduisant à un dépassement de l'angle de frottement apparent du sol par l'angle de la pente. Sous l'influence des pressions interstitielles, le matériau se liquéfie, glisse sur sa base tout en se consolidant. Cette consolidation progressive entraîne une diminution de la pression interstitielle à la base. La variation temporelle de la dissipation de la pression interstitielle est fonction du coefficient de consolidation. Le modèle a été testé sur le glissement-coulée d'*Aberfan* (Pays de Galles) par Hutchinson (1988), sur le glissement-coulée de *La Valette* (Colas et Locat, 1993) et sur les coulées sous-marines du delta du *Mississipi* (Locat *et al.*, 1996). Dans cette approche la plus grande difficulté réside dans la détermination du coefficient de consolidation.

Le modèle proposé par Iverson (1997a), Iverson *et al.* (1998) et Denlinger et Iverson (2001) décrit, de manière théorique, la physique de l'écoulement de laves torrentielles granulaires par un modèle de *Mohr-Coulomb* incluant des contraintes de cisaillement variables, des dissipations visqueuses et frictionnelles et l'effet des pressions interstitielles. Un code numérique semi-empirique (*LAHARZ*) a été développé sur la base de ce modèle et a été calé sur des écoulements de *lahars* (Iverson *et al.*, 1998 ; Canuti *et al.*, 2002).

1.4.1.2. Les modèles rhéologiques

Le groupe des **modèles 'rhéologiques'** considère les écoulements de laves torrentielles comme un **fluide monophasique déformable** dont le comportement, malgré des granulométries très étendues, est décrit par rapport à des fluides modèles en cisaillement simple (Malet, 2003). Selon la concentration volumique et la texture de la matrice, les modèles sont basés sur des lois de comportement de *fluide newtonien* (Curry, 1966), de *fluide à seuil* (Bingham, Herschel-Bulkley, bi-linéaire, viscoplastique généralisé (Sousa et Voight, 1991 ; Locat, 1997 ;Chen, 1988a, 1988b)), *de fluide granulaire à pression dispersive* (appelé également dilatant-inertiel, (Bagnold, 1954, 1956 ; Takahashi, 1991)), de *fluide turbulent* (Voellmy, 1964 ; Hungr, 1995) ou une combinaison quadratique de ces termes de frottement (O'Brien *et al.*, 1993).

Les lois de comportement (en cisaillement simple ou dans leur expression tensorielle) sont dans la plupart des cas moyennées sur l'épaisseur de l'écoulement (équations de *Navier-Stockes*, équations de *Barré de Saint-Venant*). Les équations de mouvement sont résolues dans un référentiel eulérien strict ou eulérien filaire. C'est dans le domaine des fluides boueux (comportement visqueux et viscoplastique) que la validation des modèles est la plus avancée (Rickenmann et Koch, 1997 ; Jan et Shen, 1997 ; McArdell *et al.*, 2003).

Les modèles les plus nombreux sont basés sur des **lois de comportement 'viscoplastiques',** citons entre autres :

- *VIFLOW 1-D* (Karlsrud et Edgers, 1982 ; Locat *et al.,* 1996) ;
- *Nasa-Vof 2-D* (Torey *et al*., 1985) ;
- *FLO 2-D* (O'Brien *et al.*, 1993) ;
- *DAN (Hungr, 1995 ; McDougall et Hungr, 2005) ;*
- *Cemagref 1-D* (Laigle et Coussot, 1997) ;
- *BING* (Imran *et al.*, 2001 ; Marr *et al.*, 2002) ;
- *DFEM 1–D/2-D* (Krüger, 2001 ; McArdell *et al.*, 2003) ;
- *MODDS* (Lenzi *et al.*, 2003) ;
- *J-DFM 1-D* (van Asch *et al.*, 2004).

Tous ces modèles considèrent une loi constitutive à seuil (Johnson, 1965 ; O'Brien et Jullien, 1988 ; Norem *et al.*, 1990 ; Coussot et Piau, 1994 ; Coussot, 1999). Les exemples de calage/validation sur des cas réels (laves torrentielles, coulées de boue, coulées de débris) restent limités (Ayotte et Hungr, 2000 ; Hürlimann, 2000 ; Hübl et Steinwendtner, 2001 ; Mei *et al.*, 2001).

Les modèles qui utilisent une rhéologie **'granulaire'** ou **'frictionnelle'** tiennent compte des interactions au niveau de la microstructure (Savage, 1984 ; Takahashi, 1991). Dans ce cas, le fluide est considéré comme un milieu biphasique dont le comportement est conditionné par les collisions intergranulaires. Le modèle proposé par Bagnold (1954, 1956), inspiré de la théorie de la cinétique des gaz, ne suggère pas l'existence d'un seuil de contrainte à dépasser (Barnes et Walters, 1985). Crosta *et al.* (1992), Shieh *et al.* (1996) et Takahashi (2001) ont utilisé cette approche pour modéliser des coulées boueuses de débris en Italie et à Taiwan.

Le modèle viscoplastique/frictionnel (*DAN, Dynamic Analysis Model*), développé par Hungr (1995) permet de voir évoluer la viscosité dans le temps et dans l'espace. Trois rhéologies peuvent être sélectionnées (uniquement un terme de *friction*, *Coulomb* ; uniquement un terme *viscoplastique*, *Bingham* ; un terme de *friction* combiné à un terme *d'écoulement turbulent*, *Voellmy*). Hungr et Evans (1996) et McArdell *et al.* (2003) ont comparé les trois rhéologies sur plusieurs écoulements en Colombie Britannique et en Suisse. Les résultats de ces modélisations montrent que le modèle frictionnel est le moins adapté, avec une sous-estimation ou une surestimation des distances de parcours. A l'opposé, les deux autres modèles rhéologiques donnent des résultats satisfaisants, le modèle de *voellmy* donne de bonnes prédictions pour les vitesses et les distances de parcours ; le modèle de Bingham tend à surestimer les vitesses alors que les distances de parcours sont bien représentées. Néanmoins le calage des modèles reste délicat.

Les modèles numériques de propagation (pour les deux groupes : mécanique et rhéologique) nécessitent des paramètres d'entrée. Ces paramètres peuvent différer légèrement en fonction du modèle, mais généralement, il faut fournir : la loi de comportement et la concentration volumique solide du matériau, la localisation de la zone de déclenchement, la topographie du chenal (profil en long, profils en travers) et un hydrogramme ou un solidigramme d'entrée.

1.4.2. Les modèles d'étalement

Si les modèles 1-D permettent de simuler correctement la propagation des écoulements fluides, il est nécessaire d'adopter des modèles 2-D pour simuler l'étalement du fluide sur un cône de déjection ou sur une plage de dépôt. Tous les modèles 2-D sont fondés sur les équations de *Barré de Saint-Venant* ou de *Navier-Stokes* bidimensionnelles adaptées à la loi de comportement du matériau constitutif. Le calcul est effectué dans une structure en éléments finis superposée à des mailles *raster*. Les équations différentielles sont résolues dans la très grande majorité des cas par des schémas explicites par différences finies (Vila, 1986 ; Fraccarollo et Toro, 1995 ; Fujihara et Borthwick, 2000) et dans certains cas par des automates cellulaires (D'Ambrosio *et al.*, 2002 ; Iovine *et al.*, 2003).

Des interfaces SIG sont utilisées en pré- et en post-traitement du calcul. Les paramètres d'entrée sont évalués à partir des caractéristiques d'écoulement au point de débordement (hydrogramme, sédimentogramme fournis pas les modèles de propagation associés). Les modèles sont utilisés en chaîne car les équations de mouvement ne peuvent pas être résolues simultanément en 1-D et en 2-D. Les prédictions des modèles utilisant les mêmes hypothèses de calculs (*FLO-2D* (O'Brien *et al.*, 1993) ; *Cemagref 2-D* (Laigle, 1996, 1997) ; *2D-UFM* (Pianese et Barbiero, 2003) ; *DDPM* (Lenzi *et al.*, 2003)) se sont révélées correctes pour l'étalement des laves torrentielles boueuses (Laigle *et al.*, 2003).

Les modèles d'étalement nécessitent de très bonnes données topographiques (résolution spatiale en planimétrie de l'ordre de deux mètres, en altimétrie inférieure au mètre) pour le chenal et le cône de déjection, les paramètres rhéologiques des matériaux, et un hydrogramme ou un solidigramme d'entrée. Les modèles peuvent servir soit en prédétermination, soit en reconstitution des phénomènes (Chen et Lee, 2000).

1.5. Evaluation de l'aléa 'lave torrentielle' : de l'investigation morphologique à la modélisation numérique

Les différentes observations évoquées dans ce chapitre mettent en exergue des points d'achoppement, des interrogations à la fois sur la cinématique de la lave torrentielle (déclenchement, propagation, contribution et dépôt) que sur son occurrence spatiale et temporelle. Du fait de la complexité des processus mis en jeu, établir des relations entre les conditions hydro-météo-climatiques, les caractéristiques rhéologiques, les conditions géomorphologiques, les volumes écoulés et les vitesses de propagation est un problème délicat. Quels sont les moyens, les méthodes qui permettent de les étudier le plus finement possible ? Que doit-on entreprendre pour mieux se protéger efficacement de ces écoulements particuliers ? Nous proposons une méthodologie d'étude pour tenter de répondre le plus efficacement possible à ces questionnements dans la prochaine section.

Au début des années 1990, de nombreux progrès ont été réalisés dans la connaissance des caractéristiques de l'écoulement d'une lave torrentielle (§ 1.3.4). Cette connaissance sur l'hydraulique des laves a permis de mieux s'en protéger, en l'utilisant notamment pour le dimensionnement des ouvrages d'art de protection torrentielle (Armanini et Scotton, 1993 ; Takahashi, 1991 ; Deymier *et al.*,1994 ; Iverson *et al.*, 1994 ; Richard, 1995).

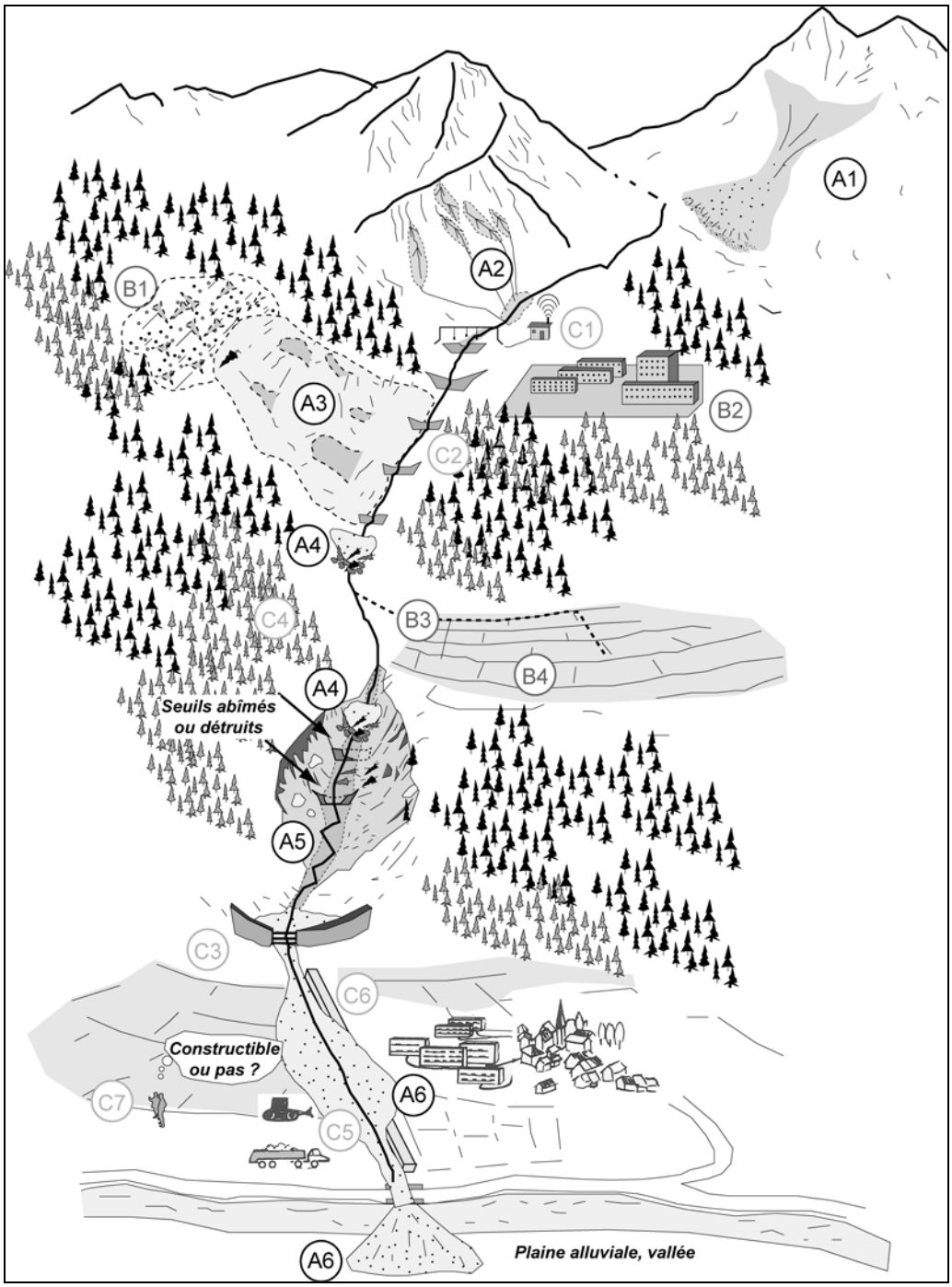


Figure 1.12 *: Concept de bassin torrentiel à 'risques' (modifiée de Van Effenterre, 1982).*

A) processus hydro-géomorphologiques de déclenchement/propagation/dépôt :

(A1) glissement de terrain actif (volume > 1000 m^3), (A2) ruissellement généralisé et ravinement (diffus, concentré), (A3) secteur instable caractérisé par de nombreux glissements superficiels, (A4) formation d'embâcles dont la rupture peut déclencher une lave, (A5) érosion de pied de versants et des berges, incision, abaissement du lit et apports de débris, (A6) débordement et création de cônes torrentiels ;

B) actions anthropiques favorisant ou contrôlant l'aléa torrentiel :

(B1) déforestation 'massive', (B2) urbanisation intensive, et imperméabilisation des sols, (B3) drainage défectueux, fuites et infiltrations (B4) non entretien des prairies (abandon des prés de fauche, dégradation des canaux d'irrigation) ;

C) actions anthropiques de gestion (active/passive) de l'aléa et du risque torrentiel :

(C1) mise en place d'un système d'alerte, (C2) seuils torrentiels, (C3) plage de dépôts, (C4) reforestation, (C5) curage des plages de dépôt et du lit torrentiel, évacuation des matériaux, (C6) digue de retenue sur le cône torrentiel, (C7) contrainte d'urbanisme sur l'occupation du sol et zonage réglementaire.

La recherche d'une protection efficace nécessite que l'étude hydraulique puisse à la fois porter :

- sur des caractéristiques de laves (volume, rhéologie) pour lesquelles on puisse évaluer l'occurrence temporelle et spatiale ;
- sur la prise en compte des zones d'érosion et de dépôts qui peuvent sensiblement modifier le volume de la lave en cours de propagation.

Le problème complexe de la formation et du déclenchement des laves torrentielles reste donc pour l'instant entier (Meunier, 1991 ; Richard, 1995). En fait, la gestion de ces bassins versants torrentiels potentiellement instables doit répondre à plusieurs questions :

- quels sont les aléas (ou processus érosifs) redoutés dans le bassin torrentiel ?
- quelle est l'occurrence des laves torrentielles ?
- quelle est la distance probable de propagation ?
- quelle est la vulnérabilité des cônes de déjection et quels sont les enjeux dans les zones potentiellement recouvertes par des dépôts ?
- quelle stratégie de protection adoptée ?

En France, depuis la fin du 19ème siècle, **le service RTM**[7] est chargé de l'aide à la gestion du milieu montagnard, et particulièrement de la réduction des phénomènes torrentiels (en terme d'occurrence et d'intensité) dans l'objectif clairement désigné de **la restauration des terrains**.

Pour garantir la protection contre les risques torrentiels, le service RTM, le Cemagref ou encore les services du génie rural ont essayé d'identifier puis de contrôler les processus responsables des instabilités dans les bassins versants : c'est le concept de **bassin torrentiel à risque** (Fig. 1.12). Ainsi, pour contrôler les processus torrentiels, les services RTM ont combiné :

- la mise en œuvre d'ouvrages torrentiels de consolidation (Fig. 1.13a) et de sédimentation (Fig. 1.13b) ;
- des campagnes de reboisement ;
- des actions de curage du lit ;
- la mise en place d'un système d'alerte ;
- la construction de digues de retenues ;
- un zonage réglementaire.

Pour localiser correctement l'ensemble de ces systèmes ou de ses actions, il faut au préalable faire une étude approfondie du bassin versant pour localiser et définir les mécanismes et les zones d'instabilités.

Les études de bassins versants torrentiels réalisées pour définir **une stratégie de protection** doivent être nécessairement globales, en utilisant les données issues de la géomorphologie, de l'hydraulique torrentielle, de la géophysique, de la modélisation numérique. Mais Meunier (1991) souligne que cette étude est délicate en raison de la **multiplicité des mécanismes et de la surface parfois considérable des zones étudiées**. Il est alors plus approprié de décomposer le problème afin de traiter séparément les phases de déclenchement, de propagation (contribution, écoulement) et d'étalement (dépôt) sur le cône. Cette décomposition paraît nécessaire du fait des différences de fonctionnement observées entre ces trois phases (§ 1.3). De plus, les échelles de travail ne seront pas les mêmes, selon que l'on s'intéresse à l'une ou à l'autre de ces trois phases.

[7] Le service de Restauration des Terrains de Montagne fondé en 1882 est un service spécialisé de l'Office National des Forêts.

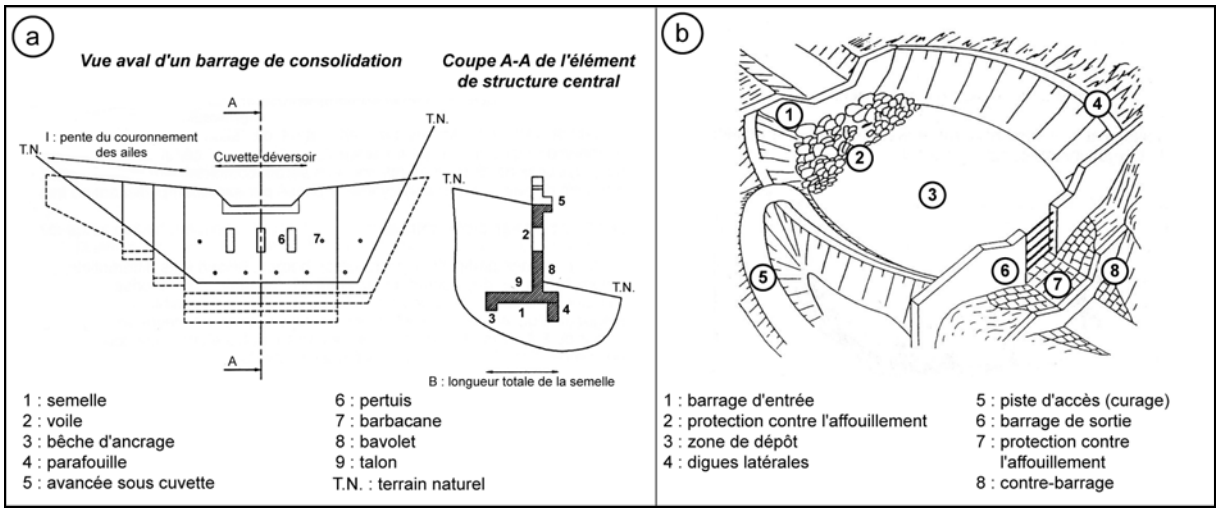


Figure 1.13 *: Types d'ouvrages torrentiels.*

a : vue aval et en coupe d'un barrage de consolidation (Deymier et al., 1994) ;
b : les éléments d'un dispositif de sédimentation (Zollinger, 1983).

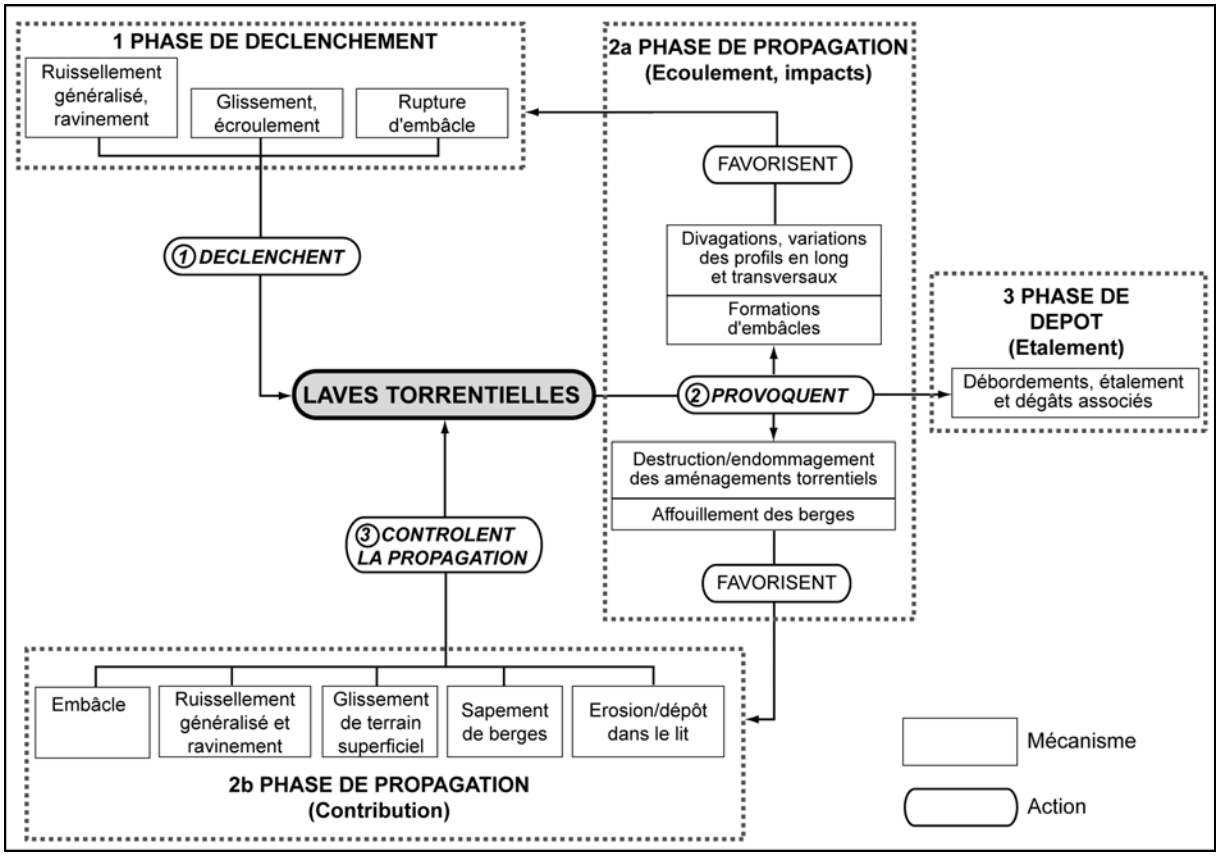


Figure 1.14 *: Processus élémentaires qui contrôlent et favorisent les phases de déclenchement, de propagation et d'étalement d'une lave torrentielle dans un bassin versant.*

La figure 1.14 montre les différentes interrelations qui peuvent exister entre les trois phases d'une lave torrentielle. Les phases vont interagir entre elles, une action produite lors de la phase de propagation peut favoriser le déclenchement d'une prochaine lave torrentielle. C'est par exemple le cas, lorsqu'une lave torrentielle endommage des aménagements torrentiels ou affouille les berges et/ou les seuils. Une lave peut également modifier significativement le profil en long du lit en érodant certains secteurs et en comblant d'autres secteurs. Ces modifications peuvent à terme favoriser le déclenchement d'une autre lave

torrentielle. Les mécanismes de contribution vont avoir une influence sur la phase de dépôt en augmentant le volume de la lave torrentielle par incorporation de matériaux pendant l'écoulement. Les trois phases de ces laves torrentielles sont donc fortement liées. Il est donc nécessaire de synthétiser *in fine* l'étude de ces trois phases pour aboutir à une évaluation globale de l'aléa lave torrentielle.

Avant de s'intéresser précisément à l'étude de ces trois phases, il est nécessaire de dresser un constat préalable sur l'activité historique de la torrentialité, les conditions climatiques et le cadre morphologique (Tab. 1.2). Ce constat doit permettre d'identifier les torrents les plus actifs et de définir les relations entre le régime pluviométrique local et l'occurrence spatiale et temporelle des laves (Ellen et Flemming, 1987 ; Pallas *et al.*, 2004 ; Pasuto et Soldati, 2004).

Tableau 1.2 *: Etapes pour la réalisation d'un constat préliminaire sur l'activité torrentielle (I).*

Etapes	Objectifs	Moyens	Chapitre/ Section
I.1 : Historique de l'activité torrentielle	Définir les torrents les plus actifs dans un bassin de risque ; Déterminer des zones de déclenchement ayant déjà fonctionnées dans le passé ; Définir l'intensité des événements anciens et des dégâts associés.	Consultations d'archives ; Enquêtes auprès des populations et des services gestionnaires.	**§ 2.2**
I.2. Etude climatique	Définir le contexte climatique général ; Déterminer les caractéristiques du régime pluviométrique à différentes échelles temporelles (annuelle, mensuelle, journalière, etc.).	Analyse statistique des données climatiques disponibles.	**§ 2.3**
I.3 : Etude des relations pluie/lave torrentielle	Définir une typologie des épisodes pluvieux associés à des laves ; Définir des seuils de précipitations (en terme d'intensité, de pluviométrie antécédente) pour le déclenchement des laves.	Comparaisons entre les données historiques et les chroniques pluviométriques sur des périodes de référence.	**§ 2.4**
I.4 : Morphologie et morphométrie des bassins versants	Identifier les facteurs de prédisposition.	Analyse morphologique et morphométrique au 1/50 000ème des bassins versants torrentiels.	**§ 2.5**

Une fois ce constat général réalisé, l'étude peut alors s'intéresser plus précisément aux trois phases des laves torrentielles.

1.5.1. La phase de déclenchement

Les différents types de mécanismes pouvant déclencher une lave torrentielle ont été évoqués dans la section 1.3. Quand la zone source est unique, le mécanisme déclenchant est, dans la très grande majorité des cas, un mouvement de terrain d'une ampleur conséquente (volume d'au moins 1000 m^3). Quand la zone source est multiple et distribuée, l'emprise spatiale de ces zones peut être considérable. Ainsi, pour identifier les mécanismes potentiels de déclenchement et les zones associées, l'échelle de travail doit être le bassin versant. L'échelle du 1/10 000ème semble particulièrement bien adapté.

L'objectif de cette étude du bassin versant est avant tout d'avoir une vue d'ensemble sur les processus érosifs et leur importance relative dans ce bassin versant. Cette analyse doit

permettre de définir la prédisposition du bassin à déclencher une lave torrentielle. Lorsque ces facteurs de prédisposition du bassin sont réunis et atteignent un seuil, une lave torrentielle peut se déclencher. Ce 'seuil' correspond à une disponibilité en matériaux mobilisables. La disponibilité de ces matériaux va dépendre des processus géomorphologiques comme par exemple la météorisation, le ruissellement, les glissements de terrain, etc.

La quantification de ces processus géomorphologiques à l'échelle de l'ensemble du bassin versant reste à l'heure actuelle difficile du fait essentiellement du manque d'outils adaptés (Meunier, 1991; Mathys *et al.*, 2003). L'analyse géomorphologique du bassin versant doit surtout permettre d'identifier des zones potentielles de déclenchement et de définir et de localiser des volumes mobilisables par un événement torrentiel en fonction de scénarii de déclenchement et d'évolution.

Tableau 1.3 *: Etapes dans la définition des zones sources de déclenchement (II) pour un bassin versant torrentiel.*

Etapes	Objectifs	Moyens	Chapitre
II.1 : Cartographie morphodynamique du bassin versant	Localiser les zones potentielles de déclenchement ; Evaluer les volumes pour chaque zone de déclenchement définie ; Définir les processus morphologiques en relation avec les mécanismes potentiels de déclenchement.	Photo-interprétation de photographies aériennes IGN multidates ; Observations morphologiques sur le terrain couplées à des levés topométriques et/ou au GPS ; Synthèse des cartes et des documents disponibles (cartes géologiques, etc) et réalisation de documents spécifiques adaptés.	**Chapitres 4 et 6**
II.2 : Analyse des formations sources in situ et en laboratoire	Définir les caractéristiques des formations sources pour : - reconstituer les événements de lave torrentielle ; - la modélisation numérique.	Analyse sédimentologique (granulométrie, pétrographie, etc.) ; Analyse hydrodynamique (infiltrométrie, Ksat, etc.) ; Analyse géomécanique (cisaillement rectiligne, essai Triaxial, etc.).	**Chapitre 5**
II.3 : Définition de scénarios de déclenchement	Obtenir un aléa de référence pour les modélisations	Synthèse des données	**Chapitre 7**
II.4 : Analyse des conditions de stabilité pour les zones de déclenchement identifiées	Evaluer les conditions de stabilité des zones sources en fonction des forçages externes.	Etude de la stabilité des zones potentielles de déclenchement par modélisation numérique.	**Chapitre 8**

Ainsi pour appréhender la définition des zones sources de déclenchement, un protocole en quatre étapes a été défini. Ces étapes répondent chacune à un ou plusieurs objectifs (Tab. 1.3), elles s'articulent à la fois selon une logique temporelle et organisationnelle :

- **L'étape 1** intéresse la collecte et la **cartographie morphodynamique du bassin versant** avec pour objectif principal l'identification des mécanismes potentiels de déclenchement d'une lave torrentielle ;

L'étape 2 concerne **la caractérisation des formations superficielles sources** (sédimentologiques, hydrodynamiques et géomécaniques) pour :

- reconstituer des événements de laves torrentielles (en termes de cinématique, de volumes écoulés, de matériaux impliqués, etc.) ;
- fournir des données d'entrées pour les modèles de propagation et d'étalement, et pour l'étude du déclenchement ;

▪ **L'étape 3** consiste à **établir des scénarios de déclenchement** cohérents avec les observations morphologiques et les études de stabilité pour définir des '*aléas de référence*' associant un ou plusieurs mécanismes et un volume de matériau libéré. Ce volume peut alors être introduit dans les modèles de propagation, selon un principe de chaîne de modélisation (Crosta, 2001 ; Malet *et al.*, 2005) ;

▪ **L'étape 4** analyse **les conditions de stabilité des zones potentielles de déclenchement** identifiées au cours des précédentes étapes.

1.5.2. La phase de propagation (contribution et écoulement)

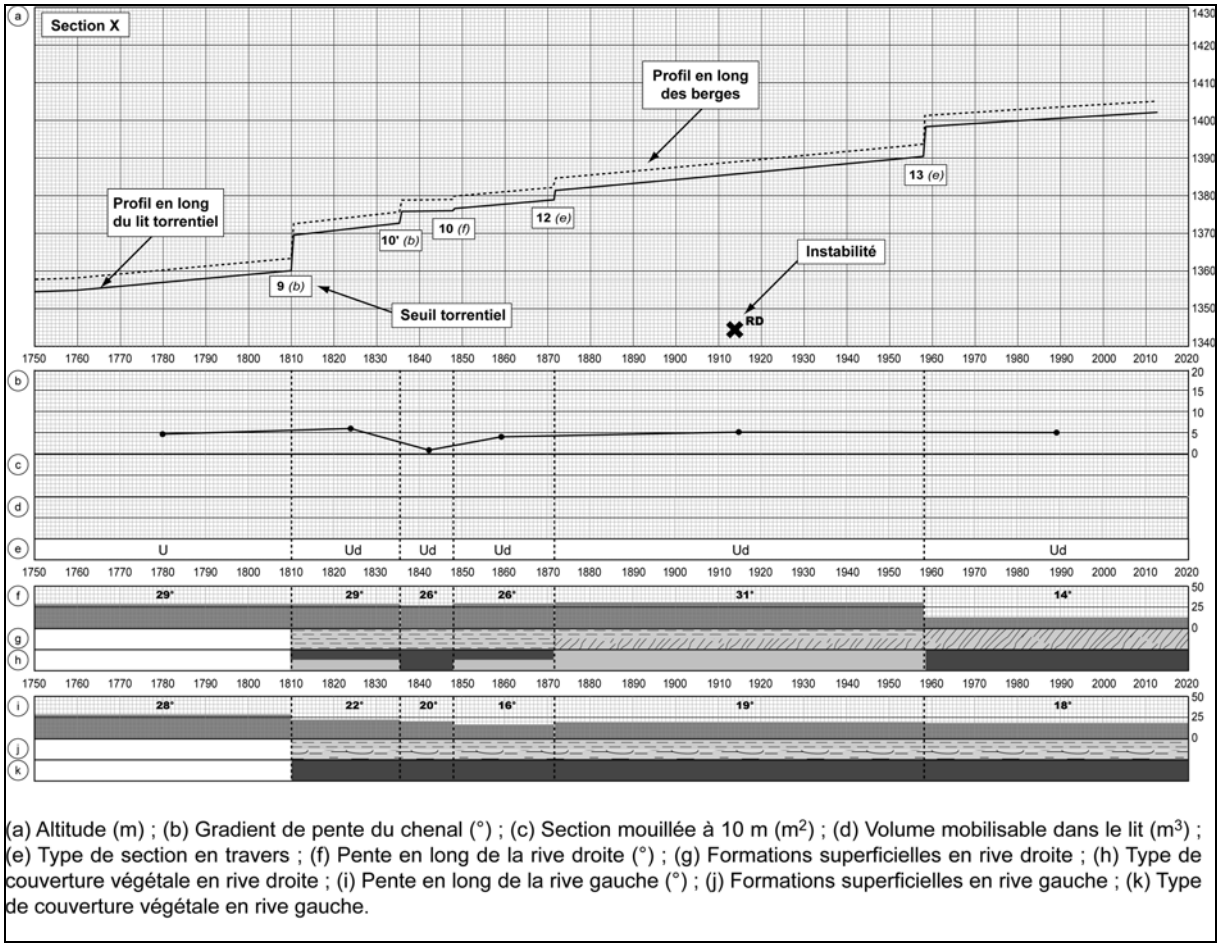


Figure 1.15 *: Exemple de cartographie des facteurs contrôlant la propagation des laves torrentielles.*

La figure 1.14 montre que la propagation des laves torrentielles peut être décomposée en deux phases : (1) l'écoulement en lui même (au sens hydraulique du terme, débit, hauteur d'écoulement, etc.) et (2) la contribution (enrichissement de la lave torrentielle en matériaux par des mécanismes morphologiques multiples). Dans les deux cas, l'échelle de travail est la même, mais différente de l'échelle utilisée pour la définition de la phase de déclenchement. L'étude de la phase de propagation doit être menée à plus grande échelle, c'est à dire à l'échelle du bief (1/1000ème, Fig. 1.15, Annexe 1). Ce n'est qu'à cette échelle que l'on peut

identifier et localiser précisément la majorité des mécanismes et des zones de contribution (Cenderelli et Kite, 1998 ; Zimmermann et Church, 2001).

Tableau 1.4 *: Etapes dans l'analyse de la phase de propagation (III) pour un bassin versant torrentiel.*

Etapes	Objectifs	Moyens	Chapitre
III.1 : Morphologie du chenal torrentiel découpé en biefs	Identifier les biefs fonctionnels et établir une typologie de ces biefs ; Définir et localiser les volumes de matériaux 'disponibles' dans le chenal torrentiel ; Définir les conditions d'écoulement (bief favorable à l'érosion, favorable au dépôt, etc.) d'une lave torrentielle dans chacun des biefs.	Réalisation du profil en long en croisant les types de mesure (Topofil, Tachéométrie, GPS) ; Morphométrie du chenal (largeur du lit mineur, du lit majeur, hauteur des berges, etc.) par des levés *in-situ* ; Localisation et description des seuils torrentiels ; Description et estimation du volume des matériaux par des levés sur le terrain ; Analyse de clichés photographiques du chenal torrentiel pris à des dates différentes.	**Chapitre 4**
III.2 : Morphologie des versants contigus au chenal torrentiel	Définir pour chaque bief les hauteurs maximales d'écoulement et la section mouillée associée ; Définir et localiser les volumes de matériaux disponibles sur les versants contigus au chenal.	Levés sur le terrain pour : 1) cartographier les formations superficielles et l'occupation du sol ; 2) cartographier les instabilités affectant les versants contigus ; 3) définir les caractéristiques morphométriques des versants à partir de profils en travers.	**Chapitre 4**
III.3 : Analyse du comportement des laves torrentielles	Définir les lois de comportement des laves torrentielles et de mélanges artificiels de formations sources pour : - reconstituer les événements de lave torrentielle ; - la modélisation numérique.	Analyse rhéologique croisée (rhéométrie, plan incliné, slump tests, etc.) sur : 1) des dépôts de laves torrentielles ; 2) sur des mélanges artificiels de formations sources.	**Chapitre 5**
III.4 : Cartographie et analyse statistique des facteurs de contrôle de la dynamique torrentielle	Hiérarchiser les biefs torrentiels ; Identifier les facteurs contrôlant la dynamique torrentielle.	Cartographie des biefs dans le SIG ArcView 3.1. et sur un profil en long ; Constitution d'une base de données géoréférencées sur les caractéristiques des biefs ;	**Chapitre 6**
III.5 : Définition de scénarios de propagation			**Chapitre 7**
III.6 : Modélisation numérique de la propagation des laves torrentielles selon des scénarios pré-définis	Identifier les paramètres d'écoulement (vitesse, débit, hauteur d'écoulement, etc.) d'une lave torrentielle associée aux scénarios.	Modélisation de la phase de propagation par l'utilisation croisée de plusieurs modèles d'écoulement de fluides viscoplastiques.	**Chapitre 8**

Concrètement, l'analyse de la phase de propagation (Tab. 1.4) nécessite de découper le chenal torrentiel en plusieurs biefs homogènes (en termes de pente, de formations

superficielles, de seuils, etc.) sur lesquels les analyses morphologiques et morphométriques seront pratiquées. L'analyse de la phase de propagation se décompose en six étapes :

- **les étapes 1 et 2** consistent à relever les **facteurs** conditionnant **l'écoulement** (pente du profil en long, section en travers, longueur du bief, section mouillée, etc.) et **la contribution** (lithologie, formations superficielles, instabilités, couverture végétale, état des berges, etc.) en travaillant à la fois sur le chenal torrentiel (étape 1) et les versants contigus (étape 2) ;

- **l'étape 3** consiste à définir **le comportement** (1) de matériaux de laves torrentielles et (2) de mélanges de formations superficielles issues des zones potentielles de déclenchement et de contribution à travers une investigation rhéologique croisée (rhéométrie, plan incliné, slump, tests, analyse à rebours) ;

- **pour l'étape 4,** les différents descripteurs de la morphologie du chenal et des versants sont insérés (1) dans une **base de données géoréférencées** sous SIG et (2) sur un profil en long au 1/1000ème (Fig. 1.15). Une **analyse statistique** de cette base de données est conduite pour (1) hiérarchiser les biefs torrentiels et (2) identifier les facteurs contrôlant la dynamique torrentielle ;

- des **scénarios de propagation** sont définis à **l'étape 5** ; ces scénarios tiennent compte du volume et du type de matériau, des seuils torrentiels, etc. **;**

- la **modélisation numérique** de la propagation des laves torrentielles constitue **l'étape 6**. L'objectif est de déterminer les paramètres d'écoulement (vitesse, débit, hauteur d'écoulement, etc.) d'une lave torrentielle pour évaluer, par exemple, les volumes minimaux pour qu'une lave torrentielle atteigne le cône de déjection (Laigle *et al.*, 2003 ; Malet, 2003). Parallèlement, une étude de sensibilité sera menée pour évaluer l'influence des seuils (nombre, dimensions, position) sur les caractéristiques d'écoulement des laves torrentielles.

1.5.3. La phase de dépôt (débordement/étalement)

L'analyse de la phase de dépôt va consister : (1) à définir les zones préférentielles d'étalement (zones extérieures au chenal), et (2) à identifier les éléments exposés et les enjeux dans ces zones d'étalement. L'échelle de travail est la même que pour l'analyse de la propagation (1/1000ème). En effet, cette échelle de travail doit être assez fine pour apprécier la micro-topographie de la zone potentielle d'étalement (résolution métrique de la maille, précision centimétrique en altimétrie).

L'étude de la phase de dépôt peut être décomposée en cinq étapes (Tab. 1.5) :

- **Les étapes 1 et 2** consistent à décrire **la morphologie du lit torrentiel sur le cône de déjection** (largeur du lit mineur, largeur du lit majeur, hauteur des berges, etc.) en s'appuyant sur des levés topométriques et/ou au GPS pour identifier (1) les zones favorables au **débordement (étape 1)** et (2) localiser les zones préférentielles **d'étalement (étape 2) ;**

- **L'étape 3** consiste à décrire et localiser les **éléments exposés et les enjeux** dans les zones pouvant être potentiellement atteintes par les dépôts de lave ;

- **L'étape 4** consiste à définir **la loi de comportement** d'une lave torrentielle. Les méthodes et les objectifs sont les mêmes que pour la phase de propagation (Etape III.3) ;

- des **scénarios** d'étalement sont définis pour **l'étape 5** ; ces scénarios tiennent compte du volume et du type de matériau, etc. **;**

▪ Enfin, **l'étape 6** a pour objectif de **localiser les points de débordements et d'estimer l'extension de ces débordements** en s'appuyant sur une analyse numérique de l'étalement des laves.

Tableau 1.5 *: Etapes dans l'analyse de la phase de dépôt pour un bassin versant torrentiel.*

Etapes	Objectifs	Moyens	Chapitre
IV.1 : Morphologie du chenal torrentiel découpé en biefs homogènes	Définir les zones favorables au débordement sur le cône de déjection.	Etablissement du profil en long du chenal torrentiel en croisant des données topographiques (Topofil, Tachéométrie, GPS) ; Morphométrie du chenal (largeur du lit mineur, du lit majeur, hauteur des berges, etc.) par des levés *in-situ* ; Localisation et description (type, état, dimensions, etc.) des seuils torrentiels dans le chenal.	**Chapitre 4**
IV.2 : Topographie du cône de déjection/plaine alluviale	Localiser les zones préférentielles d'étalement ;	Levés topographiques du cône de déjection par GPS et/ou des levés tachéométriques ; Production d'un MNT du cône.	**Chapitre 4**
IV.3 : Inventaire et description des éléments exposés et des enjeux	Identifier les éléments exposés pour évaluer les conséquences d'éventuels débordements.	Localiser et décrire les éléments exposés présents sur le cône de déjection ; Cartographie des éléments exposés dans le SIG ArcView 3.1.	**Chapitre 4**
IV.4 : Analyse du comportement des laves torrentielles	cf étape III.3, Tab. 1.4		**Chapitre 5**
IV.5 : Définition de scénarios d'étalement			**Chapitre 7**
IV.6 : Analyse numérique de l'étalement des laves torrentielles	Localiser les points de débordements et évaluer l'extension des zones d'étalement.	Modélisation de la phase d'étalement des laves torrentielles à travers l'utilisation d'un modèle d'étalement de fluides viscoplastiques.	**Chapitre 8**

1.5.4. Conclusion

La complexité des laves torrentielles impose de les étudier selon un protocole spécifique tenant compte à la fois des caractéristiques du bassin de 'risque', du bassin versant torrentiel et du chenal torrentiel. Cela suggère de travailler à différentes échelles spatiales (van Westen, 2000 ; Maquaire, 2002) et temporelles pour étudier chacune des trois phases de la cinématique de ces laves. En effet, par exemple, l'étude des mécanismes de déclenchement (pluviométrie, géomorphologie, etc.) nécessite de travailler successivement à l'échelle du bassin de 'risque' (échelle dite '*moyenne*' du 1/25 000 au 1/50 000ème) puis à l'échelle du bassin versant torrentiel (échelle dite '*large*' au 1/10 000ème environ) et pour des séries de données 'historiques' les plus complètes possibles. A l'inverse, l'étude des phases de propagation (contribution et écoulement) et de dépôt (débordement, étalement) doit se faire à l'échelle du chenal torrentiel (échelle dite '*locale*' au 1/1 000ème) et pour des événements bien renseignés, c'est à dire le plus souvent récents bien observés et décrits, pour disposer notamment de données suffisamment précises, et d'une cartographie 'fine' des zones potentielles de contribution.

Le protocole d'étude analyse chaque phase indépendamment en couplant pour chacune d'elle des observations de terrain, des analyses *in situ* et en laboratoire, des levés topographiques, une cartographie morphologique fine et des simulations numériques. Cette approche multidisciplinaire semble justifiée en considérant l'ensemble des mécanismes et des paramètres conditionnant le déclenchement, la propagation et le dépôt des laves torrentielles. Elle suggère également de construire une base de données spatialisée contenant toutes les informations recueillies à l'aide des différentes analyses précitées ci dessus. Cette base de données pourra aider à l'élaboration des scénarios de déclenchement et faciliter le calage des modèles sur les observations de terrain.

1.6. Conclusion du chapitre 1

Dans ce premier chapitre, nous avons défini les caractéristiques générales des laves torrentielles. Elles se produisent dans les torrents de montagne à la suite de longues et/ou fortes pluies. On distingue classiquement les laves torrentielles à matrice boueuse des laves torrentielles à matrice granulaire. Elles peuvent mobiliser des volumes de matériaux très importants (plusieurs milliers de m^3), et leur capacité de transport est énorme (blocs de plusieurs m^3).

La cinématique des laves torrentielles est différente de la cinématique 'classique des mouvements de terrain'. Elle se décompose en trois phases distinctes : le **déclenchement**, la **propagation** et le **dépôt**. Ceci impose de mettre en place un protocole d'étude adapté, en étudiant précisément chacune de ces phases.

L'identification des mécanismes et des paramètres conditionnant les trois phases est un préalable indispensable à la compréhension des processus de formation des laves torrentielles. Les difficultés liées à l'identification de ces processus ont été évoquées, en rappelant notamment que les données locales sur les conditions climatiques de déclenchement sont très peu nombreuses. **Ce manque est encore plus prononcé** pour les conditions de déclenchement et **de contribution** des laves torrentielles. Cela constitue une sérieuse limitation pour la confrontation des résultats théoriques et expérimentaux et des observations de terrain.

La complexité et la diversité des situations de déclenchement et de contribution, intégrant un nombre important de paramètres et de mécanismes peu connus et difficilement quantifiables, suggèrent de travailler sur des **références naturelles**. Ce travail sur des références uniques, au cas par cas, peut ensuite être rapproché aux typologies proposées dans la littérature, pour nourrir la réflexion sur la prévention et la gestion du risque 'lave torrentielle'. De ce fait, pour les torrents à lave, il est nécessaire de :

- définir s'il existe un lien climatique direct entre le déclenchement d'une lave torrentielle et une situation pluviométrique (en terme d'intensité ou de pluies antécédentes) ;
- décrire et localiser les mécanismes de déclenchement et de contribution des laves torrentielles et les zones 'sources' associées ;
- définir des scénarios de déclenchement en fonction de paramètres pertinents définis à partir d'analyses de terrain et de laboratoire ;
- caler/valider des outils numériques de simulation qui tiennent compte au maximum des mécanismes de contribution (variation du volume en cours de propagation, changement de la loi de comportement, etc.) ;
- évaluer les zones d'étalement, en termes d'extension et d'épaisseurs des dépôts, et les dégâts associés pour différents scénarios.

Pour appliquer cette méthodologie, l'**étude des organismes torrentiels évoluant dans les '*Terres Noires*' du sud des Alpes françaises est particulièrement instructive.** En effet, l'érodibilité des 'Terres Noires' (Antoine *et al.*, 1988, 1995 ; Mulder, 1991 ; Blijenberg, 1998 ; Oostwoud Wijdenes et Ergenzinger, 1998 ; Descroix et Olivry, 2002 ; Maquaire *et al.*, 2003) et leur comportement particulièrement changeant selon leur teneur en eau expliquent la variété des instabilités hydro-gravitaires observées dans cette lithologie. Parmi ces instabilités, les laves torrentielles boueuses sont particulièrement fréquentes (Remaître *et al.*, 2005a). Par leur capacité d'érosion et dépôts dans des bassins versants anthropisés, les laves torrentielles boueuses déclenchées dans les 'Terres Noires' présentent un niveau d'aléa élevé ou très élevé et, en corollaire, un fort niveau de risque en raison des enjeux importants présents, le plus souvent, le long ou aux débouchés des torrents sur les cônes de déjection.

Le **bassin de *Barcelonnette*** est un cadre adapté aux objectifs de cette recherche, 'la vallée des torrents' est le siège de nombreux appareils torrentiels actifs (le *Riou-Bourdoux*, l'*Abeous*, le *Riou-Chanal*, les *Sanières*, etc.). Parmi eux, nous avons eu l'opportunité de travailler sur **le torrent de *Faucon*** où trois événements torrentiels se sont produits en 1996, 2002 et 2003. De par son activité torrentielle récente, le torrent de *Faucon* est ainsi un site particulièrement intéressant pour la recherche envisagée. De plus ses dimensions sont suffisantes et représentatives, sa lithologie est variée, et de nombreux travaux de correction et de protection torrentielle y ont été entrepris (seuils, reboisement, digues, etc.).

Conformément aux différentes étapes décrites et justifiées ci-dessus, et pour ce bassin de *Barcelonnette*, la prochaine étape de ce mémoire consiste à dresser ce constat préalable sur l'activité historique de la torrentialité, les conditions climatiques et le cadre morphologique.

Chapitre 2 : MORPHOLOGIE, CLIMAT ET ACTIVITE TORRENTIELLE DU BASSIN DE BARCELONNETTE

Situé dans une région montagneuse particulièrement isolée, ***le bassin de Barcelonnette*** (Alpes-de-Haute-Provence, France), impose des conditions de vie singulières aux populations qui ont du faire face aux **nombreuses instabilités de versants** au cours des derniers siècles (Légier, 1977 ; Weber, 2001). En effet, de nombreux glissements de terrain se sont produits et certains sont encore actifs et représentent un danger réel pour les populations locales, tel le glissement-coulée de *La Valette* déclenché en 1982 qui menace un lotissement situé en contrebas, au Nord-Ouest de la commune de *Barcelonnette* (Colas et Locat, 1993 ; Van Beek et Van Asch, 1996 ; Malet, 2003 ; Maquaire *et al.*, 2003 ; Squarzoni *et al.*, 2003) ou encore les glissements-coulées de *Super-Sauze* et *Poche* (Guillon, 2001 ;Malet, 2003 ; Maquaire *et al.*, 2003). Néanmoins, la grande particularité du bassin de *Barcelonnette*, drainé par l'*Ubaye*, réside dans la présence de **nombreux organismes torrentiels très actifs** qui connaissent régulièrement des épisodes torrentiels (crues torrentielles, écoulements hyper-concentrés, laves torrentielles). Parmi ces torrents actifs, citons les torrents des *Sanières*, du *Bourget*, du *Faucon*, du *Riou Chanal* et du célèbre *Riou Bourdoux*. Ils affouillent entre autres, les **marnes noires callovo-oxfordiennes**, plus connues sous le nom de '***Terres Noires***' (Awongo, 1984 ; Bufalo, 1989 ; Phan, 1993 ; Antoine *et al.*, 1995 ; Descroix et Olivry, 2002 ; Maquaire *et al.*, 2003 ; Malet *et al.*, 2003b).

Après avoir exposé les grands traits **morphologiques** (aspects géographiques, contexte structural, héritage glaciaire, etc.), l'**historique** de l'activité torrentielle et les caractéristiques **climatiques** (traits généraux et spécificités du climat *ubayen*), **l'activité torrentielle** est analysée en confrontant l'historique des évènements (répartition temporelle et spatiale) aux séries météo-climatiques associées (précipitations annuelles, mensuelles, journalières). Enfin, pour comprendre pourquoi certains torrents sont plus actifs que d'autres, les caractéristiques (**morphologie et morphométrie**) de plusieurs bassins versants torrentiels sont étudiées.

2.1. Le pays des 'Terres Noires'

Les zones externes des Alpes occidentales françaises sont majoritairement composées de terrains sédimentaires qui s'étendent du Lias au Crétacé. Ils sont formés d'alternances de calcaires et de marnes. Ces dernières sont présentes sous différents faciès et constituent une particularité. Formées dans la très profonde fosse marine *Voncontienne*, les marnes affleurent sur des surfaces considérables (Fig. 2.1a). La stratigraphie de la *Fosse Vocontienne* (Fig. 2.1b) distingue trois groupes de marnes : les '*Marnes bleues*' de l'Aptien-Albien, les '*Marnes Blanches*' du Valanginien et les '*Terres Noires*' du Callovo-Oxfordien. Ces dernières sont particulièrement sensibles à l'érosion, et favorables à l'apparition de nombreuses instabilités (Antoine *et al.*, 1995 ; Garnier et Lecompte, 1996 ; Maquaire *et al.*, 2003 ; Malet, 2003). En dehors de ceux situés dans le bassin de *Barcelonnette*, plusieurs torrents à lave se sont développés dans des terrains marneux du département des Hautes-Alpes (Fig. 2.1a), citons, entre autres, les torrents du *Verdarel* (Lahousse et Salavador, 2002) et du *Boscodon* (Bonnet-Staub, 1998).

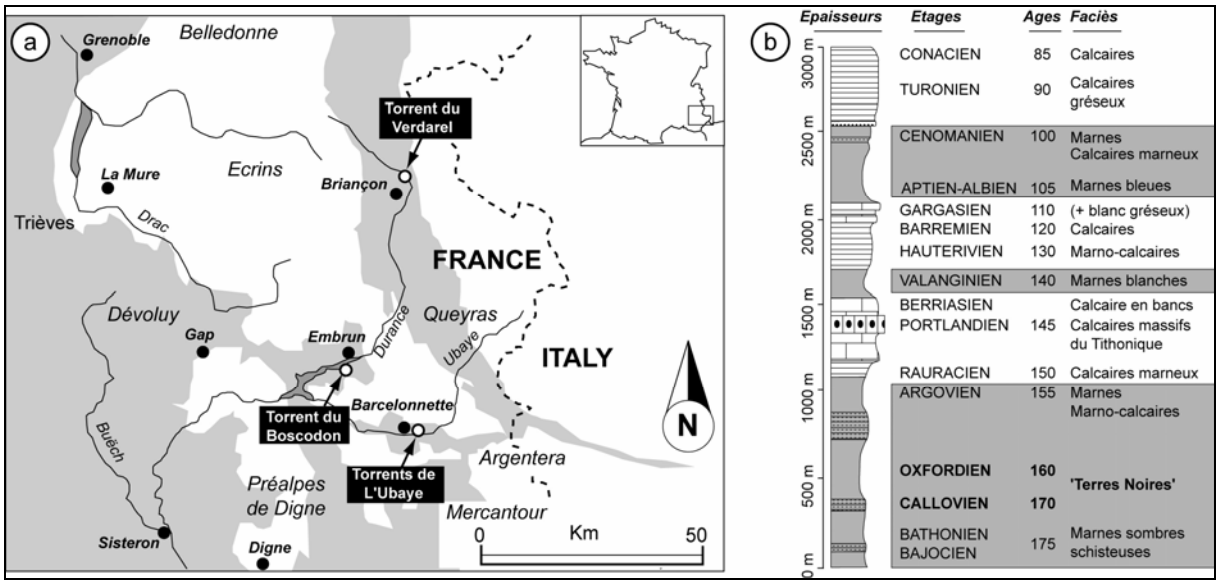


Figure 2.1 *: Extension et stratigraphie des marnes et des schistes argileux dans les Alpes françaises.*

a : affleurement des faciès marneux et schisteux dans le Sud-Est de la France (le grisé représente leur extension) ;

b : stratigraphie de la Fosse Vocontienne (sondage d'Aurel) où les étages marneux sont indiqués en grisé (Malet, 2003).

Situé dans les Pré-Alpes du Sud, le bassin de *Barcelonnette* s'inscrit entre le massif des *Ecrins* au Nord-Ouest, le massif du *Queyras* au Nord-Est, les *Préalpes de Digne* au Sud-Ouest et les massif cristallins de *l'Argentera* et du *Mercantour* au Sud-Est (Fig. 2.1a). D'une largeur maximale de quinze kilomètres (Fig. 2.2a), le bassin s'étire sur un peu plus de vingt kilomètres, entre *Jausiers* à l'Est (altitude 1210 m) et *Méolans* à l'Ouest (altitude 1040 m) où un verrou glaciaire constitue sa terminaison aval. **L'orientation est-ouest de la vallée** donne lieu à l'opposition classique entre un adret ensoleillé et un ubac 'frais' et ombragé. Il résulte de cette opposition des différences climatiques (ensoleillement, températures, précipitations), biologiques (répartition spatiale des essences) et anthropiques (occupation du sol). **La dissymétrie** de la vallée, résultat de l'histoire tectonique du bassin, a accentué cette opposition.

Le fond de la vallée, encaissé à une altitude moyenne de 1100 m (1130 m à *Barcelonnette*), est entouré par de hauts sommets culminant à des altitudes proches de 3000 m : la *Grande Séolane* (2909 m), le *Chapeau de Gendarme* (2682 m), l'*Aupillon* (2917 m), etc. **Les crêtes** sont armées par des formations très résistantes (calcaire, flysch). Ces crêtes sont localement façonnées par des cirques glaciaires, tels *La Chalanche* (2984 m) ou *La Grande Epervière* (2884 m). Ces cirques forment ainsi des **bassins de réception** pour les nombreux torrents qui incisent les versants (Flageollet *et al.*, 1999). Les formations résistantes se retrouvent à des altitudes comprises entre 3000 et 1900 m, elles imposent des pentes supérieures à 45° (Fig. 2.2.b).

Les **versants intermédiaires** (en dessous de 1900 m d'altitude) sont entaillés dans des marnes qui sont le plus souvent recouvertes par des formations morainiques et des colluvions. Le profil des versants est très adouci (pente moyenne de 20° en ubac, de 25° en adret). Ils sont localement soumis à un intense ravinement, responsable d'un paysage de **badlands** (*Roubines*). Les principaux secteurs ravinés se rencontrent sur des croupes en pentes très fortes et le long des torrents (Weber, 2001 ; Maquaire *et al.*, 2003). Les ravines peuvent être nues, et soulignées par un profil d'altération de marnes décolorées, ou plus ou moins ennoyées sous une couverture morainique, de teinte beige claire à beige foncé, qui contraste avec la noirceur uniforme des '*Terres Noires*'.

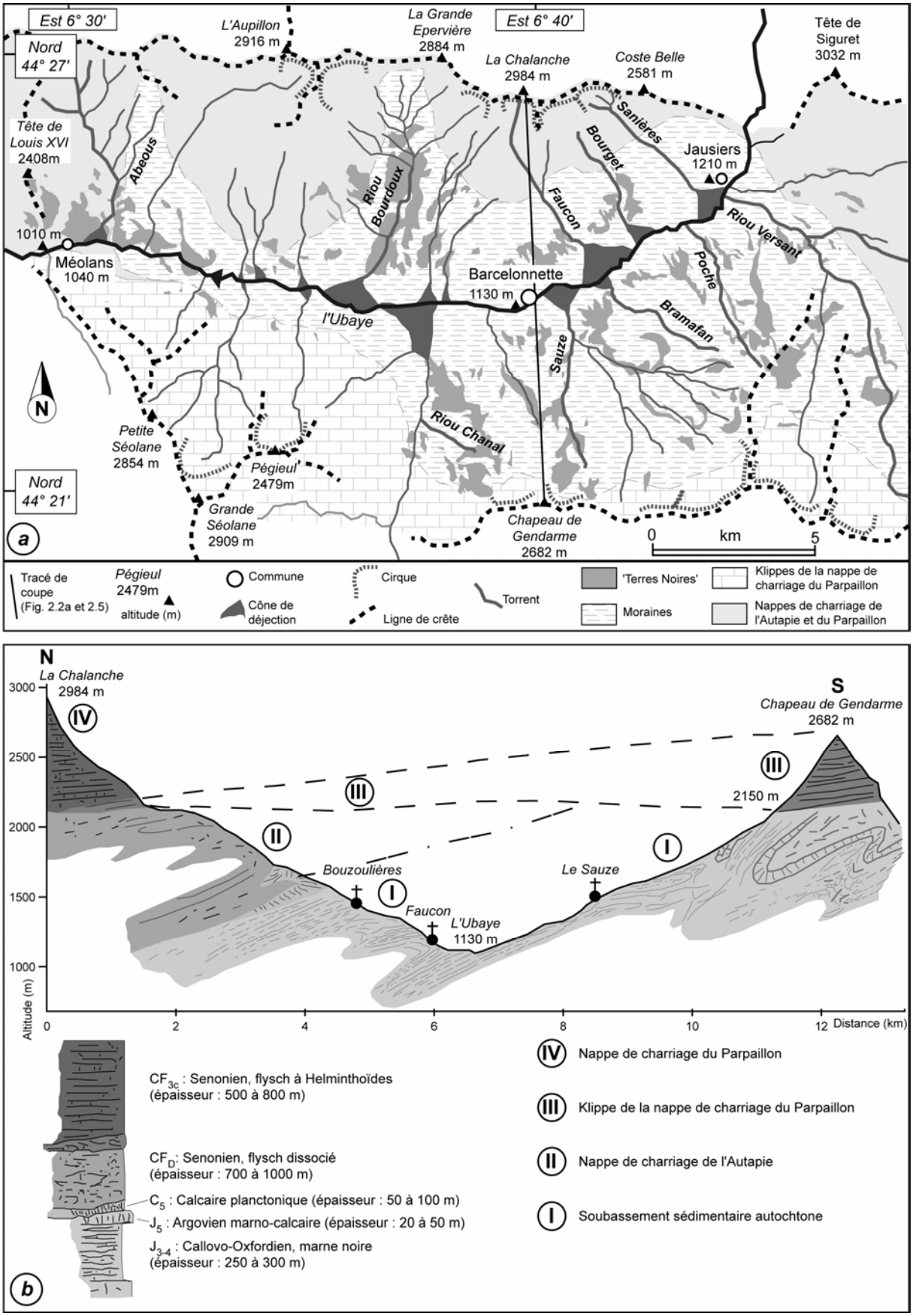


Figure 2.2 *: Morpho-structure du bassin de Barcelonnette.*

a : esquisse géomorphologique ;
b : coupe géologique Nord-Sud de la fenêtre tectonique de Barcelonnette (modifiée de Maquaire et al., 2003).

Les torrents ont entaillé des vallées profondes et étroites et développé **des cônes de déjection** imposants dans le fond de la vallée, large d'environ 1500 m (Ballandras et Névière, 1991 ; Miramont, 1998 ; Remaître *et al.*, 2002, 2005a). Le cours de l'*Ubaye*, qui s'étale largement dans son lit, suit une pente moyenne de l'ordre de 0.8%. En plus de l'*Ubaye* et de la rivière torrentielle du *Bachelard*, trente-deux appareils torrentiels (vingt en rive gauche et douze en rive droite de l'*Ubaye*) jalonnent la vallée. La toponymie locale fait apparaître le terme de *Riou*[8], comme le *Riou Bourdoux* (le boueux), le *Riou Chanal*, etc. Les premiers témoignages concernant l'activité torrentielle dans le bassin de *Barcelonnette* remontent au début du 18ème siècle, et depuis cette date les torrents débordent régulièrement (Sivan, 2000).

Outre l'activité torrentielle, le bassin de *Barcelonnette* est affecté par de nombreux **mouvements de terrain**. Légier (1977) décrit plus d'une centaine de glissements, dont trente sept auraient un degré d'activité moyen à rapide. Ils concernent principalement les '*Terres Noires*', mais également les nappes de charriage et les couvertures morainiques et détritiques.

2.1.1. Le contexte morphostructural : la 'fenêtre' de Barcelonnette

La moyenne *Ubaye* comprend plusieurs ensembles structuraux de la zone interne subbriançonnaise superposés, organisés en un vaste anticlinorium déversé vers le Sud-Ouest (Légier, 1977). La nature des formations et la dissymétrie des versants sont en relation étroite avec l'histoire tectonique du bassin. L'effacement du socle cristallin externe entre l'*Oisans* et le *Mercantour* (Fig. 2.3) a permis l'avancée de nappes de charriage sur les terrains sédimentaires externes sur près de trente kilomètres (Evin, 1997). Le déplacement des nappes s'est effectué sous la forme de grandes vagues déferlantes à l'échelle des temps géologiques (déplacements de quelques millimètres à quelques centimètres par an).

Selon une transversale Ouest-Est (Fig. 2.3), entre *Rhône* et *Pô*, on peut diviser les Alpes du Sud en deux domaines distincts (Evin, 1997) :

- le domaine externe, comporte les massifs cristallins externes (*Argentera-Mercantour* et *Ecrins*), non représentés en *Ubaye*, et la zone dauphinoise formée de terrains autochtones ;
- le domaine interne, est formé de nappes et inclut : les zones briançonnaise et subbriançonnaise au centre, la zone piémontaise à l'extrême est.

Les nappes de l'*Embrunais-Ubaye* font partie intégrante du domaine interne. Elles sont composées de deux nappes lithologiquement différentes (Fig. 2.3 et 2.4) :

- la nappe inférieure au Sud de *Barcelonnette*, dite nappe de l'*Autapie*, est composée de **flyschs à Helminthoïdes**[9] et/ou de **flyschs dissociés** (schistes noirs, calcaires gréseux et brèches siliceuses). Elle repose directement sur les terrains autochtones ;
- au Nord de *Barcelonnette*, la nappe du *Parpaillon* recouvre en partie la nappe de l'*Autapie*, mais sur certaines zones, elle repose en discordance sur les terrains autochtones. Les faciès sont essentiellement des **flyschs à Helminthoïdes**, des **grès de l'*Embrunais*** et **des schistes noirs**. La destruction de la couverture autochtone (triasique et jurassique) a formé de nombreuses écailles constituant la zone *briançonnaise*.

---

[8] Noms par lesquels le provençal alpin désigne les torrents.

[9] Les Helminthoïdes sont des ichnofossiles, des traces de pas ou de progression d'un animal, semblables à des empreintes serpentiformes.

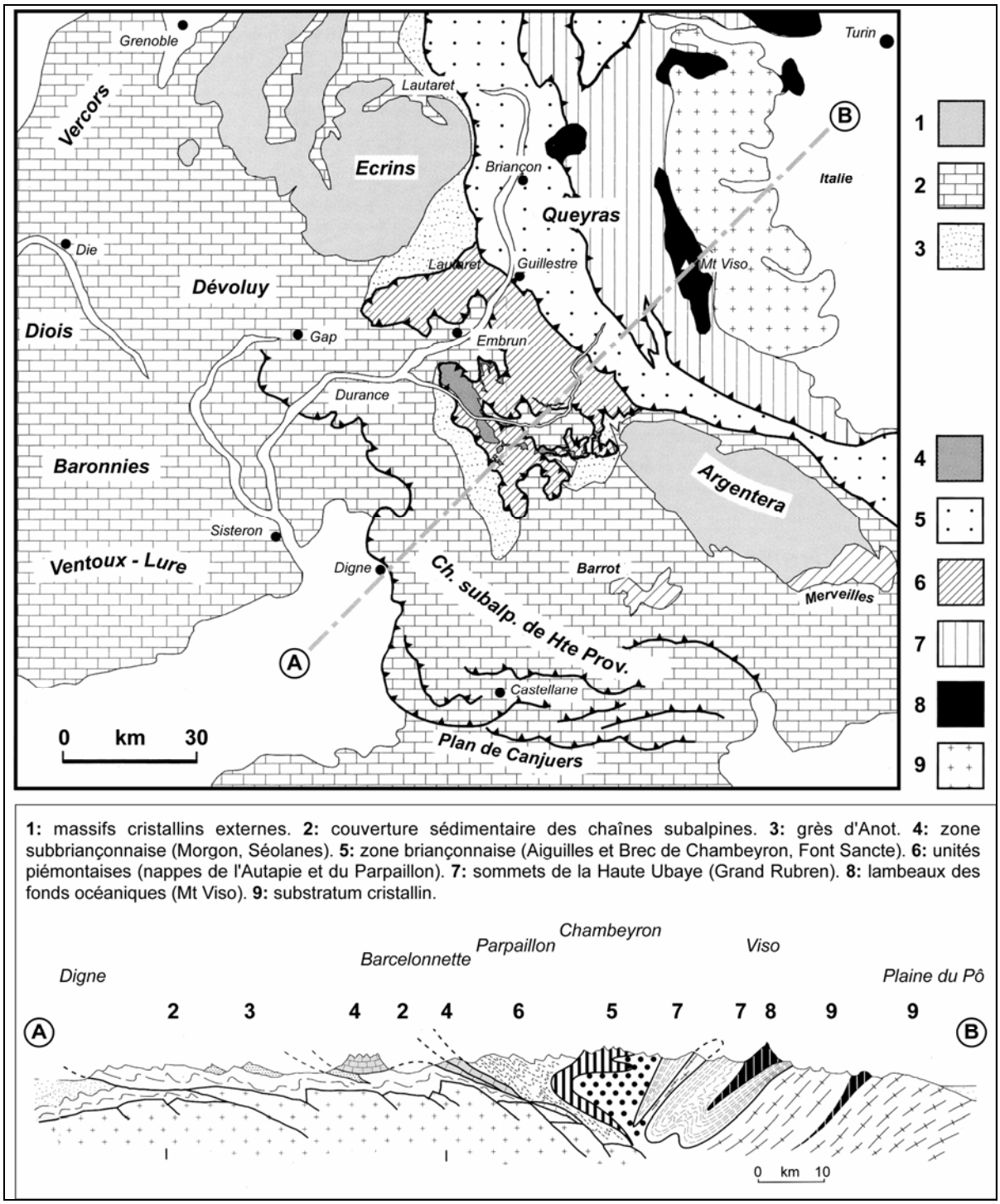


Figure 2.3 *: Croquis morphostructural et coupe géologique des Alpes du Sud (d'après Evin, 1997).*

Les nappes de charriage du domaine interne, lors de leur déplacement d'est en ouest, ont incorporé des fragments rocheux de terrains sous-jacents à la manière d'un rabot. Ces fragments rocheux collés à la base des nappes (**écailles**) et les lambeaux des nappes de l'*Autapie* et du *Parpaillon* (**klippes**) arment la majorité des crêtes méridionales (**versant ubac**) du bassin de *Barcelonnette*. Parmi ces crêtes citons entre autres *la Grande Séolane* (2909 m), *le Pégieul* (2479 m) ou encore *le Chapeau de Gendarme* (2682 m). Les crêtes septentrionales (**versant adret**) du bassin de *Barcelonnette* sont armées massivement par les nappes de l'*Embrunais-Ubaye*. Parmi ces crêtes citons entre autres *la Tête de Louis XVI* (2408 m), *l'Aupillon* (2916 m), *la Chalanche* (2984 m) ou bien encore *la Grande Epervière* (2884 m).

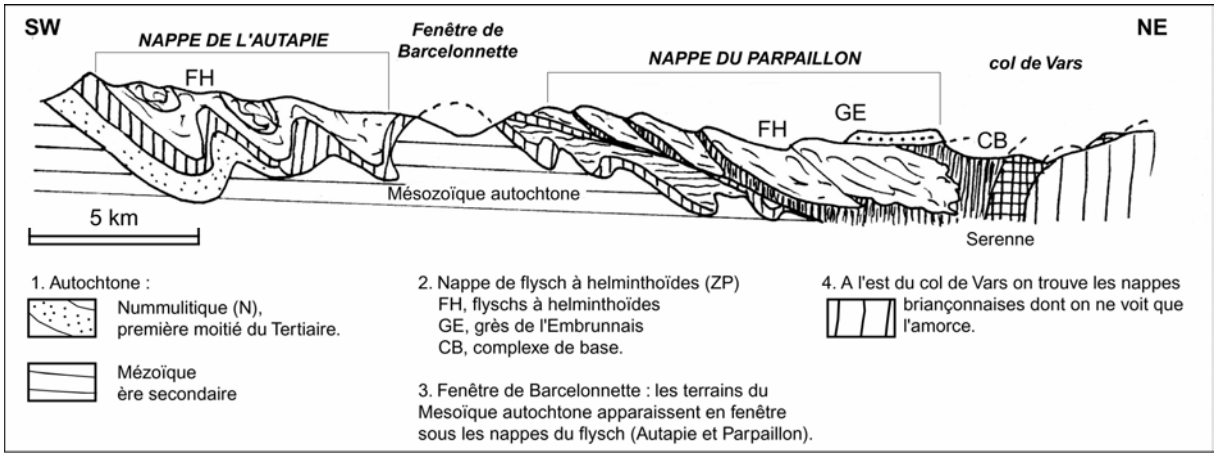


Figure 2.4 *: Coupe géologique de la moyenne Ubaye (Evin, 1997).*

Les affleurements allochtones résistants sont très développés, à partir de 1600 m d'altitude. Les crêtes sommitales sont armées intégralement par la nappe du *Parpaillon* (Fig. 2.5), la plus récente et la moins déformée. La partie supérieure du versant, entre 1900 et 3000 m d'altitude, est armée par les écailles basales de la nappe du *Parpaillon* et la nappe de l'*Autapie*, avec divers faciès de flyschs.

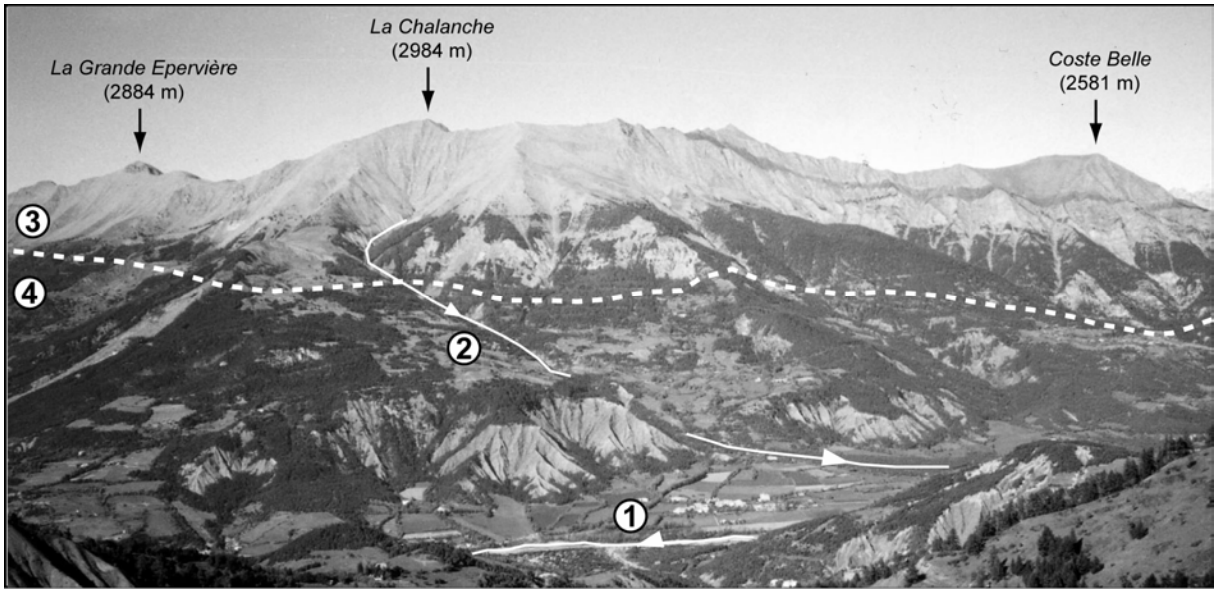


Figure 2.5 *: Vue sur le versant adret du bassin de Barcelonnette (Juillet 2004).*

1 *: l'Ubaye,* **2** *: torrent de Faucon,* **3** *: nappes de charriage (allochtones),* **4** *: marnes noires (autochtones).*

L'érosion différentielle a dégagé une **fenêtre tectonique dans les nappes**, laissant apparaître **les terrains autochtones** du Mésozoïque. L'autochtone se présente comme une épaisse série sédimentaire s'étendant du Trias à l'Eocène supérieur. Les affleurements sont dans la grande majorité des cas les marno-calcaires de l'Argonien et surtout **les '*Terres Noires*' du Callovo-Oxfordien**.

Les '*Terres Noires*' sont constituées d'une succession d'assises argileuses et marneuses faillées et diaclasées, et marquées par de brusques et fortes variations de pendage (Plan, 1968 ; Légier, 1977). Elles atteignent 250 à 300 m d'épaisseur dans le bassin (Artru, 1972 ; Awongo, 1984).

Quatre sous-ensembles d'épaisseurs variables peuvent y être distingués (Awongo, 1984 ; Maquaire *et al.*, 2003) :

- les quelques rares affleurements de marnes noires de l'Argovien (20-30 m) ;
- les marnes noires de l'Oxfordien supérieur (80-150 m) ;
- les marnes noires de l'Oxfordien inférieur et moyen (150-200 m) à bancs centimétriques de calcaires argileux et ;
- les marnes schisteuses à plaquettes détritiques du Callovien (80-100 m).

Leurs limites imprécises et les recouvrements par les formations quaternaires ne permettent pas de les cartographier séparément sur les figures 2.2a et 2.2b. La macrostructure du substratum marneux, la microstructure des marnes noires et leur minéralogie expliquent en partie leur susceptibilité élevée à l'érosion et aux mouvements de terrain (Malet, 2003).

2.1.2. L'héritage glaciaire

La structure géologique initiale du bassin de *Barcelonnette* a été fortement remodelée par le glacier de l'*Ubaye* et par de nombreux petits affluents (Fig. 2.6) lors de la dernière glaciation quaternaire au Pléniwürm (15 à 20 000 B.P.). Long d'une soixantaine de kilomètres, et épais d'environ 600 à 800 m (Fig. 2.6), le glacier de l'*Ubaye* a creusé de nombreux ombilics, tel celui de *Barcelonnette*, comblés de nos jours par les alluvions de l'*Ubaye* (Jorda, 1980 ; Assier, 1993). Le glacier était latéralement alimenté par des petits glaciers affluents (*Abriès*, *Clapouse*, *Terres-Plaines*, *Brecs*, *Bachelard*).

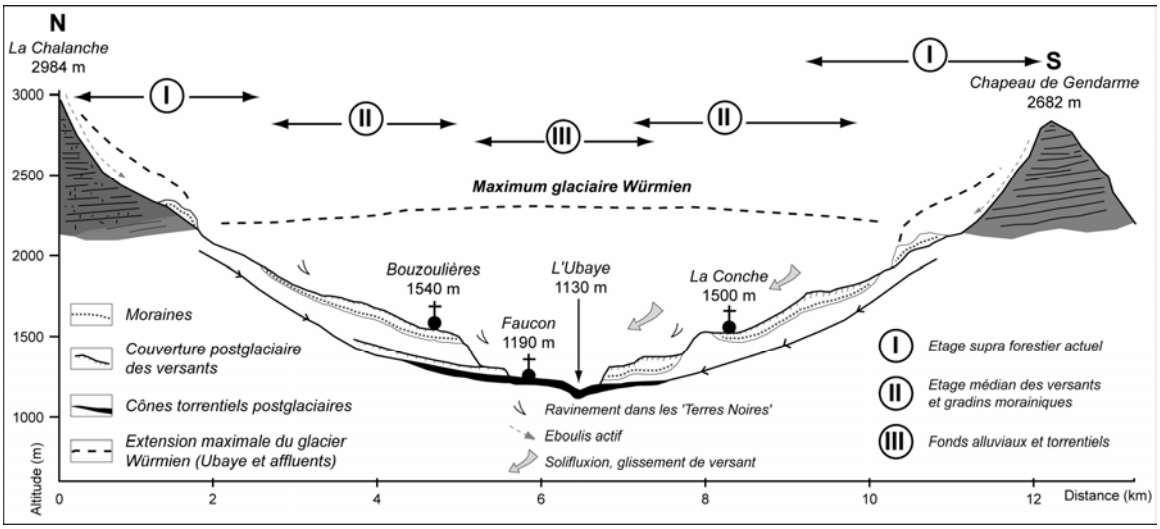


Figure 2.6 *: Extension latérale du glacier de l'Ubaye, localisation des dépôts glaciaires et morphodynamique dans le bassin de Barcelonnette (Jorda, 1980).*

Les formes glaciaires, nombreuses et variées (terrasses, glaciers rocheux, arcs et cordons morainiques, roches moutonnées), jalonnent l'ensemble de la vallée. Les formations glaciaires masquent une grande partie des affleurements marneux (Fig. 2.2a) sur des épaisseurs pouvant atteindre une vingtaine de mètres. Les dépôts glaciaires et périglaciaires sont très riches en matrice fine de teinte beige claire à gris foncé (Flageollet *et al.*, 1999). Des blocs morainiques hétérométriques (de quelques décimètres cubes à quelques dizaines de mètres cubes) jonchent les fonds de vallons ou les versants, en particulier sur l'ubac. Reposant sur le substrat marneux imperméable, ces formations morainiques sont souvent affectées par des mouvements superficiels (Légier, 1977 ; Mulder, 1991). Ces formations particulièrement instables fournissent une partie de la charge des torrents lors des crues, et sont impliquées plus ou moins directement dans des glissements de terrain (*La Valette, Super-Sauze*).

2.1.3. Evolution historique du couvert forestier et de l'anthropisation

La répartition des essences végétales dans le bassin de *Barcelonnette* est fortement lié aux caractéristiques du régime climatique. L'étagement de la végétation s'organise de manière classique en milieu montagnard, depuis l'étage collinéen dans le fond de la vallée jusqu'à l'étage alpin.

Les feuillus colonisent le fond des vallées, et laissent les versants adret et ubac, aux conditions écologiques particulières, à des essences mieux adaptées : les résineux. A l'image de bon nombre de vallées intra-alpines les ubacs ont un couvert forestier plus dense, et la limite supérieure de la végétation est plus élevée (Fig. 2.7).

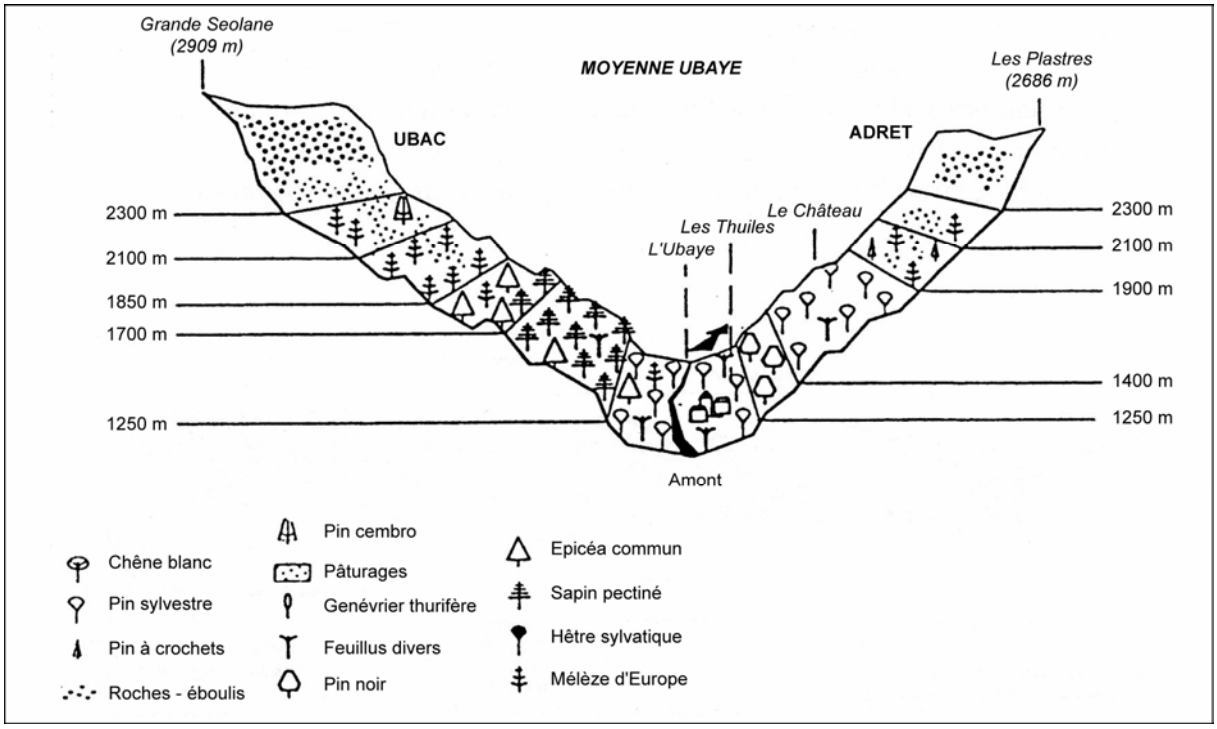


Figure 2.7 *: L'étagement de la végétation de la Moyenne Ubaye (Chondroyannis, 1992).*

La particularité du paysage forestier de la vallée de l'*Ubaye* se résume en trois éléments principaux (Sivan, 2000) : la quasi-exclusivité des résineux (pins noirs d'*Autriche*, pins cembros, mélèzes, pins à crochets), **le contraste marqué adret-ubac,** et l'importance des boisements d'origine artificielle. L'évolution du milieu naturel dans le bassin de *Barcelonnette* est lié à deux facteurs principaux : **climat et activité anthropique**.

Les recherches menées par l'équipe de Maurice Jorda ont mis en évidence les principales étapes de l'évolution biomorphoclimatique postglaciaire régionale (Jorda, 1992 ; Miramont, 1998 ; Sivan 2000). L'évolution actuelle a débuté vers la fin de la période Atlantique, au début du Subboréal, où les conditions de la morphogénèse se modifient radicalement. La tendance au remblaiement observé durant les périodes précédentes (Remblaiement Holocène Principal et la Pédogénèse Atlantique) s'atténue progressivement pour laisser place à une forte reprise de l'incision verticale et à une recrudescence du ravinement.

Cette 'révolution' morphogénique résulte en partie des modifications climatiques du début du Subboréal, marquées par une diminution des précipitations et l'instauration d'un climat perturbé (oppositions saisonnières plus tranchées, pluies moins fréquentes mais plus intenses, répartition interannuelle des pluies très inégales).

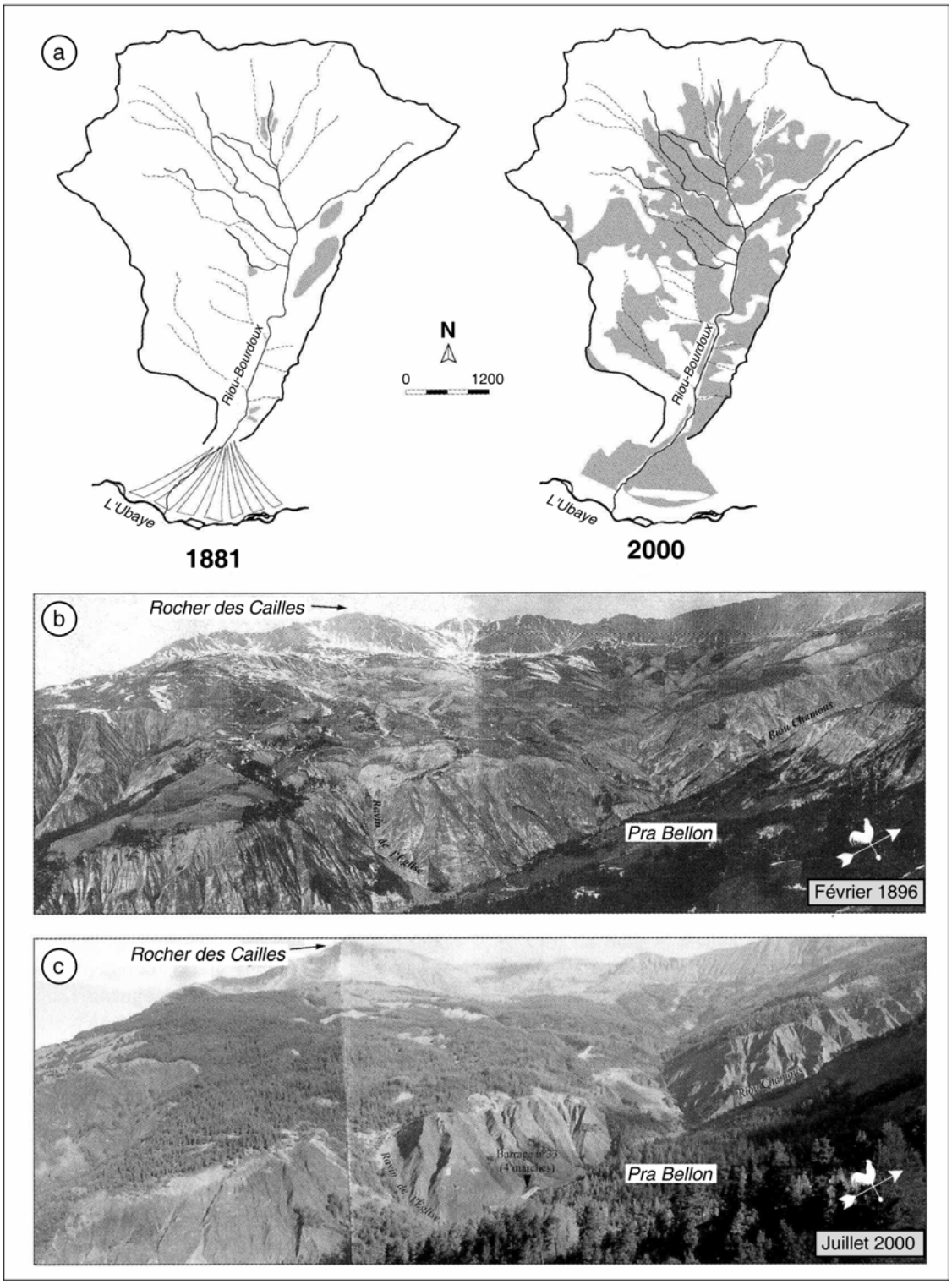


Figure 2.8 *: Evolution du couvert forestier du Riou-Bourdoux (modifiée de Delsigne et al., 2001).*

a : comparaison de l'extension forestière du Riou-Bourdoux entre 1881 et 2000 ;
b : photographie du versant de la rive droite du Riou-Bourdoux en 1896 ;
c : photographie du versant de la rive droite du Riou-Bourdoux en 2000.

Mais ces modifications climatiques, qui n'ont pas pu induire rapidement des changements notables dans la couverture forestière, paraissent insuffisantes à expliquer l'agressivité érosive observée durant cette période (Jorda, 1992). L'intervention humaine précoce sur le couvert végétal explique en grande partie cette évolution. Les investigations pédologiques

ont mis en évidence l'apparition précoce d'incendies anthropiques qui, combinés à l'essartage sur les versants et aux pratiques pastorales, ont fortement contribué à l'augmentation de l'activité torrentielle dans le bassin de *Barcelonnette*. Cette évolution a été observée dans l'ensemble des Alpes-de-Haute-Provence (Jorda, 1980).

Les premières traces discrètes de l'homme dans le bassin de *Barcelonnette* apparaissent vers la fin du Néolithique. Mais c'est véritablement au cours de l'époque romaine que les populations vont venir coloniser le bassin. Cette période coïncide avec une période d'accalmie de l'activité torrentielle (Arnaud, 1890 ; Sivan, 2000). De ce fait, les populations vont s'installer majoritairement dans le fond de vallée, aux débouchés des torrents (*Les Sanières*, *Bourget*, *Faucon*, *St-Pons*, etc.). Elles vont rapidement cultiver les terres très fertiles des cônes de déjection. Cette tendance va s'accentuer au cours du Moyen Age, où l'augmentation croissante de la pression anthropique va avoir pour conséquence une intensification de l'activité agropastorale et des défrichements. Ces défrichements vont atteindre leur apogée à la fin du XVIIIe siècle et au début du XIXe siècle. A cette époque, le couvert forestier est alors devenu rare dans la vallée, cette absence généralisée de couvert va alors être désignée par de nombreux auteurs comme l'incontestable cause de la recrudescence de l'activité torrentielle au début du XIXe siècle (Sivan, 2000).

Pour lutter contre les innombrables manifestations des torrents, les forestiers ont donc entrepris un travail de longue haleine, la restauration des forêts, des pâturages, et d'une manière plus générale des terrains de montagne. Les travaux, d'une ampleur considérable, ont débuté en 1864, sous l'autorité du forestier Pierre Demontzey (Chondroyannis, 1992). Ces travaux ont constitué essentiellement à reboiser (Fig. 2.8) les zones défrichées aux cours des derniers siècles (près de 11 000 ha reboisés de 1864 à 1950), et à mettre en place puis entretenir un réseau d'ouvrages torrentiels (digues, seuils, canalisation, etc.). Ils sont actuellement à la charge des services de la RTM.

L'anthropisation actuelle est dominée par les activités touristiques, estivales et hivernales et l'implantation de plusieurs stations de skis (*Sauze*, *Super-Sauze*, *Pra-Loup*). L'essor touristique a nécessité la mise en place d'un réseau routier moderne pour permettre un trafic fluide le long de l'*Ubaye*. Les communications et l'accès aux vallées voisines restent délicats car nécessitant le franchissement de hauts cols longtemps enneigés. Au bord de l'*Ubaye*, la ville de *Barcelonnette* (3 600 habitants), offre les nombreux services d'une ville isolée. La ville de *Barcelonnette* ne constitue pas le seul enjeu de la vallée, de nombreux villages sont localisés sur les cônes de déjection comme les villages des *Thuiles*, de *St-Pons*, de *Faucon-de Barcelonnette*, *Jausiers*, etc.

2.1.4. Conclusion

Les caractéristiques générales du bassin de *Barcelonnette* mettent en évidence des **facteurs de prédisposition favorables** au développement de torrents à laves :

- des versants aux pentes fortes (> 20°), surtout en partie haute ;
- une lithologie associant des faciès différents et sensibles à l'érosion (marnes noires, calcaires et flyschs des nappes de charriage) ;
- de nombreux placages morainiques particulièrement instables et connectés plus ou moins directement aux organismes torrentiels ;

Associés à l'intense déforestation du XVIIIe siècle, ces facteurs de prédisposition ont favorisé le développement d'un réseau d'organismes torrentiels particulièrement dense (Sivan, 2000 ; Remaître *et al.*, 2002 ; Remaître *et al.*, 2005a).

2.2. Historique de l'activité torrentielle

De nombreux auteurs ont souligné l'importance de l'étude historique de l'activité torrentielle (Cai, 1992 ; Govi et Turitto, 1997 ; Crosta, 1998 ; Petrascheck et Kienholz, 2003). Elle est un préliminaire indispensable pour définir l'activité des torrents, les zones et les mécanismes de déclenchement préférentiels, le potentiel de destruction en termes de débordements et de dégâts, etc. L'objectif principal de cette section est de dresser un bilan de l'activité torrentielle dans le bassin de *Barcelonnette* (Tab. 2.1) pour replacer l'activité torrentielle dans un contexte plus général en comparant cette activité à celle d'autres torrents alpins en termes de rythme de production d'événements torrentiels.

Tableau 2.1 *: Constat préliminaire sur l'activité torrentielle (I) : historique de l'activité (I.1).*

Etapes	Objectifs	Moyens	Chapitre/ Section
I.1 : Historique de l'activité torrentielle	Définir les torrents les plus actifs dans un bassin de risque ; Déterminer des zones de déclenchement ayant déjà fonctionnées dans le passé ; Définir l'intensité des événements anciens et des dégâts associés.	Consultations d'archives ; Enquêtes auprès des populations et des services gestionnaires.	**§ 2.2**
I.2. Etude climatique	…	…	**§ 2.3**
I.3 : Etude des relations pluie/lave torrentielle	…	…	**§ 2.4**
I.4 : Morphologie et morphométrie des bassins versants	…	…	**§ 2.5**

2.2.1. Le recueil des données : sources et pertinence

Les données proviennent, dans la très grande majorité des cas, des archives du service RTM de *Barcelonnette* et des archives départementales et dans une moindre mesure des archives municipales de *Barcelonnette*, *Enchastrayes*, *Faucon-de-Barcelonnette* et de *Jausiers*. Une grande partie du travail de recueil, de dépouillement et de mise en forme des documents a été réalisée par Amiot et Nexon (1995).

Les documents disponibles correspondent à des comptes-rendus de visites sur le terrain après des évènements, à des fiches manuscrites, ou bien encore à des documents rédigés par des témoins fortuits d'un événement (Annexe 2). Le service RTM a mis en place depuis 1996, une base de données informatisée où chaque événement est répertorié sur une fiche individuelle. Les informations concernant la date de l'événement, le torrent concerné, les dégâts constatés et les éventuelles observations de terrain sont consignées sur ces fiches (Annexe 3).

Plusieurs difficultés caractérisent cette première étape et obligent à rester prudent quant à l'interprétation des données historiques :

- **l'absence de suivi régulier des torrents** introduit une sélection quant à l'intensité des événements répertoriés. Très logiquement, les épisodes ayant occasionné des dégâts ou ayant menacé d'en causer sont en général consignés ;

- **la qualification imprécise des événements torrentiels** ; les dégâts sont en général décrits plus précisément que les caractéristiques de la crue en termes de volume écoulé ou

de mécanismes de déclenchement. De ce fait, il est parfois malaisé de savoir si un épisode qualifié de 'lave torrentielle' en était effectivement bien une, ou si inversement telle ou telle 'crue torrentielle' archivée s'est produite sous forme de lave torrentielle ou « simplement » de charriage, ou d'écoulement hyperconcentré (Richard, 1995) ;

- **la fiabilité des témoignages** ; les mémoires des personnels locaux du service RTM, ou des témoins éventuels sont souvent plus fiables pour les épisodes récents (depuis les années 80). Par conséquent l'échantillon exploitable se compose en deux parties : des épisodes torrentiels, même anciens (antérieur à 1900), suffisamment importants pour avoir fait l'objet d'une description trop souvent qualitative, et des épisodes récents pour lesquels on dispose de descriptions détaillées (fiches informatisées) faites par les agents du service RTM, et parfois d'informations quantitatives.

Il faut garder à l'esprit que cette étude concerne un bassin fortement anthropisé. Plusieurs torrents ont été corrigés par les services RTM depuis le milieu du 19ème siècle. Cette correction torrentielle a été particulièrement intensive entre 1880 et 1920 (Sivan, 2000) et cela devra être pris en compte lors de l'analyse historique de l'activité torrentielle. Aux vues de ces incertitudes, la position adoptée a été :

- de considérer les événements torrentiels dans leur globalité (crues et laves torrentielles) pour avoir une vue synoptique de la torrentialité dans le bassin de *Barcelonnette ;*
- d'écarter les cas douteux pour les analyses plus fines, en sélectionnant une quinzaine d'événements bien renseignés et datés. Ceci a notamment été le cas dans l'analyse des pluies en relation avec la survenance d'une lave torrentielle.

Pour toutes ces raisons, il s'agira donc de considérer avec prudence et précaution les analyses et les développements présentés ci-dessous. Les données utilisées couvrent une période allant de 1850 à 2004. Pour la grande majorité des événements sont notifiés : le type d'écoulement, la date (année, mois et parfois jour), le(s) torrent(s) concerné(s), le type d'événement climatique associé, les dégâts éventuels.

2.2.2. Analyse historique des événements torrentiels

L'étude historique de la distribution temporelle des événements torrentiels permet d'estimer l'activité des torrents en termes de déclenchement de crues et de laves torrentielles. Les plus anciens événements rapportés datent du XIVème siècle (Sivan, 2000). Mais ce n'est qu'à partir de 1850 que les archives apportent des informations véritablement utilisables pour notre étude. En effet, les rares relevés avant 1850 ne permettent pas de situer la moindre crise torrentielle, car les relevés sont très peu abondants (moins d'une dizaine sur quatre siècles) et peu fiables.

Après 1850, sur les 561 références d'événements torrentiels, 66% indiquent le jour exact, 20% uniquement le mois, 10% uniquement l'année et 4% ne sont pas datés. Sur la période 1850-2004, les 561 événements torrentiels se répartissent en 461 crues torrentielles, et 100 laves torrentielles. 91% des laves torrentielles répertoriées dans le bassin se sont déclenchées dans les torrents localisés en rive droite de l'*Ubaye* (adret). Les torrents les plus actifs en termes de production de laves torrentielles (Fig. 2.9[10]) sont les torrents de : *Riou Bourdoux* (27 laves torrentielles), *Sanières* (18), *Faucon* (14), *Abeous* (7) et *Bourget* (6) (Amiot et Nexon, 1995 ; Remaître *et al.*, 2005a). A eux cinq, ces torrents concentrent 72% des laves torrentielles recensées sur l'ensemble du bassin.

[10] La figure 2.9 est disponible en planche hors texte en format A3.

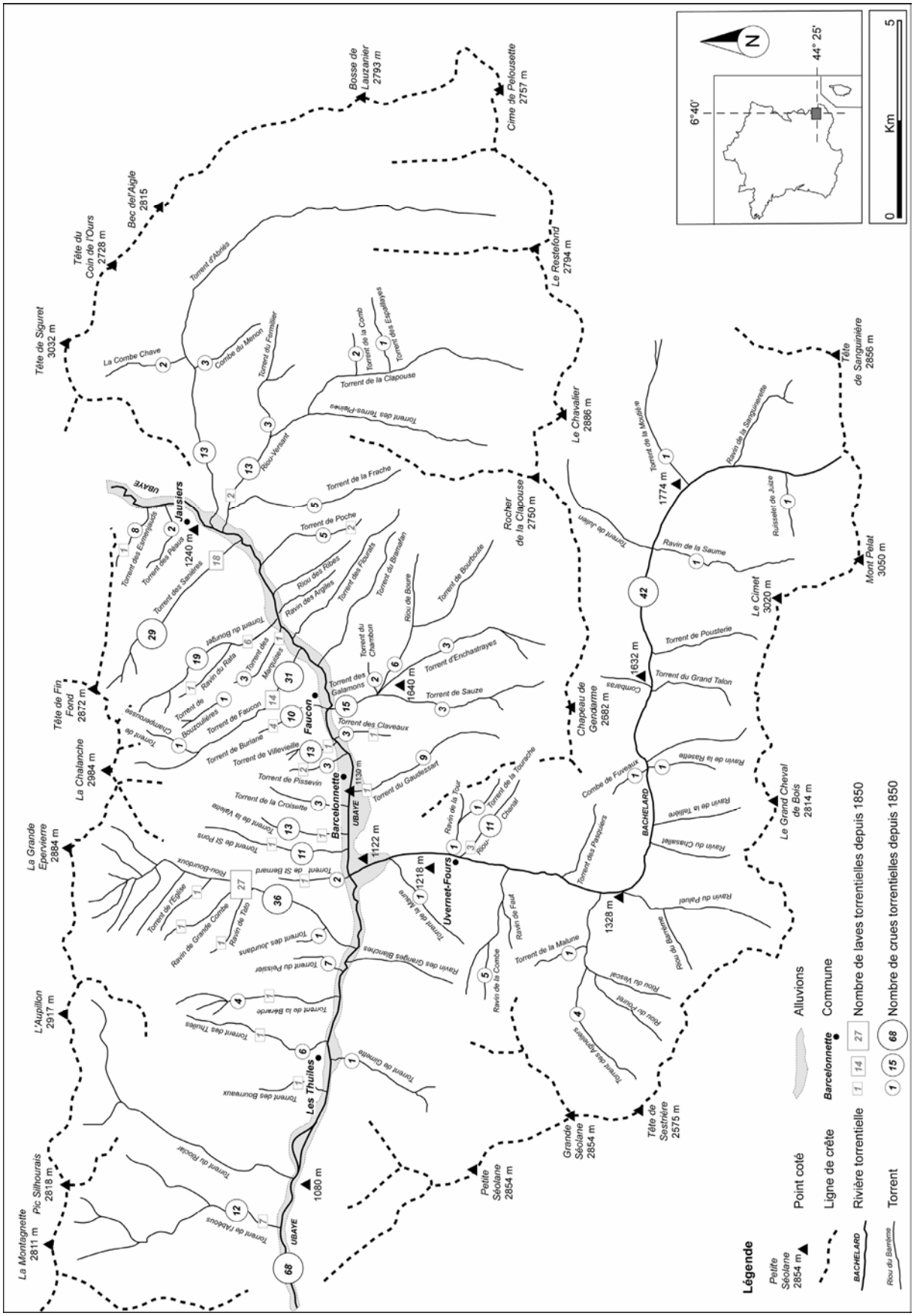


Figure 2.9 *: Carte de localisation des torrents du bassin de Barcelonnette et de la vallée du Bachelard et historique torrentiel.*

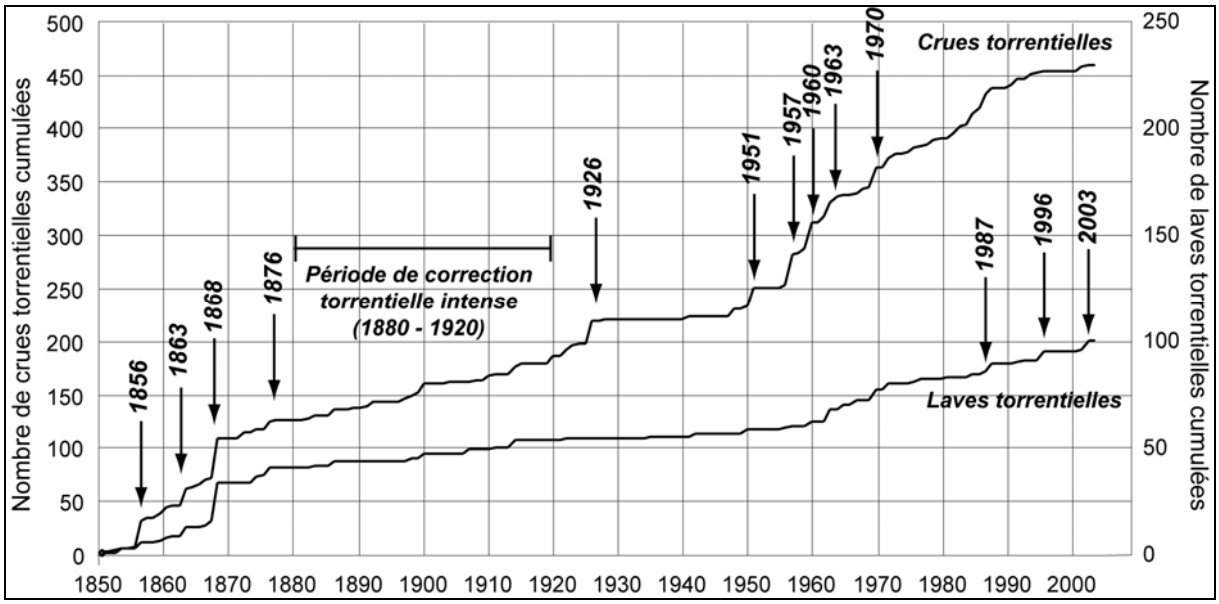


Figure 2.10 *: Fréquence cumulée des événements torrentiels dans le bassin de Barcelonnette (1850 – 2004).*

L'activité des cinq torrents les plus actifs est comparable à d'autres torrents à lave localisés dans les Alpes françaises (Tab. 2.2). L'activité torrentielle du *Riou Bourdoux,* par exemple, a été particulièrement forte : le temps moyen séparant deux événements sur ce torrent est compris entre deux et trois ans. Par contre, certains événements sont séparés l'un de l'autre par une trentaine d'années, d'autres s'enchaînant rapidement au cours d'une même année. En effet, plusieurs événements torrentiels se sont déroulés au cours d'une même période : l'année 1868 est de ce point de vue un exemple instructif (Fig. 2.10). Au cours de cette année 1868, 55 événements torrentiels ont été dénombrés conjointement dans plusieurs torrents, dont 18 laves. Ceci illustre l'irrégularité de la distribution temporelle des événements observés pour l'ensemble des torrents du bassin de *Barcelonnette*.

Tableau 2.2 *: Nombre d'événements torrentiels connus et temps séparant deux événements. Comparaison entre quatre torrents du bassin de Barcelonnette et d'autres torrents alpins.*

					Années séparant deux événements successifs	
Localisation	Torrent	Nombre d'événements			Valeur moyenne	Valeur extrêmes
		Crues	**Laves**	**Total**		
bassin de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence)	***Riou-Bourdoux***	**36**	**27**	**63**	**2.5**	**0-31**
	Sanières	**29**	**18**	**47**	**3.3**	**0-25**
	Faucon	**31**	**14**	**45**	**3.4**	**0-15**
	Bourget	**19**	**6**	**25**	**6.2**	**0-22**
	Abeous	**12**	**7**	**19**	**8.1**	**0-36**
Savoie	*Ravoire*	80			3.9	0-79
	Claret	66			3.2	0-19
	Rieu Sec	61			3.4	0-22
	Pousset	50			5.8	0-72
	Saint Martin	35			5.4	0-26
Hautes-Alpes	*Boscodon*	33			6.3	0-52
	Verdarel	15			17.3	1-302
	Sainte Elisabeth	13			21.1	4-215

La distribution temporelle des événements torrentiels (Fig. 2.11) montre que toutes les décennies ont au moins enregistré un événement torrentiel, mais on observe une succession

de périodes de crises où le rythme de production des événements torrentiels est très fort, et de périodes d'accalmie ou d'inactivité. Certaines périodes sont exceptionnellement actives, avec parfois près d'une dizaine d'événements au cours de la même décennie, comme par exemple les périodes **1850-1870**, **1920-1930** et **1950-2000**.

Généralement, les événements torrentiels recensés sont répartis équitablement entre les laves et les crues. Excepté la décennie 1870-1880, les décennies caractérisées par un nombre significatif de laves (au moins 5) sont toutes associées à un fort nombre de crues torrentielles (au moins 35), c'est le cas des décennies 1850-1860, 1860-1870, 1960-1970, 1970-1980, 1980-1990. A l'inverse, lors de la décennie 1950-1960 seules trois laves ont été recensées alors que parallèlement près de 58 crues ont été dénombrées. Le nombre de crues torrentielles a fortement diminué depuis la fin des années 1980, alors que le nombre de laves est resté relativement constant.

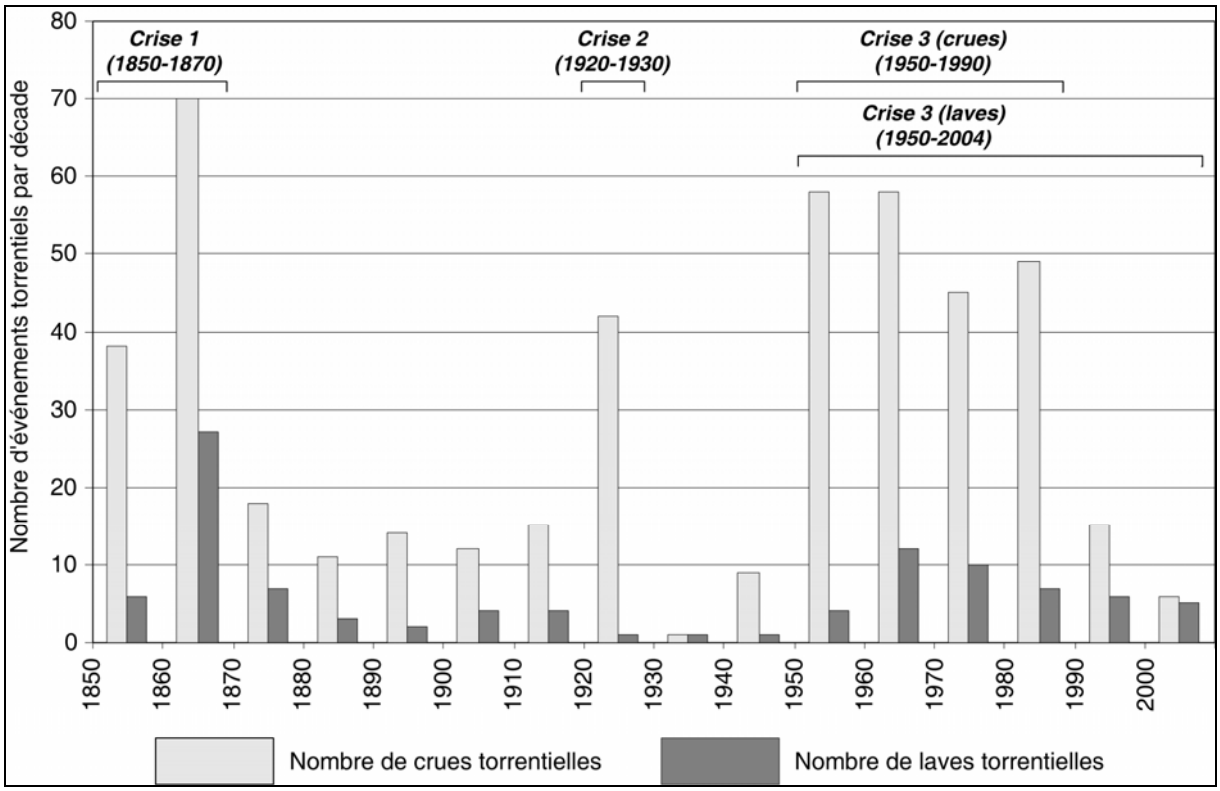


Figure 2.11 *: Répartition temporelle des événements (crues et laves) par décade pour les torrents du bassin de Barcelonnette.*

Quel est le sens des périodes de calme et de crise ? Trois hypothèses peuvent être envisagées pour expliquer ces alternances :

- **Les limites d'une telle approche historique**. La qualité de l'information contenue dans les archives a pu être subordonnée à l'intérêt que les forestiers ont porté aux problèmes torrentiels dans le bassin de *Barcelonnette* (Sivan, 2000). Il en découle que des lacunes peuvent exister dans ces archives, qui pourraient notamment expliquer les très longues périodes à priori 'sans événement'. Ceci est particulièrement vrai entre 1914 et 1945, avec les deux guerres mondiales. Durant cette période, l'action des services RTM a été fortement perturbée, car la restauration des terrains ne constituait plus une priorité pour les autorités (Delsigne *et al.*, 2001).

- **L'efficacité de l'intensive correction des torrents entre 1880 et 1920**. Ceci expliquerait la relative accalmie observée durant cette période (Richard, 1995). Mais d'autres études ont

montré que la période 1920-1950 a connu une baisse significative de la fréquence des événements torrentiels un peu partout en Europe (Corominas et Moya, 1996).

▪ **La distribution temporelle des événements torrentiels liée aux variations climatiques et plus particulièrement aux variations des conditions pluviométriques.** En effet, de nombreux auteurs ont souligné l'importance des paramètres climatiques dans le déclenchement des crues et des laves torrentielles (Takahashi, 1991 ; Reid *et al.*, 1997 ; Bonnet-Staub, 1998 ; Dai *et al.*, 1999 ; Berti *et al.*, 2000).

Il est difficile de fournir une réponse définitive à ce problème de succession de périodes de calme et de crise. Par contre, l'action de la correction torrentielle semble avoir été efficace, car la crise torrentielle entre 1850 et 1870 n'a pas connue d'égale après les travaux de correction. De plus, on peut aussi supposer que la reprise de l'activité torrentielle à partir de 1950 soit liée à une dégradation des ouvrages de correction (remplissage, déchaussement des seuils torrentiels, etc.). Cependant, il peut être également envisagé que, durant ces périodes, les conditions climatiques aient pu favoriser le déclenchement d'événements torrentiels (ce qui sera vérifié par la suite).

2.2.3. Distribution saisonnière des événements torrentiels

Dans les bassins versants torrentiels, on observe une répartition saisonnière différente des événements torrentiels en fonction du type d'écoulement (Fig. 2.12). La distribution des crues torrentielles est relativement 'large' et bimodale : elles se produisent des mois de mai à novembre avec un premier pic en juin, et un deuxième pic en septembre et en octobre. En moyenne, 55% des crues torrentielles se déclarent durant la période estivale.

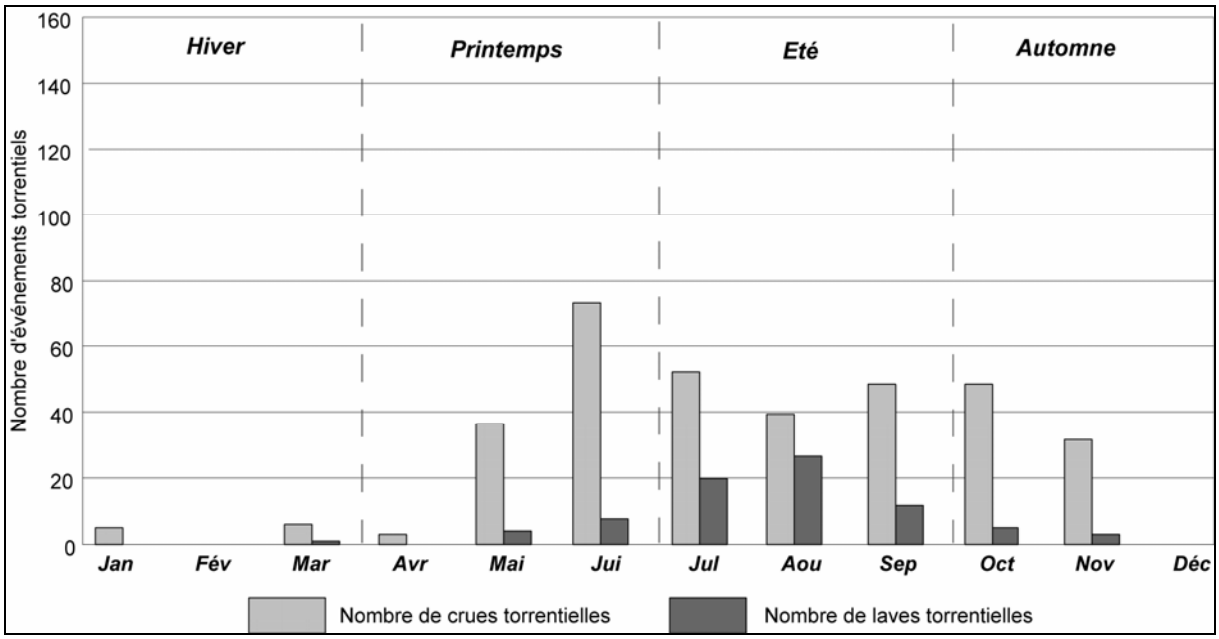


***Figure 2.12** : Répartition saisonnière des crues et des laves torrentielles dans le bassin de Barcelonnette (1850 – 2004).*

La distribution des laves torrentielles concerne quant à elle une période temporelle beaucoup plus 'resserrée' et est unimodale avec un pic en août. Elles se déclenchent ainsi dans leur très grande majorité en été (75%).

Cette forte fréquence des laves torrentielles en été se retrouve sur d'autres torrents alpins (Tab. 2.3), excepté les torrents situés dans les Alpes Maritimes (Bonnet-Staub, 1998).

Tableau 2.3 *: Fréquence des laves torrentielles pour différents torrents alpins.*

Département	Torrent	Nombre total de laves torrentielles recensées	Nombre de laves torrentielles survenus en été	% d'événements en été
Savoie[(1)]	Ravoire	80	64	80
	Claret	66	52	83
	Rieu Sec	62	42	69
	Pousset	50	36	72
	Saint Martin	35	27	77
Hautes-Alpes[(1)]	Verdarel	15	11	73
	Sainte Elisabeth	14	11	85
	Boscodon	33	26	79
Alpes-de-Haute-Provence	**Torrents du bassin de Barcelonnette**	**80**	**60**	**75**
Alpes-Maritimes[(1)]	Tuebi	23	8	35
	Salso Moreno	14	4	29

[(1)]les données sont issues de Bonnet-Staub (1998).

Ces résultats mettent en exergue l'importance du facteur climatique, et notamment du régime des précipitations sur le déclenchement des laves torrentielles. L'influence du régime de précipitations sur le déclenchement des laves torrentielles doit donc être définie à partir de l'étude fine à différentes échelles temporelles (annuelle, mensuelle, journalière et horaire) d'événements de laves torrentielles bien documentés.

2.3. Un climat agressif et favorable aux instabilités

Les **facteurs climatiques** sont très importants dans le déclenchement des laves torrentielles (§ 1.3.1.1.). Ces facteurs vont être à la fois des facteurs **préparatoires** qui vont '*préparer*' les matériaux et des facteurs **déclenchant** proprement dit. Cette étude des facteurs climatiques, et plus particulièrement des précipitations, constitue donc une étape importante (Tab. 2.4).

Tableau 2.4 *: Constat préliminaire sur l'activité torrentielle (I) : étude climatique (I.2).*

Etapes	Objectifs	Moyens	Chapitre/ Section
I.1 : Historique de l'activité torrentielle	…	…	**§ 2.2**
I.2. Etude climatique	Définir le contexte climatique général ; Déterminer les caractéristiques du régime pluviométrique à différentes échelles temporelles (annuelle, mensuelle, journalière, etc.).	Analyse statistique des données climatiques disponibles.	**§ 2.3**
I.3 : Etude des relations pluie/lave torrentielle	…	…	**§ 2.4**
I.4 : Morphologie et morphométrie des bassins versants	…	…	**§ 2.5**

L'essentiel de ce travail est basé sur **l'étude des précipitations** et non sur l'ensemble des facteurs climatiques. En effet, l'étude détaillée de la distribution des températures et de l'évolution du manteau neigeux n'a pu être entreprise. Leur rôle dans le déclenchement des laves torrentielles n'est certes pas négligeable, mais il reste beaucoup moins important que

le rôle des précipitations à l'échelle de l'événement (horaire et journalière) et des précipitations antécédentes (mensuelle) (Okuda *et al.*, 1979 ; Zimmermann, 1990 ; Julian et Anthony, 1993 ; Corominas et Moya, 1996). De plus, nous ne disposons pas de données sur des périodes suffisamment représentatives pour pouvoir les confronter notamment aux données historiques de l'activité torrentielle. Néanmoins, des informations sur les températures et le manteau neigeux sont données dans la section consacrée aux conditions climatiques générales. Seules **les précipitations totales** ont été étudiées d'une manière approfondie, car nous ne disposions pas des données nécessaires (températures, interception, etc.) sur l'ensemble des postes pluviométriques sélectionnés pour calculer les précipitations efficaces.

Cette étude des caractéristiques spatio-temporelles des précipitations sera ensuite comparée à l'historique de l'activité torrentielle afin de vérifier si des seuils de précipitations en termes de déclenchement de laves torrentielles sont identifiables dans le bassin de *Barcelonnette*.

2.3.1. Choix des postes et données disponibles

Les données analysées sont issues des six postes pluviométriques Météo France disponibles. Deux postes (*Barcelonnette*, *Jausiers*) sont situés dans l'axe du bassin et quatre postes sont localisés dans les alentours immédiats du bassin de *Barcelonnette* : *La Condamine et St-Paul* dans la *Haute Ubaye, Allos* dans la vallée du *Verdon* et *Uvernet-Fours* dans la vallée du *Bachelard* (Fig. 2.13 et Tab. 2.5).

Tableau 2.5 *Caractéristiques des postes pluviométriques de l'étude.*

	Poste	Altitude (m)	Distance au bassin versant de Faucon (km)	Date de mise en service
Bassin de Barcelonnette	*Barcelonnette*	1155	0.5	1925
	Jausiers	1510	6.8	1961
	Les Clots	1815	/	2001
	Sauze – La Rente	1680	7.2	1991
Haute Ubaye	*La Condamine*	1325	9.1	1955
	St-Paul	1903	25.8	1971
Vallée du Verdon	*Allos*	1370	18.9	1971
Vallée du Bachelard	*Uvernet-Fours*	1660	8.4	1955

Ces postes Météo France sont situés à des altitudes variables (de 1155 m à 1903 m), ce qui permet d'apprécier le rôle du gradient altimétrique sur les caractéristiques climatiques. Cette répartition spatiale des postes est intéressante car elle permet de se rendre compte des conditions pluviométriques sur un large espace à la topographie très contrastée. Mais, cette répartition est loin d'être parfaite, et souffre d'un manque de représentativité, car tous ces postes sont situés en partie inférieure des versants. Aucune information n'est donc disponible sur les parties supérieures des versants, et donc dans les bassins de réception des torrents.

C'est en partie pour cette raison qu'un pluviomètre chauffant a été installé en 1991 à la ferme de la Rente[11], sur le versant ubac du bassin de *Barcelonnette*, à proximité du glissement de terrain de *Super-Sauze*. De même, dans le cadre de cette thèse, un autre pluviomètre a été installé en 2001 *aux Clots* dans la partie supérieure du bassin versant du torrent de *Faucon*. Ces deux postes enregistrent les précipitations toutes les six minutes. Toutefois, les données de ces deux postes ne seront pas analysées avec les six autres postes Météo France en raison de leurs périodes d'observation trop réduites.

[11] Dans le cadre du programme *EPOCH* (The Temporal Occurrence and Forecasting of Landslides in the European Community).

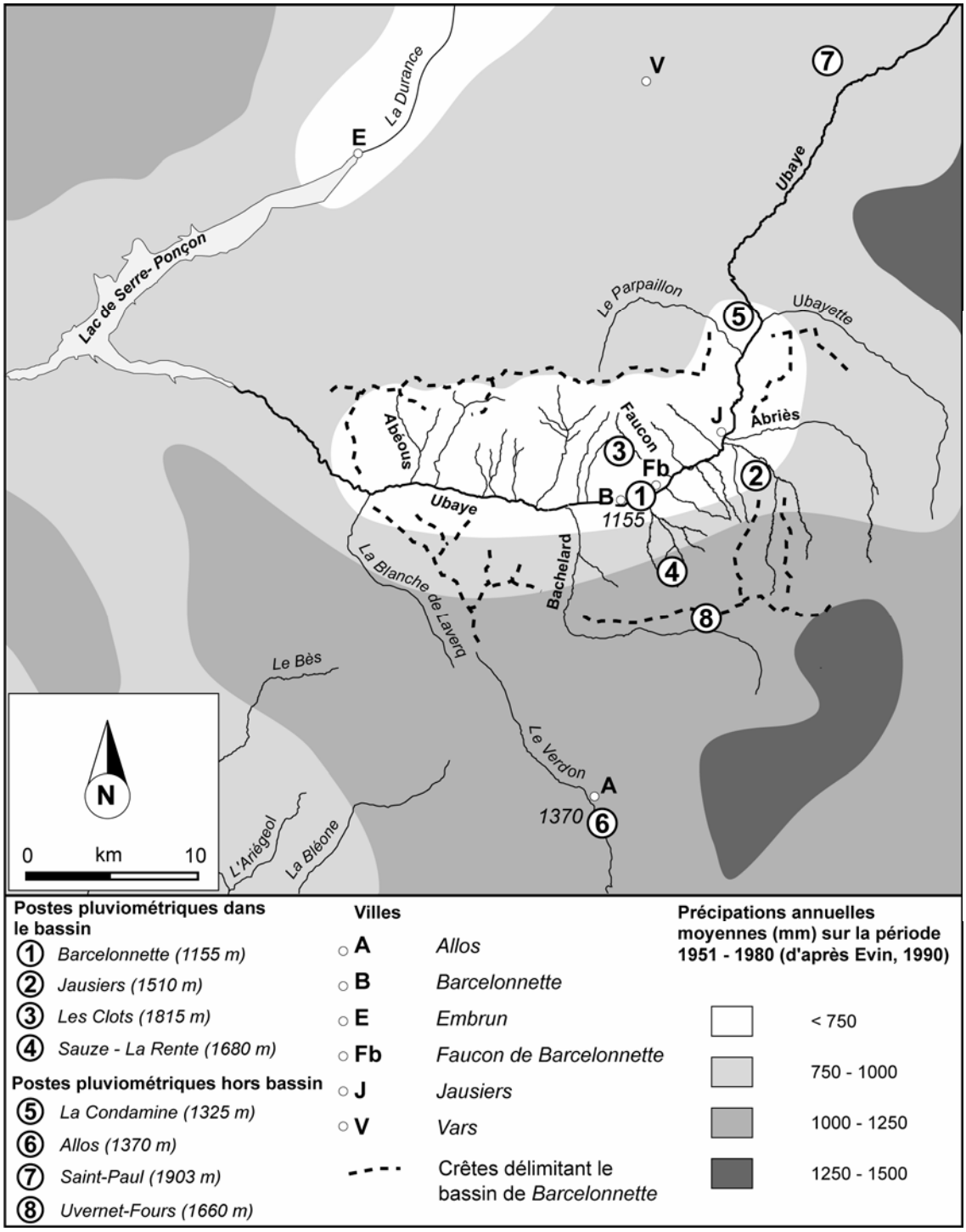


Figure 2.13 *: Localisation des postes pluviométriques et précipitations moyennes annuelles d'une partie des Alpes du Sud (modifiée de Flageollet et al., 1999).*

Dans le chapitre 1, il a été indiqué que les laves torrentielles surviennent fréquemment suite à des précipitations orageuses intenses et particulièrement localisées. Ce n'est donc pas tellement l'altitude du poste qui va être importante, mais ses caractéristiques topographiques (confinement, localisation dans les hauts des bassins de réception, dans une vallée, etc.).

Il convient donc de rester prudent quant à l'interprétation des données pluviométriques, car elles ne reflèteront que très partiellement ou pas du tout les conditions pluviométriques réelles rencontrées aux alentours des crêtes. Cette prudence devra être également de mise pour la confrontation entre les données historiques et climatiques.

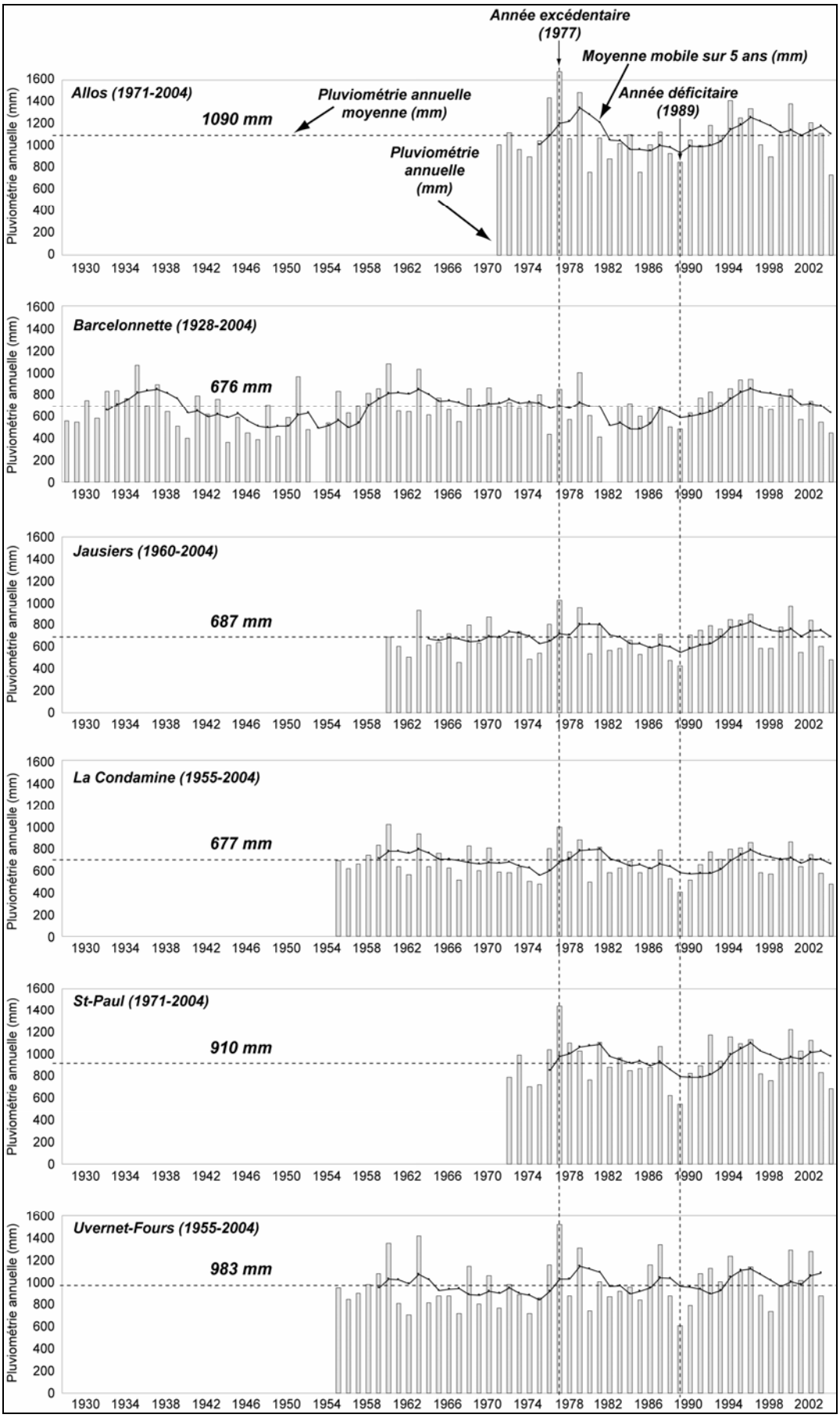


Figure 2.14 *: Pluviométrie annuelle pour les six postes pluviométriques de l'étude.*

Les données pluviométriques couvrent des périodes très variables en fonction des postes. La série la plus longue est celle de *Barcelonnette*, qui s'étend de 1925 à aujourd'hui. Certains postes ont changé de localisation durant la période de mesure, c'est notamment le cas des postes de *Barcelonnette* et de *Jausiers*, mais ces déplacements n'ont pas été très importants.

L'homogénéité et la qualité des données ont été vérifiées par Sommen (1995, 1996). Les données sont dans leur grande majorité des cas complètes, hormis la série de *Barcelonnette* où des lacunes parfois importantes apparaissent. C'est notamment le cas pour les années 1953 et 1982 (Fig. 2.14).

2.3.2. Conditions climatiques générales

Le bassin de *Barcelonnette* connaît un climat complexe. Il est avant tout **montagnard** de part sa température moyenne annuelle inférieure à 10°C et son enneigement hivernal de quatre mois. Néanmoins, une double influence modifie le climat, d'une part les précipitations qui connaissent un régime **méditerranéen** et d'autre part l'importante amplitude thermique annuelle (températures moyennes mensuelles inférieures à 0°C en hiver, et supérieures à 18°C en été) qui confère au climat un caractère **continental** (Fig. 2.15).

Les traits **méditerranéens** sont marqués par une sécheresse estivale, un fort ensoleillement (>2700 h.an^{-1}), de fortes températures diurnes et surtout une grande variabilité des précipitations inter-annuelles (735 ± 400 mm sur la période 1928-2004). Peguy (1947) note qu'il pleut seulement 228 mm en 1921, alors que 5 ans après, en 1926, il est tombé 1175 mm d'eau. Sur la figure 2.14 qui représente les précipitations annuelles pour les six postes de l'étude, cette variabilité inter-annuelle des précipitations est bien visible. Les moyennes mobiles des six postes montrent des évolutions remarquablement similaires sur les périodes considérées. Les précipitations annuelles se regroupent en un petit nombre de jours de pluies (103 jours en moyenne), centrées au printemps et au début de l'automne (épisodes pluvieux longs). Les saisons hivernales et estivales sont plus sèches. En été, l'essentiel des précipitations est lié à des orages violents et très localisés (Flageollet *et al.*, 1999 ; Remaître, 2000 ; Malet *et al.*, 2001).

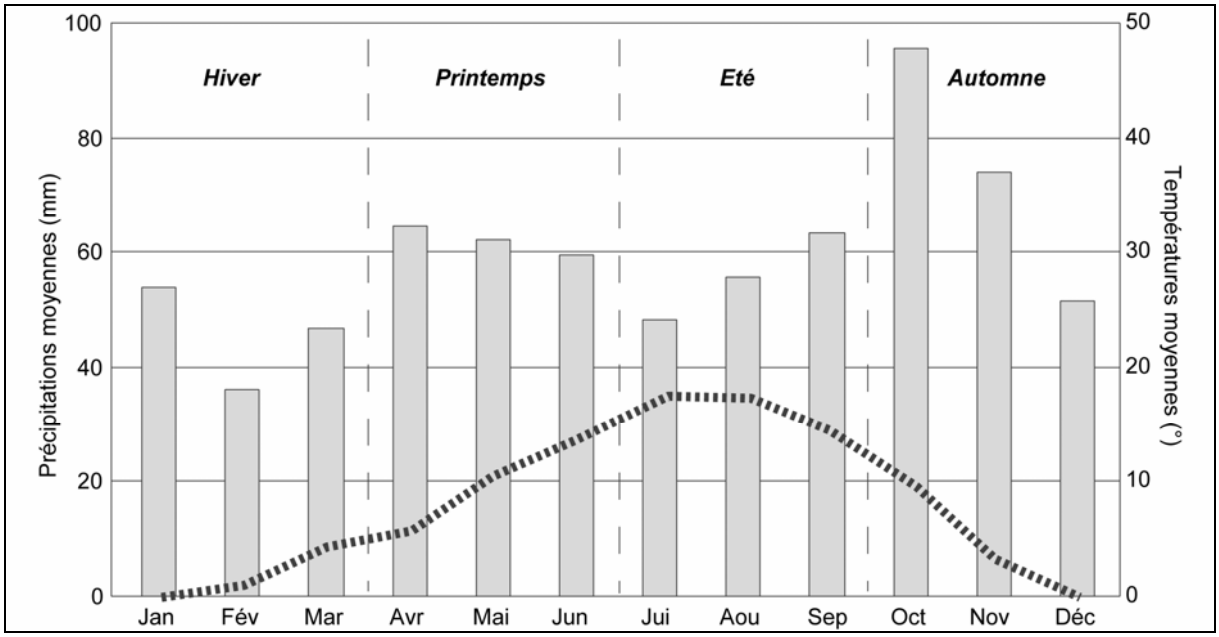


Figure 2.15 *: Diagramme ombrothermique de la station climatique de Barcelonnette (1975-2004).*

Les traits **montagnards** sont marqués par de faibles températures hivernales (près de 130 jours de gel par an) et d'importantes précipitations nivales dans les postes d'altitude. Le manteau neigeux peut persister jusqu'au mois de Juin durant certaines années. La température moyenne annuelle à 1140 m d'altitude (*Barcelonnette*) est de 9.5°C sur la période 1928-2004.

Les traits **continentaux** sont marqués par des réchauffements diurnes importants, de fortes amplitudes thermiques journalières, et un grand nombre d'alternance gel/dégel. Ces traits sont particulièrement renforcés par une opposition très nette entre l'adret et l'ubac, et par l'orientation générale Est-Ouest du relief (Malet *et al.*, 2003a). La principale conséquence de cette disposition est évidente : la durée du manteau neigeux sur le versant ubac est plus longue que sur le versant adret. La fonte plus rapide sur les adrets peut apparaître avec une étonnante soudaineté, entraînant parfois des apports d'eau soudains et considérables (Sivan, 2000).

2.3.3. Précipitations totales

Afin d'avoir une vue globale sur les caractéristiques des précipitations, la répartition spatiale et la distribution temporelle de la pluviométrie sont analysées successivement aux échelles inter-annuelle, annuelle, mensuelle et journalière.

2.3.3.1. Distribution annuelle et inter-annuelle

Le diagramme des précipitations moyennes mensuelles calculées sur trente années (1975-2004) pour les six postes pluviométriques (Fig. 2.16) montre que **le total annuel des précipitations est globalement peu élevé** (de 672 mm pour le poste de *La Condamine* à 1103 mm pour le poste d'*Allos*).

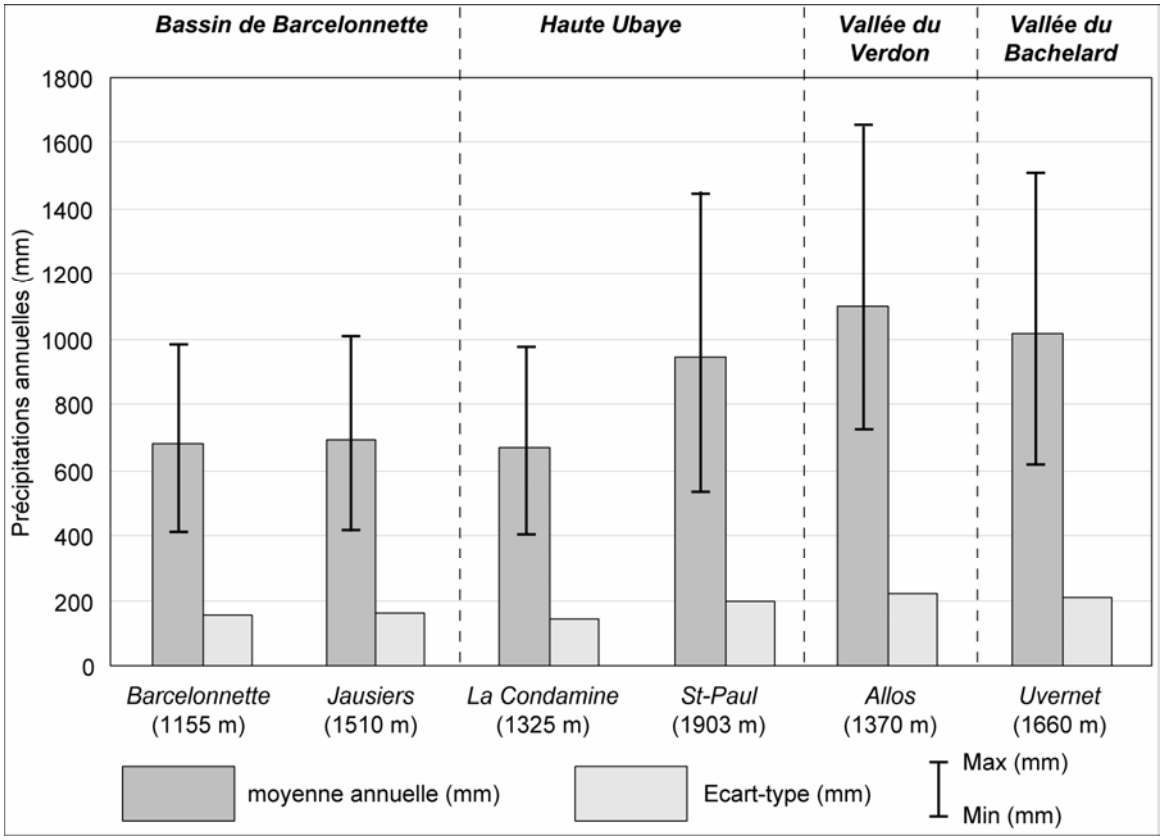


Figure 2.16 *: Caractéristiques des précipitations annuelles (période 1975-2004) pour les six postes pluviométriques.*

Les écarts-types sont assez importants (de 144 mm pour *La Condamine* à 223 mm pour *Allos*), et sont d'autant plus élevés que le volume pluviométrique annuel est important. Ces écarts-types importants indiquent une certaine variabilité inter-annuelle. Le poste de *Barcelonnette* fournit un bon exemple : il pleut 430 mm en 1976, 847 mm en 1977, 563 mm en 1978 et 994 mm en 1979 (Fig. 2.14). La comparaison des précipitations des différents postes ne permet pas d'établir de relations directes et simples avec l'altitude. Ainsi, les postes les plus hauts ne sont pas forcément les plus arrosés. Le poste d'*Allos* qui est en moyenne le plus arrosé n'est de loin pas le plus élevé (1365 m contre 1510 m pour *Jausiers* ou encore 1903 m pour *St-Paul*). Seule une étude climatique approfondie des paramètres de contrôle (exposition, localisation, etc.) permettrait de définir plus précisément leurs rôles respectifs, ce qui n'est pas l'objet de ce travail. Par contre, un net effet orographique apparaît car le régime pluviométrique relativement sec du bassin de *Barcelonnette* se distingue très nettement des trois autres postes limitrophes qui sont plus arrosés.

Les coefficients pluviométriques, définis par le rapport du module pluviométrique annuel (en mm) divisé par 365 jours, sont en moyenne de 2 à 3 mm/jour. Les valeurs des six postes sont proches des valeurs observées dans les départements des *Alpes Maritimes*, des *Hautes-Alpes* et de *Savoie* (Bonnet-Staub, 1998). Les indices pluviométriques extrêmes (pluviométrie maximale ou minimale sur 30 ans divisée par la pluviométrie annuelle moyenne sur la même période) sont relativement homogènes d'un poste à l'autre (Tab. 2.6).

Tableau 2.6 *: Modules pluviométriques annuels (1975-2004) et variations inter-annuelles (en mm).*

	Poste (altitude en m)	Module pluviométrique annuel (mm)	Valeurs extrêmes et années d'occurrence				Indices pluviométriques Extrêmes
			Min	Année	Max	Année	
Bassin de Barcelonnette	*Barcelonnette* (1155 m)	684	404	1981	994	1979	0.59 – 1.45
	Jausiers (1510 m)	695	424	1989	1027	1977	0.61 – 1.48
Haute Ubaye	*La Condamine (1325 m)*	***672***	***401***	1989	***992***	1977	0.60 – 1.46
	St-Paul (1903 m)	944	540	1989	1436	1977	0.57 – 1.52
Vallée du Verdon	*Allos* (1370 m)	**1103**	**732**	2004	**1671**	1977	0.66 – 1.52
Vallée du Bachelard	*Uvernet-Fours* (1660 m)	1018	609	1989	1520	1977	0.60 – 1.49

Les années excédentaires (Ip>1) sont moins fréquentes que les déficitaires. Les indices pluviométriques montrent que certaines années excédentaires ont reçu **jusqu'à 50% de précipitations en excès**. L'année 1989 est déficitaire pour quatre postes sur cinq, et de façon encore plus prononcée l'année 1977 est une année excédentaire pour cinq des six postes de l'étude (Fig. 2.14). Les moyennes mobiles distinguent la succession de périodes déficitaires et de périodes excédentaires qui durent entre 3 et 5 ans. La tendance actuelle (2000-2004) est dominée par une diminution plus ou moins régulière des pluies annuelles. Ceci a été également mis en évidence dans d'autres secteurs : en *Normandie* (Maquaire, 1990), dans les *Pyrénées* (Corominas, 2000) et dans les *Alpes* (Bonnard et Noverraz, 2001).

2.3.3.2. Distribution saisonnière et mensuelle

L'étude de la répartition mensuelle des précipitations (Fig. 2.17 et Tab. 2.7) montre que les régimes pluviométriques des six postes suivent globalement une même tendance, avec deux saisons 'sèches' en hiver et en été, et des précipitations abondantes en automne et dans une moindre mesure au printemps.

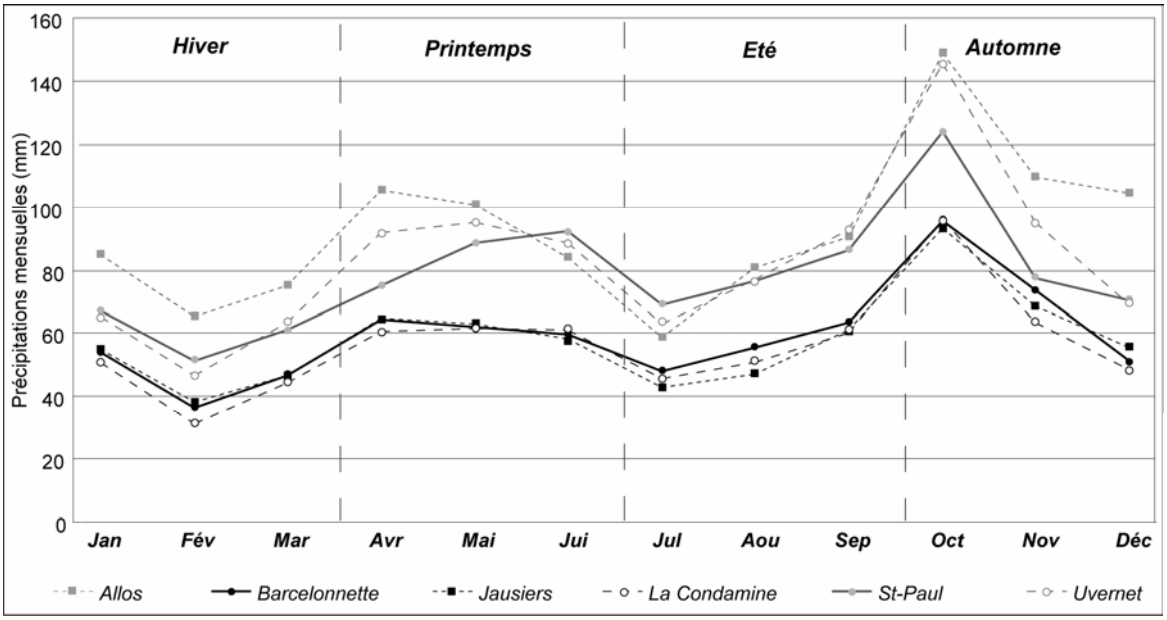


Figure 2.17 *: Précipitations moyennes mensuelles (période 1975-2004) pour les six postes pluviométriques.*

Tableau 2.7 *: Répartition saisonnière des précipitations (en pourcentage) et indicatif saisonnier pour quinze sites des Alpes.*

Département	*Poste (altitude en m)*	*Printemps*	*Eté*	*Automne*	*Hiver*	*Indicatif saisonnier*[1]
Savoie[2]	*Montpascal* (1400 m)	23.5	24	26	26.5	H-A-E-P
	St Martin la Porte (820 m)	21.4	22.3	28.5	26.7	A-H-E-P
	St Michel de Maurienne (850 m)	21.4	22.4	28.6	27.8	A-H-E-P
Hautes-Alpes[2]	*Monetier-les-Bains* (1490 m)	20	20.2	30.5	29.3	A-H-E-P
	Briançon (1324 m)	23	20.5	30.3	26.2	A-H-P-E
	Embrun (871 m)	23.3	23.5	28.8	24.4	A-H-E-P
Bassin de Barcelonnette	***Barcelonnette* (1155 m)**	**26.2**	**23.5**	**31.1**	**19.2**	**A-P-E-H**
	***Jausiers* (1510 m)**	**26.8**	**21.7**	**31.3**	**20.2**	**A-P-E-H**
Haute Ubaye	***La Condamine* (1325 m)**	**27.2**	**23.2**	**30.9**	**18.7**	**A-P-E-H**
	***St-Paul* (1903 m)**	**27.2**	**24.7**	**28.9**	**19.1**	**A-P-E-H**
Vallée du Verdon	***Allos* (1370 m)**	**26.2**	**20.8**	**32.7**	**20.3**	**A-P-E-H**
Vallée du Bachelard	***Uvernet-Fours* (1660 m)**	**27.7**	**23.4**	**31.2**	**17.7**	**A-P-E-H**
Alpes Maritimes[2]	*St Delmas le Selvage* (1510 m)	24.2	18.7	32.5	24.6	A-H-P-E
	St Etienne de Tinée (1144 m)	24.7	19.8	31.6	24	A-P-H-E
	Valberg (1674 m)	25.9	20.2	30.7	23.2	A-P-H-E

[1] A=automne, E=été, H=Hiver, P=Printemps ; les saisons sont nommées de la plus humide à la moins humide ;
[2] les données sont issues de Bonnet-Staub (1998).

Les saisons automnale et printanière recueillent entre 55 et 60% des précipitations annuelles. Le mois d'octobre est en moyenne le plus arrosé, avec une pluviométrie moyenne comprise entre 90 et 140 mm pour les six postes. Pour cinq des six postes (*Barcelonnette*, *Jausiers* et *La Condamine, St-Paul et Uvernet*) le mois le plus sec est février, qui ne recueille en moyenne que 30 à 55 mm. Pour le poste d'*Allos*, le mois le plus sec est le mois de juillet où il ne pleut que 60 mm en moyenne.

Pour les six postes, l'indicatif saisonnier est le même (*Automne-Printemps-Eté-Hiver*). Cette répartition est relativement singulière par rapport à d'autres sites alpins (Tab. 2.6) où l'indice *Automne-Hiver-Eté-Printemps* est le plus fréquent avec notamment des précipitations hivernales abondantes. C'est notamment le cas des postes en *Savoie* et dans les *Hautes-Alpes*.

La répartition saisonnière des pluies dans les *Alpes Maritimes* est par contre assez proche de celle observée sur les six postes de l'étude, avec une influence grandissante du climat méditerranéen se traduisant par un affaiblissement des précipitations estivales et hivernales et un accroissement des précipitations automnales et printanières.

2.3.3.3. Les précipitations journalières

Les précipitations journalières (de 6H00 T.U. à 6H00 T.U.) ont été analysées pour les six postes.

Tableau 2.8 *: Répartition mensuelle des précipitations maximales journalières pour les six postes de l'étude sur la période 1975-2004.*

			J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Bassin de Barcelonnette	*Barcelonnette* (1155 m)	P/24h max (mm)	72.9	48.0	41.0	48.5	49.8	48.6	***40.0***	50.0	70.6	60.0	**81.4**	46.9
		% pluvio menS	41.7	42.6	***22.4***	31.1	32.8	50.4	54.7	53.8	**69.8**	33.4	67.9	42.6
	Jausiers (1510 m)	P/24h max (mm)	**80.6**	47.5	48.8	49.5	44.3	40.5	***35.7***	38.5	61.5	78.2	65.5	42.1
		% pluvio mens	41.7	51.3	31.5	32.4	32.8	59.4	66.4	54.2	**69.5**	37.1	***26.2***	57.0
Haute Ubaye	*La Condamine* (1325 m)	P/24h max (mm)	83.0	***31.7***	46.5	45.0	49.9	44.0	39.0	47.0	58.3	**90.1**	61.6	45.8
		% pluvio mens	52.1	31.7	45.1	34.0	30.7	55.1	**60.1**	53.6	41.0	50.8	30.5	38.6
	St-Paul (1903 m)	P/24h max (mm)	65.7	61.5	**87.0**	***41.8***	77.0	58.5	55.5	48.0	75.0	85.3	70.0	47.2
		% pluvio mens	***25.3***	62.5	49.5	33.1	30.9	43.0	**68.1**	45.5	63.8	35.4	25.9	57.6
Vallée du Verdon	*Allos* (1370 m)	P/24h max (mm)	**113.8**	49.7	80.0	70.0	58.5	72.0	***39.2***	61.0	90.0	99.4	92.8	92
		% pluvio mens	39.1	32.7	***26.7***	35.5	26.8	43.9	50.3	**63.5**	41.7	40.0	27.5	43.4
Vallée du Bachelard	*Uvernet-Fours* (1660 m)	P/24h max (mm)	97.8	49.6	77.2	67.8	69.2	53.99	***49.4***	63.0	104.8	**128.7**	122.0	59.0
		% pluvio mens	50.3	40.4	***26.5***	33.5	33.9	43.4	**56.5**	33.9	40.3	40.9	31.8	25.0

Le nombre de jours où les précipitations sont supérieures à 0,1 mm varie de 8 jours (*Jausiers*, *Barcelonnette*) à 11 jours par mois (*St-Paul*) selon les postes, mais la variabilité inter-annuelle est très forte. On compte par exemple pour l'année 1977, une hausse de plus de 50% du nombre de jours de pluie/mois pour cinq des six postes. Le nombre de jours de pluie est le plus élevé au printemps (juin) et en automne (octobre et novembre), les deux saisons identifiées comme humides dans la section précédente (§ 2.3.3.2).

Les précipitations maximales journalières varient entre 31,7 mm.j^{-1} (*La Condamine*) et 128,7 mm.j^{-1} (*Uvernet-Fours*). Les plus fortes précipitations maximales journalières (Tab. 2.8) sont enregistrées en hiver pour *Allos*, *Jausiers*, et *St-Paul*, et en Automne pour *Barcelonnette*, *La Condamine* et *Uvernet*. La contribution de ces pluies journalières au volume pluviométrique mensuel représente entre 41,7% (*Jausiers*) et 67,9% (*Barcelonnette*) de la pluviométrie du mois, pour une moyenne de 45% environ.

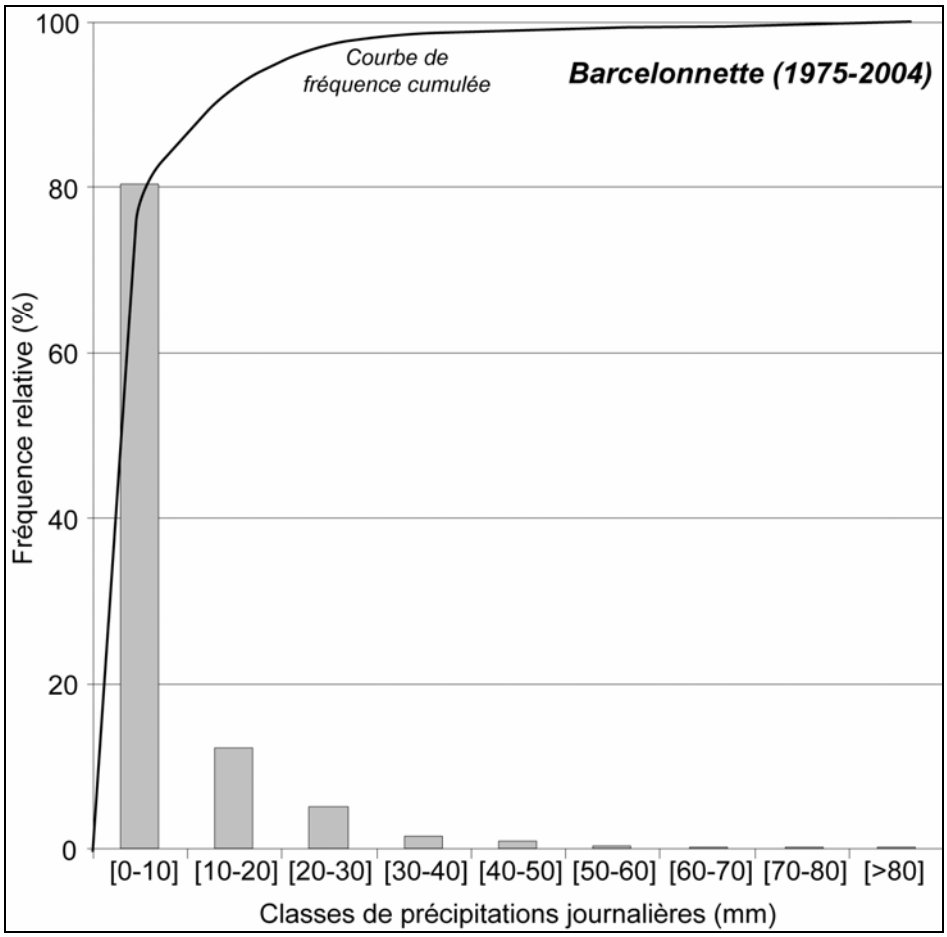


Figure 2.18 *: Fréquence relative des précipitations journalières pour le poste de Barcelonnette sur la période de référence (1975-2004).*

Les plus forts pourcentages sont observés en été, où en moyenne une précipitation maximale journalière représente 60% des pluies mensuelles ; dans ce cas précis la très grande majorité de ces précipitations présentent un caractère orageux particulièrement intense et localisé. Cette différenciation saisonnière est observée pour les six postes considérés, avec un caractère plus marqué pour les deux postes situés dans le bassin de *Barcelonnette* (*Barcelonnette*, *Jausiers*) et pour celui de *La Condamine* en *Haute-Ubaye*. La fréquence relative des précipitations journalières a été analysée pour les six postes (Fig. 2.18 et Tab. 2.9). Sur la période 1975-2004, vingt journées enregistrent plus de 80 mm.j^{-1}, dont dix pour *Uvernet-Fours* et sept pour *Allos*. La répartition des classes de fréquence est relativement homogène.

Tableau 2.9 *: Nombre de cas par classe d'intensité et fréquence relative des précipitations maximales journalières pour les six postes de l'étude sur la période de référence (1975-2004).*

		Intensité (mm)	]0-10[	[10-20[	[20-30[	[30-40[	[40-50[	[50-60[	[60-70[	[70-80[	>80
Bassin de Barcelonnette	*Barcelonnette*	Nombre de cas	2276	343	140	39	21	6	1	1	1
		Fréq relative (%)	80.5	12.1	5.0	1.4	0.7	0.2	0.1	0.1	0.1
	Jausiers	Intensité (mm)	]0-10[	[10-20[	[20-30[	[30-40[	[40-50[	[50-60[	[60-70[	[70-80[	>80
		Nombre de cas	2242	397	131	41	20	2	4	2	0
		Fréq relative (%)	79.0	14.0	4.6	1.4	0.7	0.1	0.2	0.1	0
Haute Ubaye	*La Condamine*	Intensité (mm)	]0-10[	[10-20[	[20-30[	[30-40[	[40-50[	[50-60[	[60-70[	[70-80[	>80
		Nombre de cas	2430	366	127	35	23	6	1	0	1
		Fréq relative (%)	81.3	12.2	4.2	1.2	0.8	0.2	0.1	0	0.1
	St-Paul	Intensité (mm)	]0-10[	[10-20[	[20-30[	[30-40[	[40-50[	[50-60[	[60-70[	[70-80[	>80
		Nombre de cas	2889	470	179	83	27	22	4	2	2
		Fréq relative (%)	78.5	12.8	4.9	2.3	0.7	0.6	0.2	0.1	0.1
Vallée du Verdon	*Allos*	Intensité (mm)	]0-10[	[10-20[	[20-30[	[30-40[	[40-50[	[50-60[	[60-70[	[70-80[	>80
		Nombre de cas	2606	541	219	90	56	21	15	6	7
		Fréq relative (%)	73.2	15.2	6.1	2.5	1.6	0.6	0.4	0.2	0.2
Vallée du Bachelard	*Uvernet-Fours*	Intensité (mm)	]0-10[	[10-20[	[20-30[	[30-40[	[40-50[	[50-60[	[60-70[	[70-80[	>80
		Nombre de cas	2721	467	177	80	45	22	13	5	10
		Fréq relative (%)	76.9	13.2	5.0	2.3	1.3	0.6	0.4	0.1	0.3

Les postes situés à l'extérieur du bassin (*Allos*, *Uvernet* et *St-Paul*) sont plus arrosés, avec une fréquence plus grande des pluies journalières supérieures à 50 mm.j^{-1}. Cependant et d'une manière générale, les pluies journalières supérieures à 40 mm sont peu fréquentes.

Une analyse fréquentielle des pluies maximales journalières sur la période 1975-2004 a été effectuée selon la fonction de répartition de la loi de Gumbel (Fig. 2.19). Pour chacun des six postes, les pluies associées à sept périodes de retour (2, 5, 10, 20, 30, 50 et 100 ans) ont été calculées (Tab. 2.10).

Tableau 2.10 *: Pluie maximale journalière (en mm) pour six périodes de retour de référence pour six postes.*

	Poste	Pluie maximale journalière pour une période de retour T=						
		2	**5**	**10**	**20**	**30**	**50**	**100**
Bassin de Barcelonnette	*Barcelonnette*	46.8	59.3	67.5	75.4	79.9	85.7	93.4
	Jausiers	47.9	60.0	68.0	75.7	79.7	85.6	93.1
Haute Ubaye	*La Condamine*	45.7	58.1	67.3	74.2	78.8	84.4	92.0
	St-Paul	51.8	65.0	73.8	82.2	87.4	93.1	101.2
Vallée du Verdon	*Allos*	63.2	79.9	90.9	101.5	107.6	115.2	125.5
Vallée du Bachelard	*Uvernet-Fours*	69.8	91.7	106.2	120.1	127.3	138.1	151.6

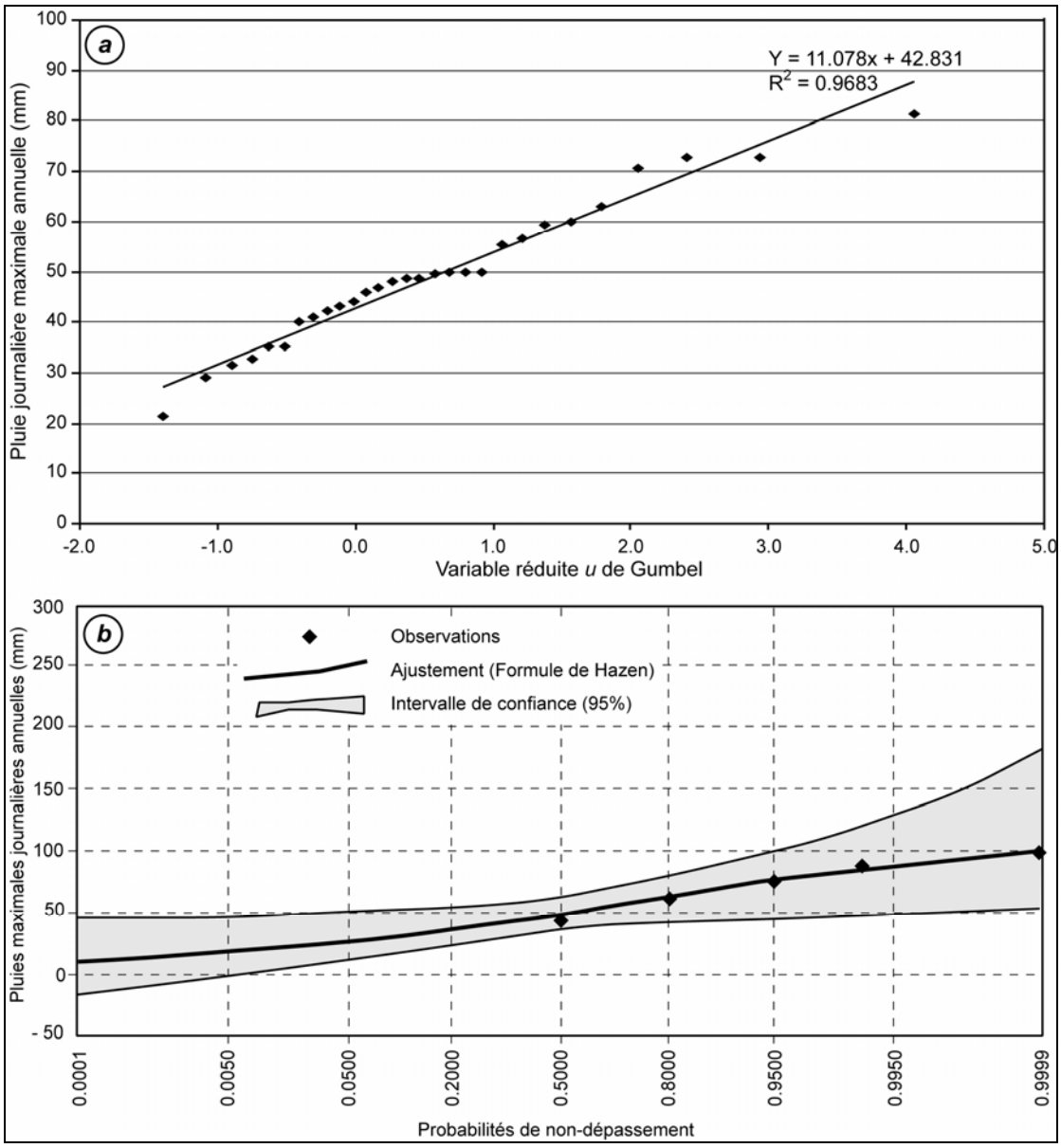


Figure 2.19 *: Etude fréquentielle des pluies maximales journalières sur la période 1975-2004 pour le poste de Barcelonnette.*

a : ajustement sur les points expérimentaux à l'aide de la variable réduite de Gumbel ;
b : ajustement fréquentiel des pluies maximales journalières selon les probabilités empiriques de la formule de Hazen.

Trois groupes de postes peuvent être distingués selon leur situation topographique et morphologique en fonction de la pluie journalière maximale associée à une période de retour :

- le premier groupe réunit les postes situés dans le bassin, *Barcelonnette* et *Jausiers,* et le poste de *La Condamine* où par exemple la pluie associée à une période de retour de 30 ans est de l'ordre de 80 mm.j^{-1} *;*
- le second groupe est composé des postes d'*Allos* dans la vallée du *Verdon*, et d'*Uvernet-Fours* dans la vallée du *Bachelard* où les pluies associées aux différentes périodes de retour sont 20 à 25% plus abondantes que les pluies des trois postes du premier groupe ;
- le poste de *St-Paul,* en *Haute Ubaye,* présente un comportement intermédiaire entre les deux premiers groupes sus-cités.

Les pluies maximales journalières associées à des périodes de retour ont été définies pour les six postes. Mais quelle est leur distribution tout au long de l'année ? Quelles sont les saisons qui concentrent les pluies maximales journalières ?

La répartition des pluies journalières a été analysée à l'échelle saisonnière pour définir plus précisément le régime pluviométrique du bassin de *Barcelonnette* avec une comparaison avec les postes situés à l'extérieur du bassin. L'objectif est de définir les saisons où se concentrent les pluies journalières les plus fortes.

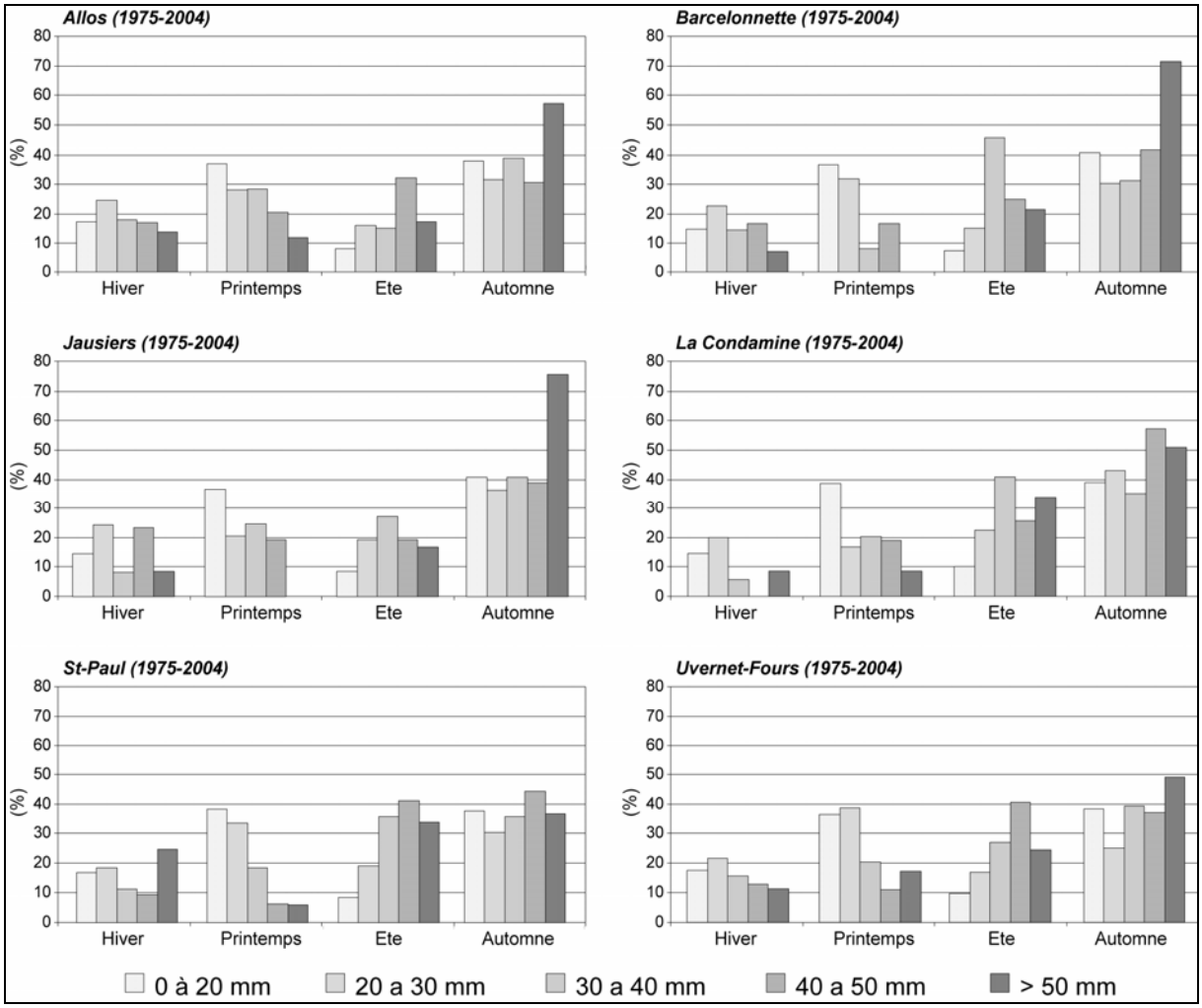


Figure 2.20 *: Répartition saisonnière des précipitations d'intensité maximale en 24h.*

Les pluies journalières inférieures à 40 mm sont plus fréquentes durant les saisons identifiées comme humides dans la section 2.2.2.1., le printemps et l'automne. Les pluies journalières supérieures à 40 mm présentent un maximum de fréquence en automne, et dans une moindre mesure en été (Fig. 2.20). Pour le poste de *Barcelonnette* par exemple, 85% des événements journaliers d'intensité comprise entre 40 et 50 mm se concentrent en été (44%) et en automne (41%).

Si l'on s'intéresse aux pluies supérieures à 50 mm, il est remarquable de constater qu'à *Barcelonnette*, plus de 90% des événements journaliers d'intensité supérieure à 50 mm se déroulent en automne (71%) et en été (22%). Cette tendance se vérifie pour les cinq autres postes. **Les fortes pluies journalières enregistrées en été correspondent dans la grande majorité des cas à des épisodes orageux**. Ces épisodes orageux peuvent être très violents et sont particulièrement localisés (Sommen, 1996 ; Flageollet *et al.*, 1999 ; Sivan, 2000 ; Malet, 2003).

2.3.4. Conclusion

L'analyse des précipitations aux différentes échelles temporelles (inter-annuelle, annuelle, mensuelle et journalière) et spatiales (deux postes pluviométriques situés dans le bassin de *Barcelonnette*, quatre postes situés à l'extérieur immédiat du bassin) a fourni plusieurs informations :

- le régime pluviométrique des six postes est globalement sec, avec des modules annuels s'échelonnant entre 680 et 1100 mm par an. Les deux postes du bassin (*Barcelonnette*, *Jausiers*) traduisent l'appartenance climatique du bassin de *Barcelonnette* aux ***'vallées sèches intra-alpines'*** ;
- les saisons printanières et surtout automnales sont les plus arrosées en termes de volume précipité. Elles recueillent à elles deux un plus de 60% des précipitations annuelles ;
- les pluies journalières supérieures à 50 mm sont réparties dans leur très grande majorité (plus de 90%) entre les saisons automnales (60%) et estivales (30%). Les pluies estivales sont caractérisées par de forts ratios $P_{24h}/P_{mensuelle}$ du mois concerné, ce qui traduit à la fois **leur caractère orageux et un contexte de relative 'sécheresse' préalable**.

Le climat du bassin de *Barcelonnette* et de ses environs apparaît donc comme un facteur favorable au déclenchement des écoulements torrentiels. Il intègre à la fois une phase de **'préparation'** (hiver froid suivi d'un printemps humide) et une phase de **'déclenchement'** (orages estivaux ou parfois automnaux très violents et extrêmement localisés). Toutefois, cette analyse a été conduite sur les précipitations journalières et non sur les épisodes pluvieux. En effet, seule une analyse fine des épisodes pluvieux permettrait de mieux cerner les conditions météo-climatiques associées au déclenchement d'une lave torrentielle. Cette analyse à l'échelle de l'épisode sera conduite dans la section suivante, en exploitant les données issues d'un poste pluviométrique installé dans la zone des *Clots* (bassin versant du torrent de *Faucon*) en octobre 2001. Des informations supplémentaires et plus détaillées sur l'analyse des épisodes pluvieux dans certains secteurs (*Sauze* et *Super-Sauze*) du bassin de *Barcelonnette* peuvent être trouvées dans Skubiszewski (2000) et dans Malet (2003).

Les problèmes liés à la localisation géographique des postes pluviométriques doivent être considérés. En effet, leur localisation ne permet pas d'évaluer correctement les précipitations sur les crêtes, ce qui constitue une sérieuse limitation quant à la prévention de l'aléa lave torrentielle. Pour tenter de résoudre ce problème, cinq pluviomètres ont été installés en partie haute des versants du bassin de *Barcelonnette* en juillet 2005. Les données issues de ces pluviomètres seront certainement très instructives sur les conditions pluviométriques dans les zones de crêtes du bassin de *Barcelonnette*.

2.4. Laves torrentielles et précipitations

Les aspects climatiques liés aux laves torrentielles sont multiples et parfois complexes (§ 1.3.), le rôle de la pluviométrie dans sa globalité (annuelle, mensuelle, journalière et à l'échelle de l'événement) est essentiel (Wilson et Wieczorek, 1995 ; Onda *et al.*, 2003 ; Savage *et al.*, 2003). Pour ce travail, seul les trois postes pluviométriques situés dans le bassin de *Barcelonnette* ont été utilisés (*Barcelonnette*, *Jausiers*, *La Condamine*). Leur localisation géographique souffre d'un certain manque de représentativité, notamment sur les crêtes. Un total pluviométrique journalier nul ou faible enregistré par un poste ne signifie pas forcément une absence de précipitations sur les sommets d'un bassin torrentiel le jour de la lave. Le lecteur doit ainsi garder à l'esprit les limites de cette analyse en l'absence de mesures sur les sommets. Les objectifs de cette section sont rappelés dans le tableau 2.11.

Tableau 2.11 *: Constat préliminaire sur l'activité torrentielle (I) : étude des relations pluie/lave torrentielle (I.3).*

Etapes	Objectifs	Moyens	Chapitre/ Section
I.1 : Historique de l'activité torrentielle	…	…	§ 2.2
I.2. Etude climatique	…	…	§ 2.3
I.3 : Etude des relations pluie/lave torrentielle	Définir une typologie des épisodes pluvieux associés à des laves ; Définir des seuils de précipitations (en termes d'intensité, de pluviométrie antécédente) pour le déclenchement des laves.	Comparaisons entre les données historiques et les chroniques pluviométriques sur des périodes de référence.	**§ 2.4**
I.4 : Morphologie et morphométrie des bassins versants	…	…	§ 2.5

Dans le bassin de *Barcelonnette*, le type de précipitations à l'origine d'un écoulement de laves torrentielles est varié. La plupart des comptes-rendus d'événements de laves torrentielles issus des archives des services RTM fait état des conditions climatiques au moment même de l'événement. **Les orages, les pluies torrentielles**, parfois accompagnés de **grêle,** sont les événements climatiques déclenchant les plus fréquents (Fig. 2.21). Le terme pluie torrentielle apparaît très fréquemment dans les archives mais il est difficile de définir précisément à quoi il se rapporte. Il correspond peut être à des pluies très intenses non accompagnées d'un orage. La fonte des neiges participe rarement au déclenchement d'une lave torrentielle (5%). Le fort pourcentage d'événements pluvieux 'violents' (orage, pluie torrentielle et grêle) enregistrés au moment du déclenchement d'une lave torrentielle souligne l'importance **des événements pluviométriques intenses et de courte durée** sur le déclenchement du phénomène.

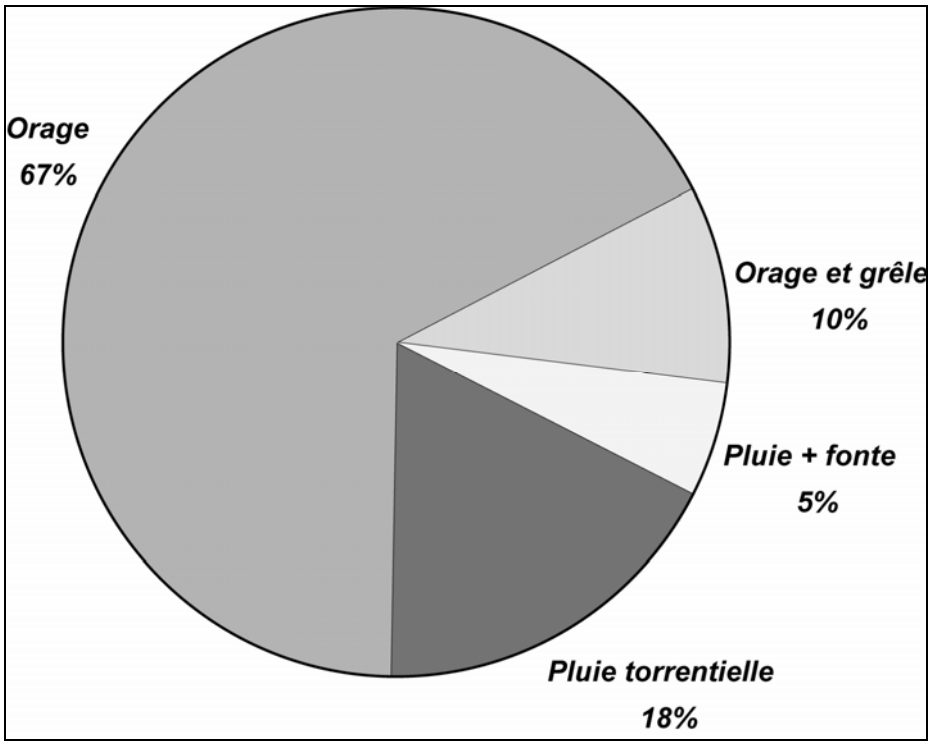


Figure 2.21 *: Répartition des événements de laves torrentielles dans le bassin de Barcelonnette (1850 – 2004) en fonction du type des événements pluvieux déclenchant.*

En 1873, le garde général des forêts, Schlumberger, décrit les conditions météorologiques d'une lave torrentielle survenue le 13 août 1876 (Annexe 4). Dans cette note, il va décrire chronologiquement la journée du 13 août. Il indique en premier lieu que '*la matinée avait été superbe et le ciel d'une pureté remarquable …*'.'*Mais dés le midi, les nuages commencent à se montrer à l'horizon ; ils s'amoncèlent rapidement dans la partie haute de la vallée entre Jausiers et la Condamine. Cependant la chaleur était accablante et pas un souffle de vent n'agite l'air. Vers 2 heures* (NDLA : 14 heures) *les nuages deviennent plus épais et prennent une teinte d'un noir jaunâtre caractéristique : ils cachent les montagnes de Jausiers, et leur masse sombre s'avance rapidement, en suivant la crête des Sanières … Aussitôt, l'orage éclate avec furie ; les éclairs sillonnent le ciel … tandis qu'il ne tombe que quelques gouttes d'eau dans la vallée et que le ciel est serein vers le Sud*'. Il indique ensuite que '*l'orage avait cessé dans le bassin de réception et déjà on apercevait la cime des montagnes légèrement blanchie par la grêle. A mes pieds, le lit du torrent,…, est presque à sec, malgré l'orage. Mais regardant en amont, dans la direction des chutes qui se trouvent en cet endroit, je vois une immense masse noire qui s'avance comme un mur et presque sans bruit, descendant du lit du torrent'.* Cette description de l'orage par Schlumberger est très instructive, et confirme le caractère très localisé et violent des orages dans le bassin de *Barcelonnette*. De plus, il indique la présence de grêle.

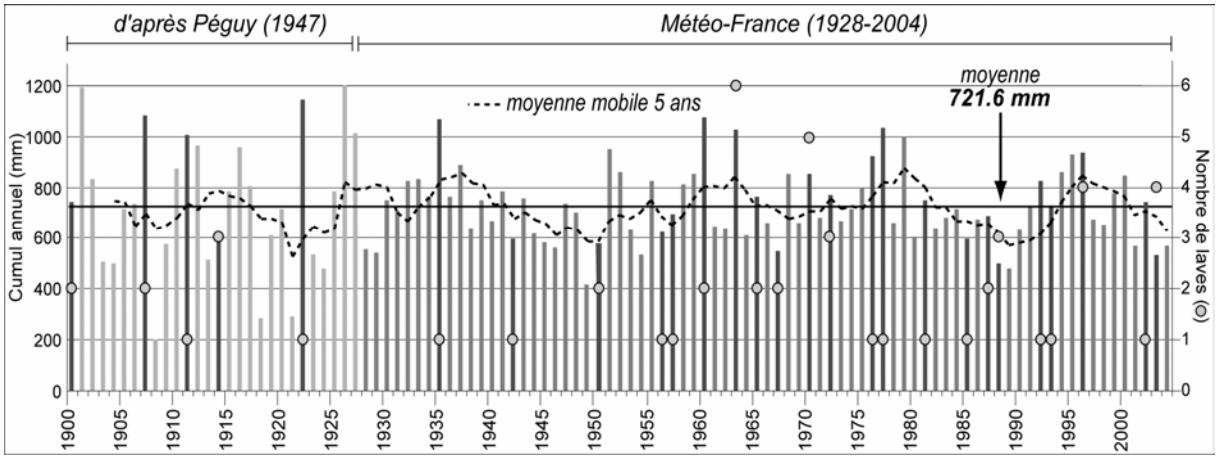


Figure 2.22 *: Pluviométrie annuelle au poste de Barcelonnette de 1900 à 2004 et nombre de laves torrentielles enregistrées par année (modifiée de Malet, 2003).*

Sans surprise, l'analyse des relations entre les laves torrentielles et la pluviométrie annuelle ne montre pas de lien direct (Fig. 2.22). Néanmoins, la survenance d'épisodes de laves torrentielles apparaît régulièrement au cours des années où le total pluviométrique est nettement supérieur à la moyenne mobile sur les cinq années précédentes. Ceci est notamment vrai pour les laves torrentielles survenues dans les torrents du bassin en 1907, 1911, 1922, 1935, 1960, 1963, 1970, 1976, 1977, 1992 et 1996.

L'étude des relations entre la pluviométrie et les laves torrentielles a été entreprise en sélectionnant quinze dates pour lesquelles nous bénéficions du jour précis d'occurrence, et des données climatiques associées (pluie journalière et des 30 jours précédant l'événement) (Crozier et Eyles, 1980 ; Bonnet-Staub, 1998 ; Sorgi-de-Gennaro, 1999). Les quinze événements se répartissent de 1960 à 2003, et associent une ou plusieurs laves torrentielles (Fig. 2.23). Les précipitations ont été étudiées à l'échelle de l'événement (quelques heures) pour les événements du 4 juin 2002 et du 5 août 2003 à partir des chroniques pluviométriques du poste des *Clots* (Chapitre 4).

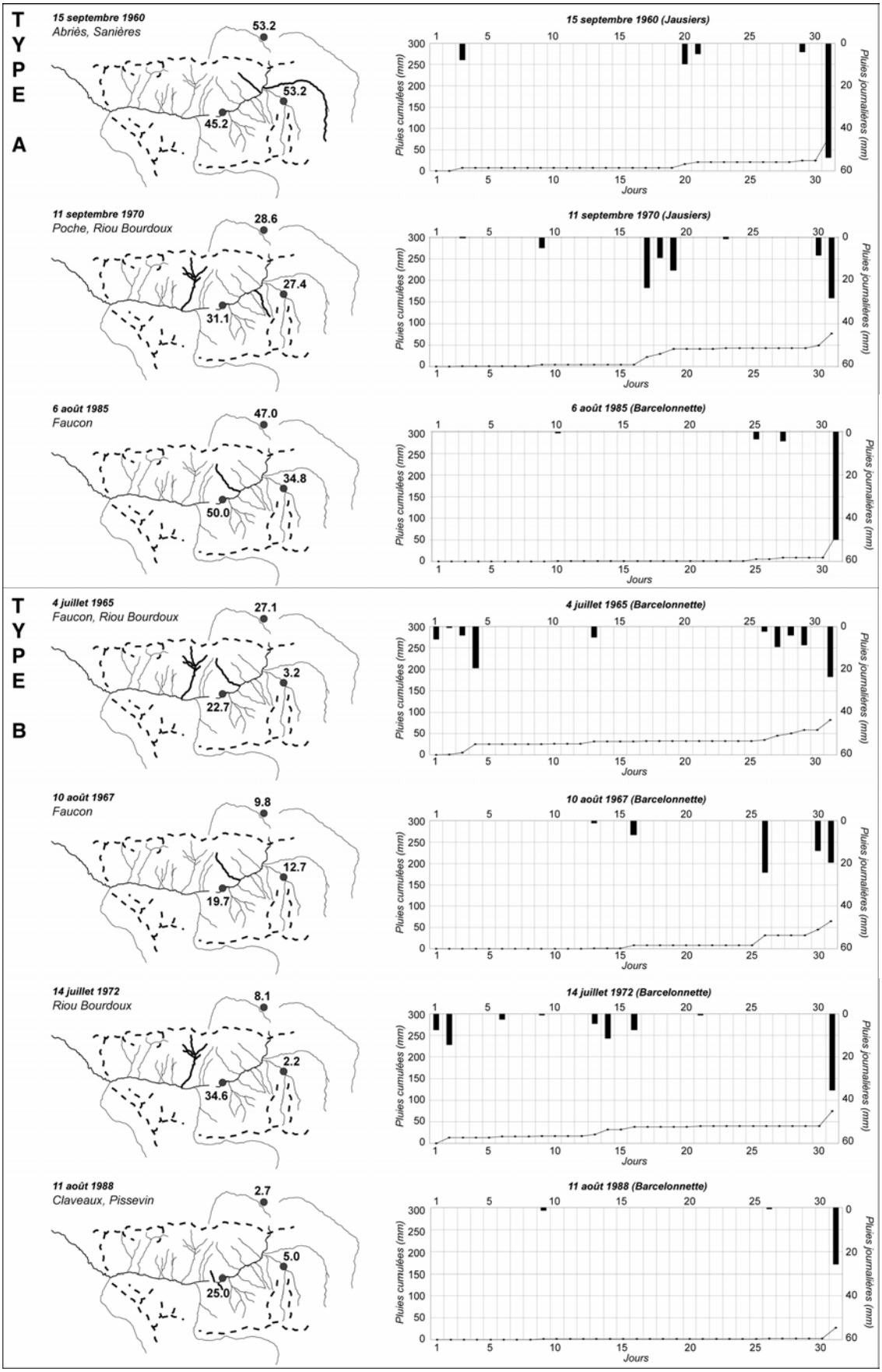


Figure 2.23a *: Localisation des torrents concernés par les quinze événements de laves torrentielles (en trait gros) et pluie du jour (postes de Barcelonnette, Jausiers et La Condamine) et pluie antécédente cumulée sur les trente derniers jours (Type A et B).*

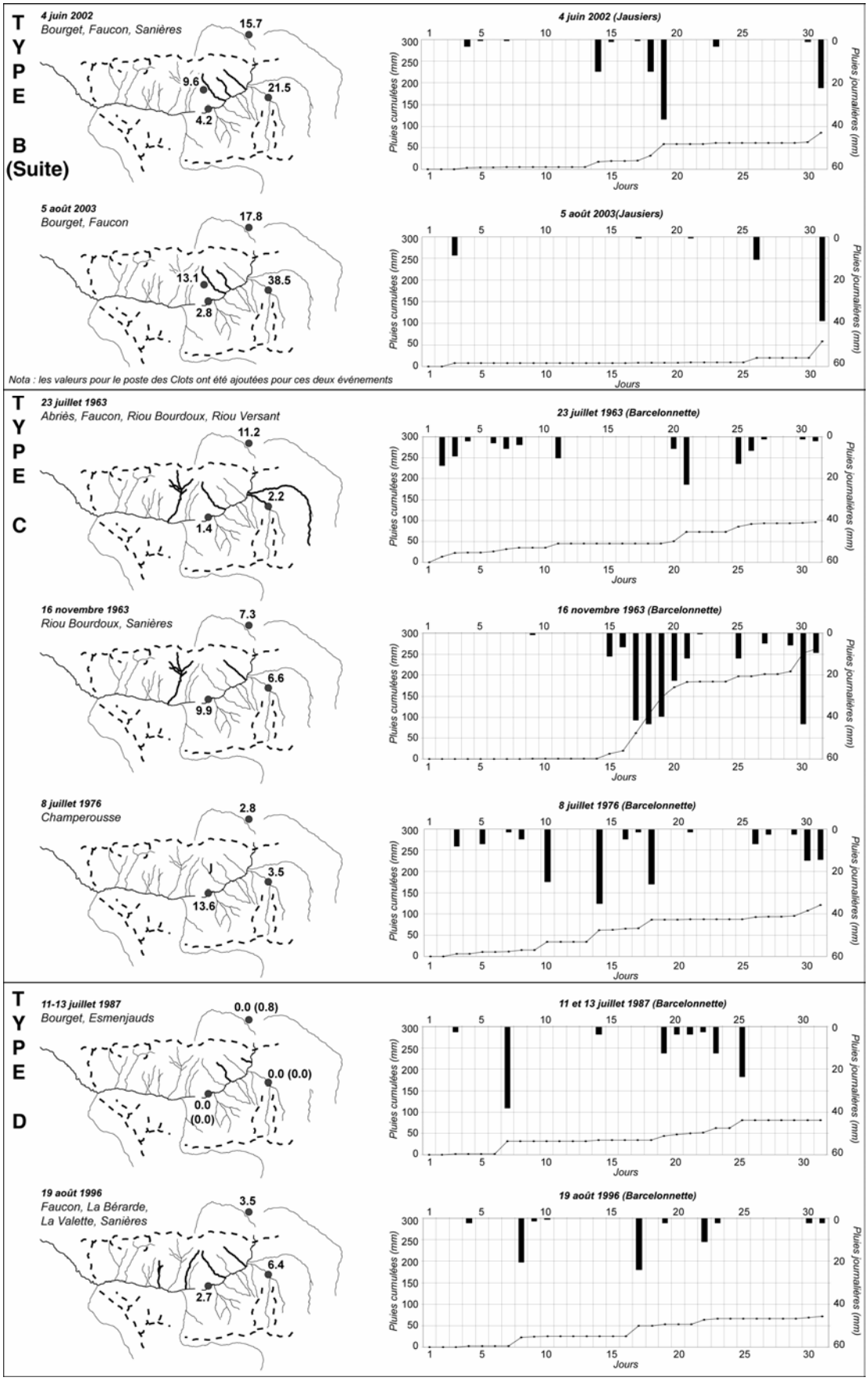


Figure 2.23b *: Localisation des torrents concernés par les quinze événements de laves torrentielles (en trait gros) et pluie du jour (postes de Barcelonnette, Jausiers et La Condamine) et pluie antécédente cumulée sur les trente derniers jours (Type B, C et D).*

2.4.1. Relations avec les précipitations à l'échelle journalière

Les **pluies tombées le jour du déclenchement et les pluies journalières des trente jours** précédents ont été représentées pour quinze événements (Fig. 2.23a, 2.23b et Fig. 2.24). Pour ces quinze événements, les précipitations journalières des trente derniers jours sont globalement relativement faibles. La figure 2.23 présente une carte simplifiée du bassin où sont localisés les torrents concernés et les pluies associées (pluie du jour et sur les trente jours précédents) pour les trois postes pluviométriques situés dans le bassin, *Barcelonnette*, *Jausiers* et dans sa bordure est, *La Condamine*. Une bonne correspondance est observée entre la localisation géographique des torrents en crue et le poste le plus arrosé. Certes cela peut sembler naturel, mais il valait mieux s'en assurer compte tenu des limites évoquées précédemment sur la mesure des précipitations.

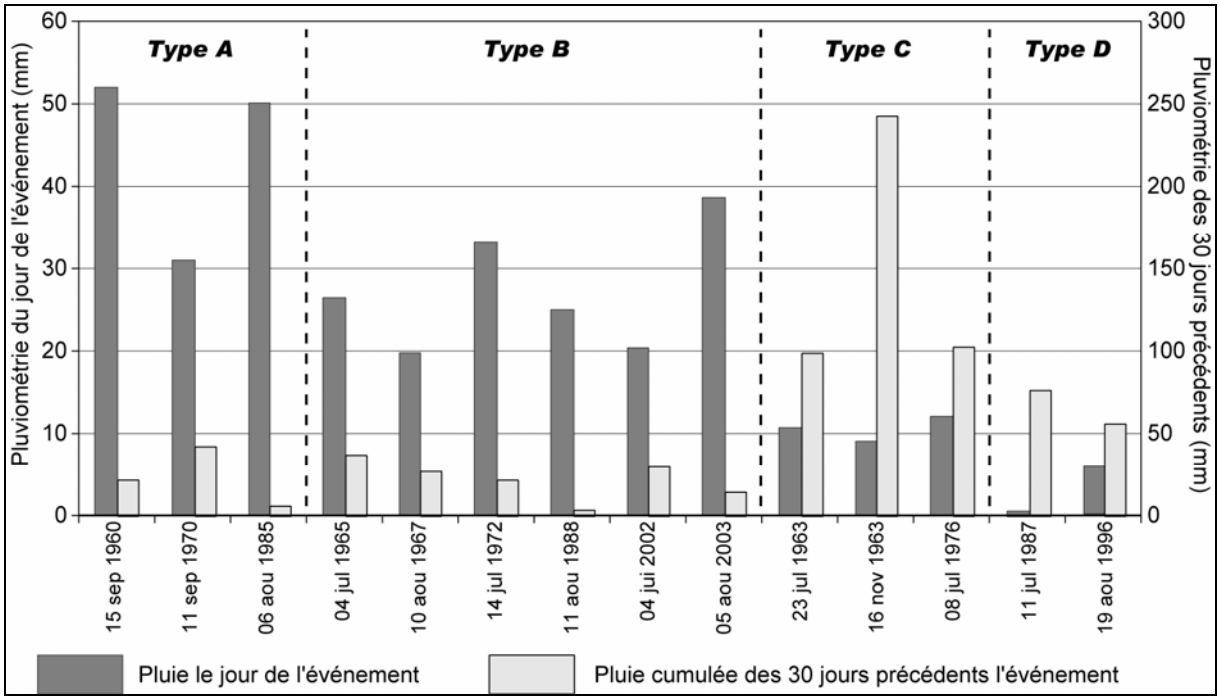


Figure 2.24 *: Pluie du jour et pluie antécédente (30 jours) pour les 15 événements de lave.*

Dans la très grande majorité des cas, les torrents en crue sont localisés à proximité du poste pluviométrique le plus arrosé. Quatre types peuvent être distingués en fonction des pluies des trente derniers jours et des pluies tombées le jour du déclenchement (Fig. 2.23 et 2.24) :

- **Type A** pour 3 événements (15 septembre 1960, 11 septembre 1970 et 6 août 1985), où **pour les trois postes**, **les pluies le jour du déclenchement de la lave sont supérieures à 20 mm** et les pluies des 30 jours précédents sont faibles ;

- **Type B** pour 6 événements (4 juillet 1965, 10 août 1967, 14 juillet 1972, 11 août 1988, 4 juin 2002 et 5 août 2003), où les pluies tombées le jour du déclenchement **diffèrent significativement d'un poste à l'autre** ; **un ou deux postes reçoivent l'essentiel des précipitations**. Les pluies des 30 jours précédents sont faibles ;

- **Type C** pour 3 événements (le 23 juillet 1963, le 16 novembre 1963 et le 8 juillet 1976) où **les pluies des 30 jours précédents sont importantes, voir exceptionnelles** (16 novembre 1963). La pluie le jour du déclenchement est faible, inférieure à 15 mm, mais suffisante pour faire déborder le(s) torrent(s). On peut supposer que **les fortes pluies**

antécédentes ont progressivement saturé les terrains, jusqu'à atteindre le seuil maximal de stockage, un événement de faible volume pourrait alors provoquer une lave torrentielle ;

▪ **Type D** pour 3 événements (11 juillet 1987, 13 juillet 1987 et 19 août 1996) où les **précipitations antécédentes ou survenues le jour du déclenchement sont très faibles**, et rien ne semble expliquer la survenance d'une lave torrentielle dans ces conditions. Il est probable que les orages ou les pluies associés à ces événements soient restés extrêmement localisés sur les sommets des versants, sans leur enregistrement par les postes pluviométriques de *Barcelonnette* et de *Jausiers*.

2.4.2. Relations avec les précipitations horaires

Si les événements du **4 juin 2002 et du 5 août 2003** ont été précédemment classés dans le type B, l'existence de données pluviométriques au pas horaire (enregistrées au poste *des Clots*) permet de compléter l'analyse.

Le **4 juin 2002**, trois événements torrentiels se sont déclenchés dans les torrents du *Bourget*, du *Faucon* et de *Sanières*, tous localisés en adret (Fig. 2.9). L'épisode pluvieux s'est produit dans la nuit du 4 au 5 juin 2002.

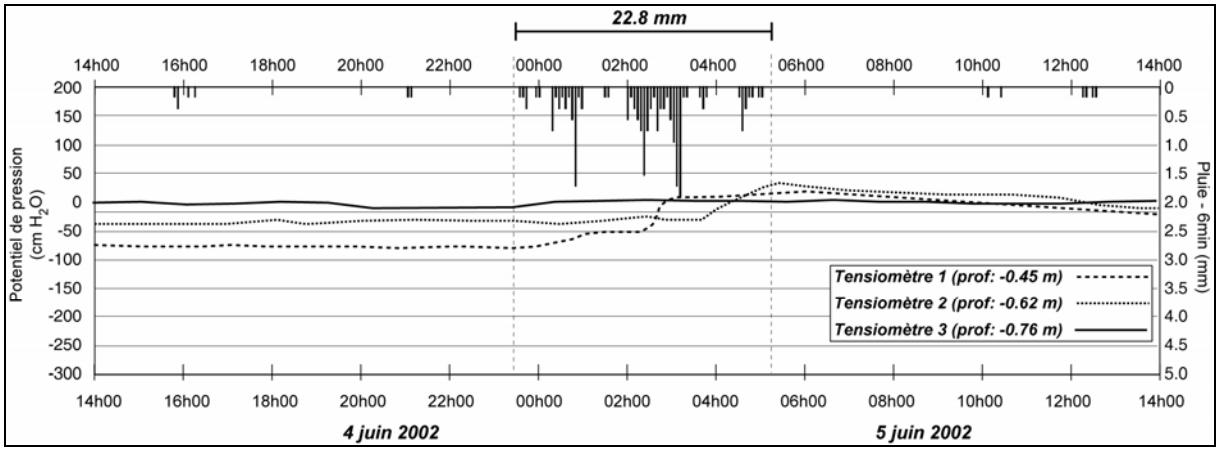


***Figure 2.25** : Conditions pluviométriques et hydrologiques à la station des Clots lors du déclenchement de l'événement torrentiel du 4-5 juin 2002.*

Le 4 juin, les postes de *Barcelonnette* (4.2 mm) et des *Clots* (9.6 mm) ont reçu moins de précipitations que les postes de La *Condamine* (15.7 mm), de *Jausiers* (21.5 mm). Cette tendance s'inverse le 5 juin (Fig. 2.22) où les postes des *Clots* (20.2 mm) et de *Barcelonnette* (25.4 mm) reçoivent l'essentiel des précipitations comparativement à *Jausiers* (2.6 mm) et *La Condamine* (3.5 mm). Cette répartition spatio-temporelle traduit une avancée du front pluvieux de la partie orientale du bassin (*La Condamine*) vers la partie centrale (*Barcelonnette*) selon une direction générale nord-est sud-ouest.

L'analyse des précipitations recueillies au pas de temps horaire au poste des *Clots* (Fig. 2.25) montre que l'épisode orageux débute vers minuit pour se finir vers 05h00 ; durant ce laps de temps les précipitations atteignent 22.8 mm.

La majeure partie de la pluie (13.2 mm) tombe entre 02h00 et 04h00. Du fait de l'heure tardive, aucun témoignage de l'épisode pluvieux n'a pu être recueilli. Deux des trois tensiomètres ont enregistré des variations significatives ; les tensiomètres T1 (-0.45 m) et T2 (-0.62 m) enregistrent un flux d'infiltration.

Le **5 août 2003**, deux événements torrentiels se sont déclenchés dans les torrents du *Bourget* et de *Faucon* (Fig. 2.9). Les pluies journalières des trois postes pluviométriques indiquent que l'orage est resté extrêmement localisé en bordure orientale du bassin (Fig. 2.23b). En effet, le poste de *Barcelonnette* a enregistré de très faibles précipitations (2.8 mm) durant cette journée. Au contraire, les postes des *Clots* (13.1 mm), de *La Condamine* (17.8 mm) et de *Jausiers* (38.5 mm) ont enregistrés des pluies significatives. La valeur de 38.5 mm pour le poste de *Jausiers* est exceptionnelle. En effet, c'est la plus forte valeur journalière enregistrée à *Jausiers* pour un mois d'août durant la période 1961-2004 avec une période de retour supérieure à 30 ans. Les pluies orageuses se sont étalées sur trois heures environ, de 14h45 à 19h45, mais le maximum d'intensité a été observé entre 17h00 et 18h00. En effet, le poste de *Jausiers* a recueilli 29.1 mm entre 17h00 et 19h00, dont 18.5 durant la première heure ; le poste des *Clots* a recueilli 12.5 mm entre 17h00 et 19h00, dont 9.6 mm entre 17h00 et 18h00 (Fig. 2.26).

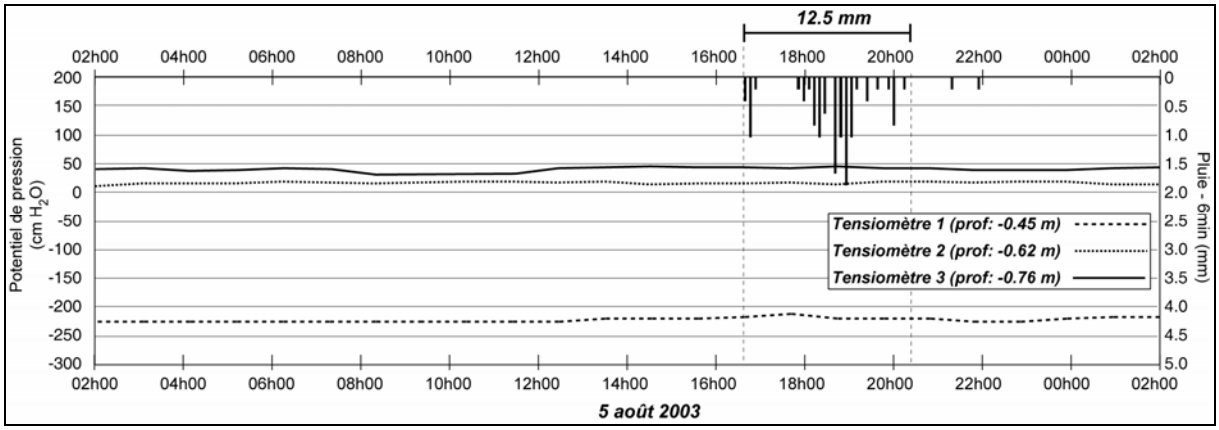


Figure 2.26 *: Conditions pluviométriques et hydrologiques à la station des Clots lors du déclenchement de l'événement torrentiel du 5 août 2003.*

Les tensiomètres n'ont pas du tout réagi à la pluie, ce qui laisse supposer qu'une très grande part des précipitations a ruisselé directement ou s'est produite sous forme de grêlons. Le radar de *Nîmes* a estimé entre 25 et 30 mm les précipitations orageuses durant ces deux heures (Koulinski, 2003). Néanmoins, le caractère grêleux et très localisé de l'épisode orageux laisse à penser que les précipitations durant ces deux heures sur les crêtes étaient beaucoup plus fortes. L'exemple du poste des *Clots* abonde dans ce sens, car malgré sa localisation relativement proche de la zone de départ de la lave torrentielle (moins de 750 m à vol d'oiseau) il n'a enregistré que 12.5 mm. Par contre, il est difficile de savoir la part respective de la localisation et de la prise en compte des grêlons par le pluviomètre dans ce déficit de captation. Ceci renforce donc la difficulté d'accès aux précipitations réelles.

2.4.3. Conclusion

L'analyse historique de l'activité des torrents confrontée aux données pluviométriques a permis de dégager plusieurs points intéressants concernant les modalités de l'activité torrentielle dans les trente deux appareils torrentiels du bassin de *Barcelonnette* :

- Ces torrents connaissent une forte activité depuis maintenant près de deux siècles. Plus de **cinq cents événements** ont été recensés depuis 1850, dont **cent laves torrentielles** réparties sur plusieurs périodes bien individualisées de forte activité, comme par exemple les périodes 1850-1870 et 1950-2000 ;

- 91% des laves torrentielles recensées se sont **déclenchées sur le versant adret**. La majorité de l'activité est concentrée dans les torrents du *Riou-Bourdoux*, des *Sanières*, du *Faucon*, de l'*Abeous* et du *Bourget* ;

▪ Les laves torrentielles se déclenchent presque exclusivement **durant la période estivale** en juillet – août. La période de déclenchement des crues torrentielles est plue étendue, du printemps à l'automne. Cette répartition est à mettre en relation avec les conditions climatiques saisonnières observées dans le bassin. En effet, le déclenchement des laves torrentielles est associé dans la grande majorité des cas **à un orage** le plus souvent estival. Le déclenchement des crues torrentielles est associé à des pluies qui ne sont pas nécessairement orageuses. Au printemps, la fonte des neiges peut contribuer au déclenchement de ces crues ;

▪ L'analyse fine au pas de temps journalier et horaire des conditions pluviométriques de trois postes pour quinze événements de laves torrentielles bien documentées a permis de mettre en évidence quatre types de situations pluviométriques apparentes. Les deux premiers (type A et B) sont caractérisés par **une pluie le jour de déclenchement particulièrement forte** (associée dans la plupart des cas à une situation orageuse dans un contexte de relative sécheresse), le troisième type (type C) est caractérisé par **de fortes précipitations antécédentes (sur les 30 jours précédents l'événement) ;**

▪ Pour certains événements, de très faibles précipitations journalières ont été enregistrées (type D) démontrant encore une fois le caractère particulièrement localisé des cellules orageuses. Ceci démontre les limites d'une telle approche et souligne le besoin de données concernant les conditions pluviométriques sur les crêtes et les sommets.

L'analyse des épisodes pluvieux n'a pas permis de mettre en évidence des seuils caractéristiques pour le déclenchement d'événements torrentiels. Les difficultés rencontrées lors des tentatives de caractérisation de situations de déclenchement de laves torrentielles à partir des conditions pluviométriques semblent résulter d'une part de la diversité des mécanismes élémentaires en jeu (§1.3.1.2.), et d'autre part au manque général d'observations et de mesures de terrain (§1.4.1.). Le climat ne peut expliquer à lui seul la forte occurrence des laves torrentielles dans le bassin de *Barcelonnette*.

2.5. Analyses des facteurs de prédisposition de l'activité torrentielle

L'analyse historique de la torrentialité dans le bassin de *Barcelonnette* a révélé que la très grande majorité des laves torrentielles s'est déclenchée dans un nombre restreint de torrents, presque tous localisés en adret, nous avons donc cherché à comprendre pourquoi l'activité torrentielle se concentrait sur le versant adret en comparant les caractéristiques morphologiques et morphométriques de vingt-six bassins versants torrentiels de manière à identifier précisément les facteurs de prédisposition (Tab. 2.12).

Tableau 2.12 *: Constat préliminaire sur l'activité torrentielle (I) : Morphologie et morphométrie des bassins versants (I.3).*

Etapes	Objectifs	Moyens	Chapitre/ Section
I.1 : Historique de l'activité torrentielle	…	…	§ 2.2
I.2. Etude climatique	…	…	§ 2.3
I.3 : Etude des relations pluie/lave torrentielle	…	…	§ 2.4
I.4 : Morphologie et morphométrie des bassins versants	Identifier les facteurs de prédisposition.	Analyse morphologique et morphométrique au 1/50 000ème des bassins versants torrentiels.	**§ 2.5**

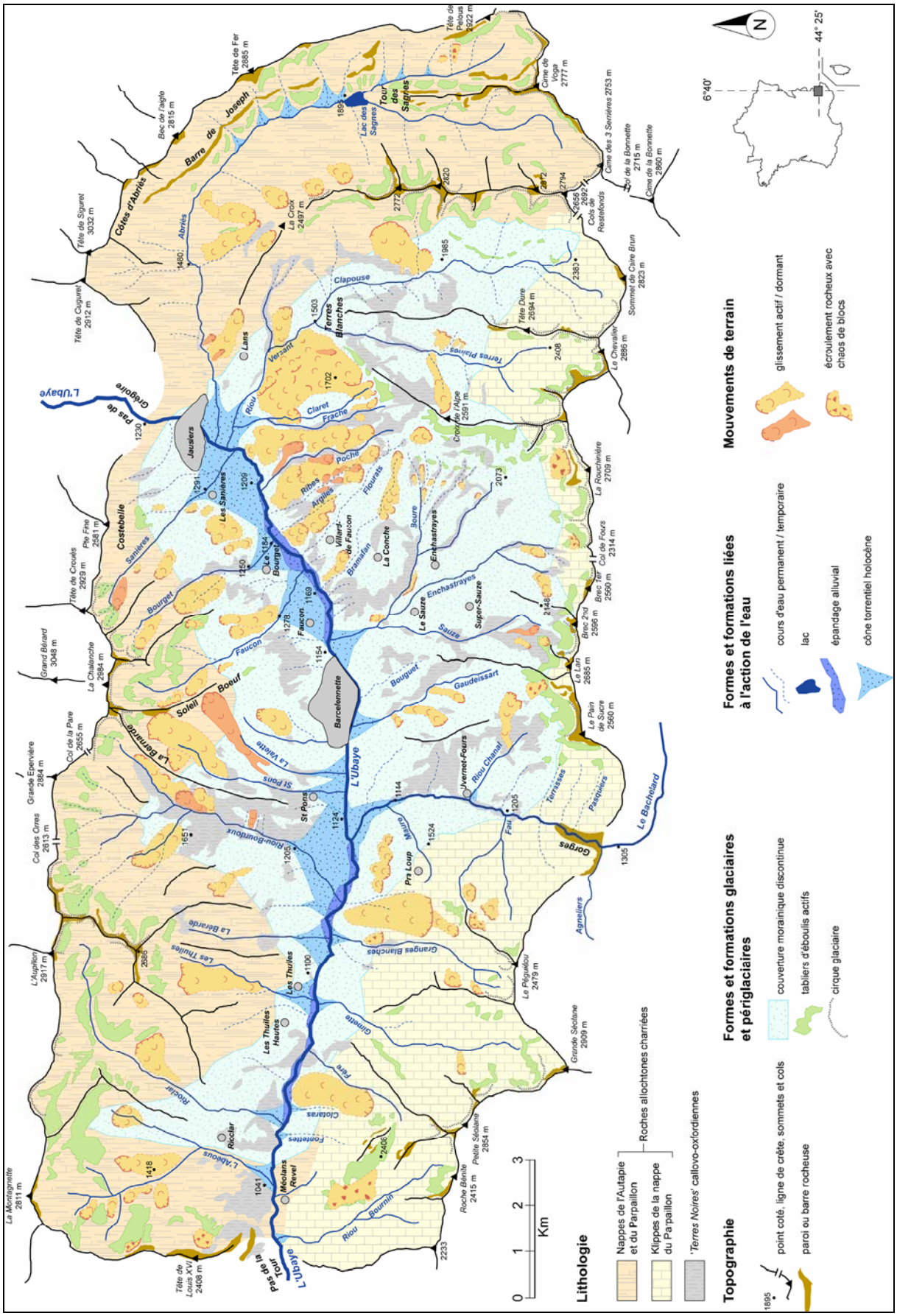


Figure 2.27 *: Carte géomorphologique simplifiée du bassin de Barcelonnette.*

2.5.1. Morphologie générale des bassins versants torrentiels

L'approche morphologique consiste à identifier puis cartographier les grands traits morphologiques des bassins versants : topographie, lithologie, formations superficielles et instabilités de versant. L'objectif de cette esquisse géomorphologique est d'identifier les paramètres morphologiques contrôlant le déclenchement des laves torrentielles (facteurs de prédisposition).

Une carte géomorphologique simplifiée a ainsi été réalisée pour l'ensemble du bassin de Barcelonnette (Fig. 2.27). Bien entendu l'échelle de travail (1/50 000ème) est insuffisante pour étudier finement les processus géomorphologiques dans chacun des bassins versants étudiés. Néanmoins, cette approche est un préalable nécessaire à une étude plus approfondie des conditions de déclenchement, de propagation et de dépôt des laves torrentielles (Costa, 1984 ; Rickenmann, 1997 ; Chen, 2006) qui sera entreprise par la suite à une plus grande échelle (1/10 000ème).

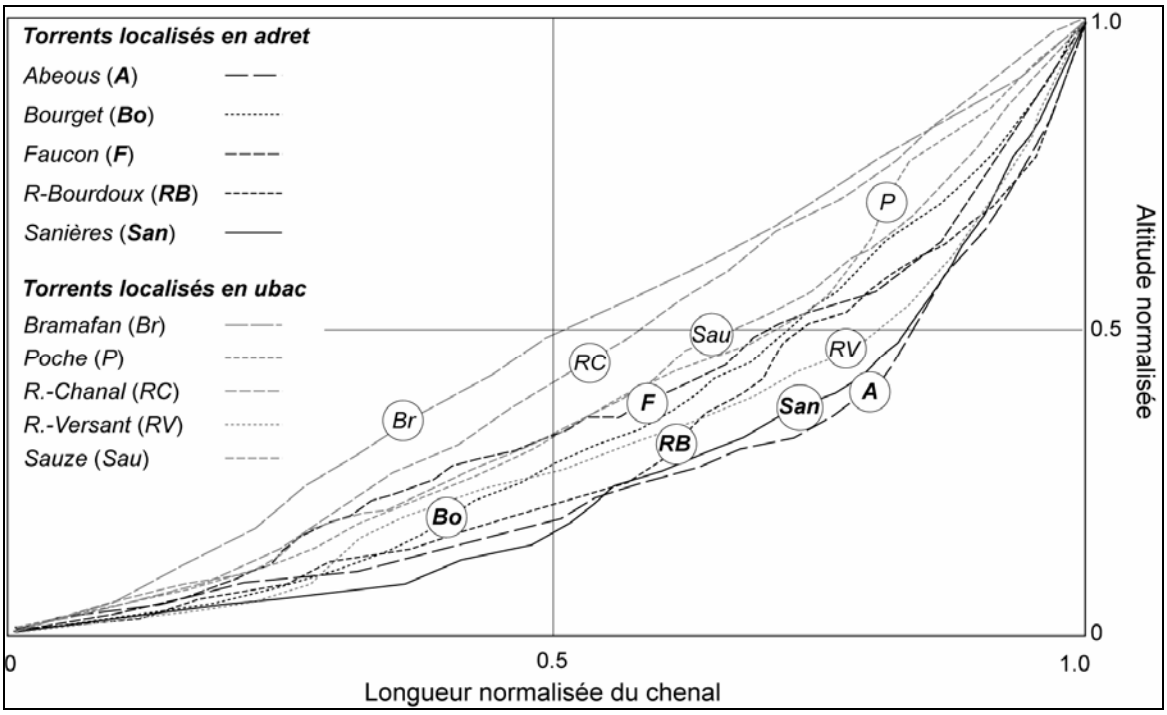


Figure 2.28 *: Profils en long normalisés de dix torrents du bassin de Barcelonnette.*

La **configuration géologique** du Bassin (§ 2.1.1.) explique en grande partie **les différences topographiques entre les versants adret et ubac** (Maquaire *et al.*, 2003). Ces différences sont bien visibles sur les profils en long des torrents. Sur la la figure 2.28, qui représente le profil en long normalisé de dix torrents du Bassin, cinq localisés en adret, et cinq en ubac (Remaître *et al.*, 2005a) on peut remarquer que :

- **Les torrents '*ubac*'** présentent un profil en long plus ou moins régulier, où la pente varie peu le long du profil, ceci est notamment vrai pour les torrents de *Bramafan*, *Poche*, *Riou Chanal* et *Sauze*. ;
- **Les torrents '*adret*'** présentent des profils en long très pentus dans la partie amont avec une chute progressive de la pente vers l'apex. De plus, leurs profils sont plus accidentés, avec des successions de pentes faibles et de pentes fortes (torrents du *Riou-Bourdoux* et de *Faucon* notamment).

Ces successions, observées en adret, sont peut être dues aux rectifications du profil en long par les travaux de corrections torrentiels. Ainsi, ces successions correspondent le plus souvent à des zones d'étalement à l'amont de grands seuils torrentiels (Sivan, 2000 ; Remaître *et al.*, 2005a).

Comment expliquer ces importantes différences topographiques entre les versants ubac et adret ? Si dans la partie inférieure des versants, **la lithologie** est similaire (marnes noires, formations torrentielles et formations glaciaires), les hauts de versants et les crêtes sommitales ne présentent pas du tout la même configuration.

En ubac, les marnes noires affleurent jusqu'à 2150 m d'altitude (particulièrement dans la zone s'étendant de *la Croix de l'Alpe* au *Pain de Sucre*), et constituent la très grande majorité des affleurements. Les crêtes sont taillées dans les klippes de la nappe du *Parpaillon*. Les bassins de réception correspondent aux nombreux cirques situés en contrebas des crêtes. Cette configuration est différente pour les bassins versants situés à l'Ouest du *Bachelard*. Dans ce secteur, les nappes constituent la grande majorité des affleurements et les marnes noires sont quasiment absentes.

En adret, la limite supérieure d'affleurement des marnes noires est beaucoup plus basse (entre 1350 et 1850 m). Les matériaux des nappes de l'*Autapie* et du *Parpaillon* affleurent à partir de 1500 m (*Sanières*, *Bourget* et *Abeous*) et arment l'ensemble des crêtes (*La Chalanche*, *La Grande Epervière*, *l'Aupillon*). Ces formations charriées, fortement décomprimées et tectonisées, constituent l'ensemble des parois rocheuses. Les bassins de réception des torrents se localisent dans des cirques présentent des tailles plus imposantes qu'en ubac, (*La Chalanche*, *Tête de Crouès*) et présentent une forme parfaite d'amphithéâtre. Les bassins de réception de certains torrents (*Bourget*, *Faucon* et *Sanières*) prennent la forme d'un vaste entonnoir aux pentes quasiment verticales. Ces bassins de réception sont composés à la base de matériaux très délitables ('*les Terres Noires*'), surmontés des couches dures de la nappe du *Parpaillon*.

La localisation **des principales formations superficielles** (moraines et éboulis) est assez différente entre les deux versants.

En ubac, les formations morainiques sont présentes jusqu'à 2400 m, notamment dans le secteur des *Brecs*. Au dessus de 2400 m, la plupart des crêtes sont recouvertes par des tabliers d'éboulis qui restent localisés à l'aval immédiat des crêtes (*Brecs*, *le Lan*, *Pain de Sucre*). Les torrents prennent leur source dans les 'Terres Noires' ou dans les moraines. Très peu d'entre eux sont connectés aux tabliers d'éboulis ou aux barres rocheuses situés dans les parties hautes du bassin versant.

En adret les formations morainiques se retrouvent jusqu'à 2000 m d'altitude environ (torrents du *Riou-Bourdoux* et du *Rioclar*). Les torrents situés en adret prennent leur source au sein de barres rocheuses ou de vastes tabliers d'éboulis. C'est le cas notamment des torrents du *Bourget*, du *Faucon*, des *Sanières* et du *Riou-Bourdoux.*

Les mouvements de terrain, et plus particulièrement les glissements, peuvent déclencher ou nourrir une lave torrentielle (§ 1.3.). Plus d'une centaine de mouvements de terrain affecte les versant du bassin de *Barcelonnette* (Légier, 1977 ; Antoine *et al.*, 1988 ; Weber, 2001). Cette richesse (aussi bien en nombre qu'en variété) de mouvements de terrain s'explique par la conjonction de plusieurs facteurs de prédisposition favorables. Ils concernent principalement les '*Terres Noires*', les formations morainiques et les matériaux charriés (calcaires et flyschs). Ces mouvements de terrain peuvent ainsi prendre la forme de glissements structuraux, de glissements-coulées, d'écroulements, etc. Si quelques uns sont actifs, citons entre autres, les glissements de *La Valette*, *Poche*, *Super-*

Sauze ou bien encore *Pra-Bellon*, la plupart de ces mouvements de terrain sont dormants ou fossilisés (Maquaire *et al.*, 2003).

Sur **le versant ubac**, la zone comprise entre les torrents des *Flourats* et de *Clapouse* est particulièrement affectée par des mouvements de terrain (essentiellement des glissements de terrains) qui se développent essentiellement dans les '*Terres Noires*', en partie basse et médiane des versants. A l'ouest de cette zone, les mouvements de terrain sont moins nombreux mais se localisent plutôt en partie haute des bassins versants. C'est le cas par exemple des glissements qui prennent place dans les bassins de réception des torrents du *Sauze*, du *Gaudeissart* et du *Riou Chanal*.

Sur **le versant adret**, les mouvements de terrain se répartissent sur la quasi totalité des bassins versants, même si les bassins versants du *Riou-Bourdoux*, de *La Valette* et de *Faucon* sont les plus affectés. Contrairement au versant ubac, ces instabilités se localisent pour la plupart en partie médiane et haute des versants. Ainsi, dans ces secteurs, les glissements de terrain se déclenchent souvent à proximité de la limite entre les nappes de charriage et les '*Terres Noires*' autochtones, comme par exemple les glissements de terrain de *La Valette* ou du ravin de *la Rata*. Certains d'entre eux prennent place directement dans les bassins de réception, comme par exemple les glissements de terrain affectant les torrents de *l'Abeous* ou du *Bourget*. Ces mouvements de terrains actifs, sont pour la plupart connectés aux organismes torrentiels.

En conclusion, les torrents identifiés comme étant les plus actifs (*Abeous*, *Bourget*, *Faucon*, *Riou Bourdoux* et *Sanières*), tous localisés en adret présentent de nombreux facteurs de prédisposition :

- ils prennent **leur source** dans les **nappes de charriage** du *Parpaillon* (barres rocheuses ou tabliers d'éboulis) ;
- ils présentent tous un profil en long particulier caractérisé par **des pentes très fortes dans le bassin de réception** ;
- ils affouillent majoritairement les flyschs et les calcaires des nappes de charriage, les '*Terres Noires*' et les formations morainiques ;
- **de nombreux mouvements de terrain sont actifs dans les parties hautes et médianes** de ces bassins versants. Ces mouvements de terrain sont des glissements translationnels ou rotationnels plus ou moins profonds, des coulées de débris, etc.

2.5.2. Morphométrie des bassins versants torrentiels

En complément de l'analyse morphologique, nous avons cherché à voir si une approche morphométrique pouvait fournir des informations supplémentaires sur les facteurs de prédisposition. Cette analyse morphométrique s'appuie sur l'analyse conjointe des caractéristiques géométriques classiques des bassins versants (aire, périmètre, longueur, etc.) et d'indices morphométriques (indice de pente, indice de forme) pour définir si il existe un lien entre l'activité des torrents et leurs caractéristiques morphométriques,

Sur les trente deux appareils torrentiels, seuls vingt-six torrents actifs pour lesquels des informations étaient disponibles dans les archives ont été retenus. En effet, certains 'petits' appareils n'ont pas été pris en compte du fait de leur taille (quelques ha), ou de leur appartenance à part entière à un bassin versant torrentiel d'ordre supérieur.

Les caractéristiques géométriques de ces vingt six bassins versants torrentiels ont été comparées (Tab. 2.13). Ces caractéristiques ont été mesurées à partir du MNT BD Alti dont la résolution spatiale est de 30 m. **L'aire du bassin versant** est définie à l'exutoire de l'apex, ainsi la surface du cône de déjection n'a pas été considérée dans le calcul de l'aire totale du

bassin versant. En effet, la prise en compte de la surface du cône de déjection rendrait plus difficile l'interprétation des résultats morphométriques en 'grossissant' les caractéristiques des torrents les plus actifs (Marchi et Brochot, 2000 ; Brochot et Marchi, 2000). Ceci est d'autant plus judicieux que certains torrents ne possèdent pas véritablement de cônes de déjection.

L'aire des bassins versants torrentiels varie entre quelques dizaines d'hectares (torrents des *Argiles* ou de *Flourats*) à plusieurs dizaines de kilomètres carrés (*Abries*, *Riou Versant* ou *Riou Bourdoux*). Les torrents situés en ubac sont plus vastes (9.5 km^2 en moyenne) que ceux situés en adret (6.4 km^2). La grande différence en termes de surface entre les deux catégories de torrents est due aux vastes torrents situés en ubac, comme le torrent d'*Abriès* (50 km^2), du *Riou Versant* (40.7 km^2) ou encore du *Rioclar* (14.8 km^2).

Tableau 2.13 *: Caractéristiques géométriques des bassins versants torrentiels du bassin de Barcelonnette (en gras, les cinq torrents les plus actifs) classés selon leur pente.*

Bassin versant	Aire (km^2)	Périmètre (km)	Longueur max (km)	Altitude min (m)	Altitude max (m)	Dénivelé (m)	Pente moy. (°)
Torrents localisés en adret							
Thuiles	4.2	10.6	3.9	1087	2650	1563	17.9
Bourget	**4.0**	**11.0**	**4.5**	**1188**	**2891**	**1703**	**17.0**
Faucon	**6.0**	**13.5**	**4.9**	**1171**	**2964**	**1793**	**16.5**
Berarde	3.0	9.4	3.7	1112	2476	1364	16.3
Bourreaux	1.3	7.3	3.0	1078	2110	1032	15.5
St-Pons	4.8	13.4	5.2	1119	2808	1689	14.5
Sanières	**4.8**	**12.6**	**5.3**	**1215**	**2874**	**1659**	**14.2**
Abeous	**14.1**	**16.7**	**5.6**	**1029**	**2772**	**1743**	**13.9**
La Valette	2.5	8.6	3.4	1127	2140	1013	13.2
Riou Bourdoux	**18.8**	**22.6**	**7.2**	**1101**	**2849**	**1748**	**10.9**
Moyenne	**6.4**	**12.6**	**4.7**	**1122.7**	**2653.4**	**1530.7**	**15.0**
Ecart-type	**5.6**	**4.4**	**1.2**	**55.6**	**310.6**	**294.0**	**2.1**
Torrents localisés en ubac							
Riou Chanal	2.8	9.6	3.7	1187	2612	1425	17.1
Frache	3.5	10.9	4.5	1233	2847	1614	15.9
Bramafan	2.5	11.3	4.0	1163	2567	1404	15.5
La Tour	1.0	5.7	2.1	1180	1846	666	14.2
Poche	3.1	10.9	4.6	1199	2567	1368	13.5
Gaudeissart	5.5	13.3	5.4	1125	2651	1526	12.7
Ribes	1.3	8.	3.9	1192	2242	1050	12.2
Rioclar	14.8	21.6	6.8	1045	2888	1843	12.2
Enchastrayes	10.9	16.4	5.8	1250	2759	1509	11.6
Sauze	5.5	14.6	5.9	1154	2651	1497	11.4
Bourre	9.4	14.3	5.7	1240	2667	1427	11.2
Flourats	0.3	3.9	1.80	1179	1612	433	10.8
Argiles	0.6	5.3	2.4	1198	1744	546	10.3
Claveaux	1.2	5.3	2.2	1131	1604	473	9.5
Riou Versant	40.7	29.8	9.9	1232	2847	1615	7.3
Abries	50.1	41.1	12.6	1199	3002	1803	6.4
Moyenne	**9.6**	**13.9**	**5.1**	**1181.7**	**2444.1**	**1262.4**	**12.0**
Ecart-type	**14.7**	**9.8**	**2.9**	**51.5**	**477.0**	**474.1**	**2.9**
Tous les torrents							
Moyenne	**8.6**	**13.4**	**4.9**	**1159.0**	**2454.6**	**1365.6**	**13.1**
Ecart-type	**12.1**	**8.1**	**2.4**	**59.7**	**426.6**	**428.6**	**3.0**

Logiquement, **le périmètre** et **la longueur maximale** présentent grossièrement le même classement, les bassins versants les plus vastes possèdent les périmètres et les longueurs maximales les plus élevés.

Tableau 2.14 *: Indices morphométriques des torrents du Bassin de Barcelonnette.*

Bassin versant	Indices de pente		Indices de forme					
	T	Rt	KC	LMI	IE	Re	D	Le
Torrents situés en adret								
Abeous	**464.5**	**133.1**	**1.3**	**15.6**	**4.4**	**4.2**	**0.6**	**0.9**
Berarde	780.2	560.8	1.5	22.8	5.4	2.9	1.5	0.1
Bourget	**847.4**	**502.7**	**1.5**	**23.7**	**5.5**	**2.8**	**1.4**	**0.2**
Bourreaux	891.8	1193.6	1.8	31.6	6.3	2.4	2.7	0.1
Faucon	**731.9**	**340.0**	**1.5**	**23.8**	**5.5**	**3.1**	**1.1**	**0.2**
La Valette	639 .7	629.7	1.5	23.6	5.5	2.9	1.7	0.1
Riou-Bourdoux	**403.1**	**104.4**	**1.5**	**21.3**	**5.2**	**3.8**	**0.6**	**0.9**
Sanières	**750.7**	**414.1**	**1.6**	**25.7**	**5.7**	**2.6**	**1.3**	**0.2**
St-Pons	772.9	389.1	1.7	29.4	6.1	2.6	1.4	0.2
Thuiles	760.8	448.0	1.5	20.9	5.2	3.3	1.3	0.2
Moyenne	**711.5**	**471.6**	**1.5**	**23.8**	**5.5**	**3.1**	**1.4**	**0.3**
Ecart-type	**156.3**	**288.5**	**0.1**	**4.2**	**0.5**	**0.5**	**0.6**	**0.3**
Torrents situés en ubac								
Abries	254.6	41.2	1.6	26.5	5.8	3.5	0.4	1.9
Argiles	722.8	2613.4	1.9	38.3	7.0	2.0	4.6	0.1
Bourre	464.4	206.5	1.3	17.1	4.7	3.4	0.8	0.5
Bramafan	877.7	684.9	2.0	39.4	7.0	2.5	2.2	0.1
Claveaux	435.1	1158.9	1.4	18.8	4.9	3.0	2.2	0.1
Enchastrayes	458.4	184.3	1.4	19.5	5.0	3.5	0.8	0.6
Flourats	739.4	4149.9	1.9	35.3	6.7	2.0	5.7	0.1
Frache	600.0	503.5	1.6	26.3	5.8	2.6	1.5	0.1
Gaudeissart	649.0	326.1	1.6	25.2	5.7	2.7	1.2	0.2
La Tour	656.6	1464.0	1.6	24.7	5.6	3.0	2.8	0.1
Poche	777.6	589.2	1.7	30.3	6.2	2.4	1.8	0.1
Ribes	920.4	1273.7	2.1	45.3	7.6	1.8	3.3	0.1
Rioclar	479.7	133.2	1.6	24.8	5.6	3.5	0.7	0.6
Riou-Chanal	852.3	674.7	1.6	26.2	5.8	2.8	1.7	0.1
Riou-Versant	253.3	50.1	1.3	17.1	4.7	4.0	0.4	2.4
Sauze	655.3	336.2	1.7	30.1	6.2	2.5	1.3	0.2
Moyenne	**612.3**	**899.4**	**1.7**	**27.8**	**5.9**	**2.8**	**2.0**	**0.4**
Ecart-type	**205.8**	**1097.3**	**0.2**	**8.0**	**0.8**	**0.6**	**1.5**	**0.7**
Tous les torrents								
Moyenne	**647.7**	**734.8**	**1.6**	**26.3**	**5.7**	**2.9**	**1.7**	**0.4**
Ecart-type	**191.0**	**894.9**	**0.2**	**7.2**	**0.8**	**0.6**	**1.3**	**0.6**

[1] *T : le taux de relief exprime le dénivelé et la racine carré de la surface (Saam, 1998) ;*
[2] *Rt : l'indice de soulèvement est le rapport en l'altitude moyenne et la surface (Schmidt et al., 2000) ;*
[3] *KC : indice de compacité de Gravelius. Il tend vers 1 pour un bassin circulaire ;*
[4] *LMI : lemniscale ratio (Chorley et Morgan, 1956) ;*
[5] *IE : indice d'élongation du bassin (Saam, 1998) ;*
[6] *Re : indice d'allongement du bassin (Schumm, 1956) ;*
[7] *D : indice de développement (Saam, 1998) ;*
[8] *Le : indice d'étalement du bassin versant (Horton, 1932).*

Les caractéristiques liées au relief montrent que les bassins versants possèdent tous une grande énergie. **Le dénivelé** s'étend de 433 m (*Flourats*) à 1843 m (*Rioclar*) pour un dénivelé moyen de 1350 m environ. Ces dénivelés correspondent à des pentes moyennes

comprises entre 6° (*Abriès*) et 17° (*Riou Chanal*). Ces pentes moyennes sont nettement plus élevées en adret (15°) qu'en ubac (12°). Ainsi, les torrents les plus actifs (en gras dans le tableau) sont caractérisés par une forte énergie du relief essentiellement en partie haute.

A partir des caractéristiques topographiques de ces vingt-six bassins versants, des indices morphométriques ont été calculés : deux indices de pente et six indices de forme. Seuls les indices dont les plages de variation étaient suffisamment discriminantes ont été présentés.

Les deux **indices de pente** (le taux de relief *T*, et l'indice de soulèvement *Rt*, Tab. 2.14) soulignent la même tendance observée sur les profils en long. Pour l'ensemble des torrents. le taux de relief (*T*) est très fort et caractéristique d'un relief de haute montagne (moyenne de 500 environ). Le taux de relief est plus fort pour les torrents localisés en adret (711) que pour les torrents localisés en ubac (612). Théoriquement, cela signifie que **les torrents situés en adret ont une capacité plus forte à déplacer des matériaux ou des composés à travers les bassins versants** (Saam. 1998). L'interprétation du taux de soulèvement (*Rt*) est plus difficile, car l'effet de la surface est particulièrement important. De ce fait, les taux de soulèvement sont particulièrement forts pour les bassins versants de petites tailles (*Argiles*, *Flourats*, *Ribes*, etc.). A l'inverse, les faibles valeurs correspondent à des bassins versants plus vastes (*Abriès*, *Riou Bourdoux*, *Riou Versant*).

Les six indices de forme sont l'indice de compacité de Gravelius *KC*, le lemniscale ratio *LMI* (Chorley et Morgan, 1956), l'indice d'élongation du bassin *IE* (Saam, 1998), l'indice d'allongement du bassin *Re* (Schumm, 1956), l'indice de développement *D* (Saam, 1998) et l'indice d'étalement du bassin *Le* (Horton, 1932). Ces indices décrivent des bassins versants torrentiels caractéristiques avec des formes relativement allongées (*KC* compris entre 1.3 et 2.1, *IE* compris entre 4.4 et 7.0 et *Re* compris entre 1.8 et 4.2). **Les indices d'étalement** et de **développement** distinguent clairement les bassins à forme circulaire (*Abeous*, *Abriès*, *Riou Bourdoux* et *Riou Versant*) des bassins à formes plus filiformes (*Bourget*, *Faucon*, *Poche*, *Sauze*. etc.). La comparaison entre l'activité du torrent et les indices de forme n'est pas très instructive, en effet aucun indice ne permet de discriminer les torrents en fonction de leur activité.

Tableau 2.15 *: Dimensions caractéristiques des cônes de déjection des torrents les plus actifs du bassin de Barcelonnette et de quelques cônes torrentiels alpins.*

Département	Torrent	Superficie du bassin-versant (km^2)	Superficie du cône (km^2)	Surface du cône/surface du bassin versant (%)
Savoie[1]	*Claret*	2.5	1.1	43.0
	Ravoire	11.4	0.3	3.0
	Rieu Sec	0.8	0.4	42.0
Hautes-Alpes	*Boscodon*	35.6	2.0	6.0
	Verdarel	3.8	0.5	14.0
Alpes-de-Haute-Provence	***Abeous***	**14.4**	**0.6**	**4.1**
	Bourget	**5.5**	**0.8**	**14.5**
	Faucon	**10.5**	**1.1**	**10.5**
	Riou-Bourdoux	**22.8**	**2.5**	**10.9**
	Sanières	**8.5**	**3.0**	**35.2**
Alpes Maritimes	*Maiola*	13.6	0.0	0.1
	Tuebi	6.1	0.1	2.0

[1] *: les valeurs des torrents de Savoie, Hautes-Alpes et Alpes-Maritimes sont extraites de Bonnet-Staub, 1998.*

La taille des **cônes de déjection** est très variable, elle est directement reliée à l'historique de l'activité du torrent (Tab. 2.15). Certains torrents ne possèdent pas de cône de déjection à proprement dit. Ainsi, mis à part *l'Abeous*, pour tous les torrents actifs, la surface du cône de déjection représente au moins 10% de la surface totale du bassin versant. Ceci témoigne notamment de la forte activité torrentielle passée de ces bassins versants (Miramont, 1998).

Les caractéristiques des cinq plus grands cônes torrentiels (qui correspondent logiquement aux cônes des torrents les plus actifs : *Abeous*, *Bourget*, *Faucon*, *Riou Bourdoux* et *Sanières*) ont été comparées à des cônes de torrents actifs situés dans l'arc alpin (Tab. 2.13). Le ratio surface du cône sur surface totale du bassin versant des cônes du bassin de Barcelonnette est comparable à ceux observés sur d'autres torrents alpins avec une gamme de variation relativement similaire : de 4 à 35% pour les torrents du Bassin, de 0 à 43% pour les autres torrents alpins. Brochot et Marchi (2000) soulignent que ce rapport permet de distinguer clairement les torrents actifs des autres. Néanmoins, les cas de l'*Abeous*, la *Maiola* et du *Tuebi*, tous deux actifs, ne suivent pas cette règle.

L'analyse des indices morphométriques ne montre pas de véritable lien avec l'activité du torrent. De nombreux auteurs ont souligné le manque de pertinence de ces méthodes en hydrologie (Birot, 1955 ; Tricart, 1991 ; Lambert, 1996). Delahaye (2002) et Douvinet (2004) estiment que ce manque de pertinence est lié à l'absence de prise en compte de la totalité du système morphologique (forme du bassin, système de pentes, hiérarchie du réseau hydrographique). Le seul véritable point commun entre les torrents les plus actifs est la taille relativement importante de leur cône de déjection (au moins 5 km^2). Ainsi, logiquement, **la taille des cônes de déjection est le meilleur indicateur morphométrique de l'activité torrentielle passée**.

2.5.3. Conclusion

L'analyse morphologique et morphométrique des appareils torrentiels du bassin de *Barcelonnette* montre que les torrents à lave sont caractérisés par un certain nombre de facteurs de prédisposition :

- ils sont localisés majoritairement en adret et prennent leur source dans les flyschs et les calcaires de la nappe du *Parpaillon* ;
- Ils affouillent en partie médiane les '*Terres Noires*' et les formations morainiques ;
- de nombreuses instabilités (éboulis, glissements de terrain, écroulement), localisées dans le bassin de réception et les parties hautes de ces bassins, sont connectées au torrent. Elles sont autant de zone sources potentielles.

Trois grandes catégories d'appareils torrentiels peuvent être distinguées par leurs caractéristiques morphométriques :

- **les petits appareils torrentiels** (*Bourreaux*, *Flourats*, *La Tour*, etc.) avec une superficie inférieure à 1 km^2 et des pentes moyennes relativement fortes (> 15°). Ils correspondent à des ravines élémentaires incisées dans les '*Terres Noires*' en partie médiane et basse des versants. Leur forme est très allongée et ils ne possèdent pas de cône de déjection proprement dit ;
- **les appareils torrentiels intermédiaires** (*Bourget*, *Faucon*, *Riou Chanal*, etc.) avec une superficie comprise entre 1 et 10 km^2 et des pentes moyennes comprises entre 12 et 17°. Ils se développent sur un linéaire de plusieurs kilomètres et un dénivelé supérieur à 1000 m. Leur forme est relativement allongée ;
- **les appareils torrentiels bien développés** (*Abriès*, *Abeous*, *Riou Bourdoux*, *Riou Versant*) avec une superficie supérieure à 10 km^2 et des pentes moyennes faibles à modérées (6 à 11°). Ces appareils ont souvent de nombreux affluents et la forme de leur bassin versant est circulaire.

Cette analyse morphométrique apparaît quelque peu décevante, car elle n'apporte pas d'informations supplémentaires sur les facteurs de prédisposition des torrents à lave. Néanmoins, les torrents les plus actifs se répartissent entre les appareils intermédiaires et bien développés. Les sites d'études devront donc être choisis parmi ces deux catégories.

2.6. Conclusion du chapitre 2

Les caractéristiques morpho-climatiques et anthropiques, ont favorisé le développement d'un réseau torrentiel particulièrement dense et actif dans le bassin de *Barcelonnette*. L'analyse historique de l'activité torrentielle a montré que ces torrents connaissent une forte activité depuis près de deux siècles selon une succession de périodes de crise et de calme. **Cette activité s'est essentiellement concentrée (91% des laves répertoriées) dans les torrents localisés en adret** : le *Riou-Bourdoux*, les *Sanières*, le *Faucon*, le *Bourget* et l'*Abeous*. Dans ces torrents, un peu moins d'une centaine de laves torrentielles s'est déclenchée ; par contre, certaines laves ont provoqué d'importants débordements.

L'étude des conditions climatiques associées à des événements de laves torrentielles a confirmé logiquement le lien étroit entre la survenance **d'orages estivaux violents particulièrement localisés** et le déclenchement des laves. Néanmoins, les conditions d'acquisition des données de pluie et l'impossibilité de définir un seuil de précipitations en termes de probabilité de déclenchement ne permettent pas de définir une relation précise entre le déclenchement et les conditions pluviométriques. La définition de cette relation est une piste de recherche a explorée dans les prochaines années, en mettant notamment en place un réseau de pluviomètres à proximité des crêtes pour mieux caractériser les conditions pluviométriques dans ces secteurs stratégiques.

A l'échelle du bassin de *Barcelonnette* (1/50 000ème), les analyses morphologique et morphométrique des bassins torrentiels a permis de mettre en évidence des **facteurs de prédisposition** communs aux torrents les plus actifs. Néanmoins, ces analyses ne permettent pas, à elles seules, de se prononcer sur la capacité des appareils torrentiels à produire des laves. En effet, deux torrents aux caractéristiques analogues peuvent présenter une activité différente. Pour affiner l'analyse, il est donc nécessaire de travailler à l'échelle du bassin versant (1/10 000ème). Ce travail doit être mené sur des torrents actifs où des événements de laves sont bien renseignés en termes de conditions de déclenchement, de propagation et de dépôt.

Les bassins versant torrentiels les plus actifs et qui ont connu une activité récente ont été choisis comme sites d'étude. Ces sites sont tous situés sur le versant adret ; leur description détaillée est présentée dans le troisième et dernier chapitre de cette première partie du mémoire.

Chapitre 3 : SITES D'ETUDES ET EVENEMENTS TORRENTIELS SURVENUS ENTRE 1996 ET 2004

Dans le chapitre 2, plusieurs torrents du bassin de *Barcelonnette* ont été identifiés comme particulièrement actifs ; parmi ces torrents, quatre ont été le siège de crues et/ou de laves torrentielles durant la période 1996-2004 : les torrents de **l'*Abeous*, du *Bourget*, de *Faucon*, et des *Sanières***. Le choix des sites d'études a donc été guidé essentiellement par l'activité torrentielle ancienne et surtout récente. Ces quatre torrents, tous situés en adret, ont leurs propres spécificités en termes de morphologie ou de correction torrentielle ; elles seront présentées synthétiquement pour chacun d'eux. **Le torrent de *Faucon*** a été choisi comme site d'étude principal pour les raisons suivantes :

- il a connu **les événements les plus importants** au cours de ces dix dernières années (1996, 2002 et 2003) ;
- ses **caractéristiques morphologiques** et sa taille sont particulièrement représentatives des torrents du bassin (§ 2.5.) ;
- il a fait l'objet d'une **intense correction torrentielle** ce qui rend son choix encore plus intéressant pour étudier notamment l'impact de ces corrections sur les crues et les laves torrentielles ;
- enfin, de **nombreuses informations historiques** sont disponibles dans les travaux menés par des équipes universitaires et dans les archives des services RTM de *Barcelonnette* et de *Digne*.

La présentation des sites d'études et la description d'événements torrentiels survenus dans ces sites (essentiellement en termes de dégâts associés) sont successivement abordées. Ainsi, ce chapitre présentera successivement pour chacun des bassins versants :

- les caractéristiques morphologiques, hydrologiques et anthropiques. Des cartes morphodynamiques simplifiées, orientées '*lave torrentielle*', ont été dessinées pour chacun d'eux. Ces cartes présentent les principales caractéristiques hydrologiques, morphologiques (formations superficielles, mouvements de terrains) et anthropiques (ouvrages torrentiels). Elles aideront le lecteur à apprécier le contexte morphodynamique des dépôts et des formations superficielles dont les caractéristiques seront étudiées au chapitre 5 ;
- les descriptions des événements torrentiels survenus entre 1996 et 2004 en termes de morphologie caractéristiques du chenal, des berges, du cône et des dépôts et en termes de dégâts occasionnés.

3.1. Présentation des sites d'études

3.1.2. Le site d'étude principal : le bassin versant du torrent de Faucon

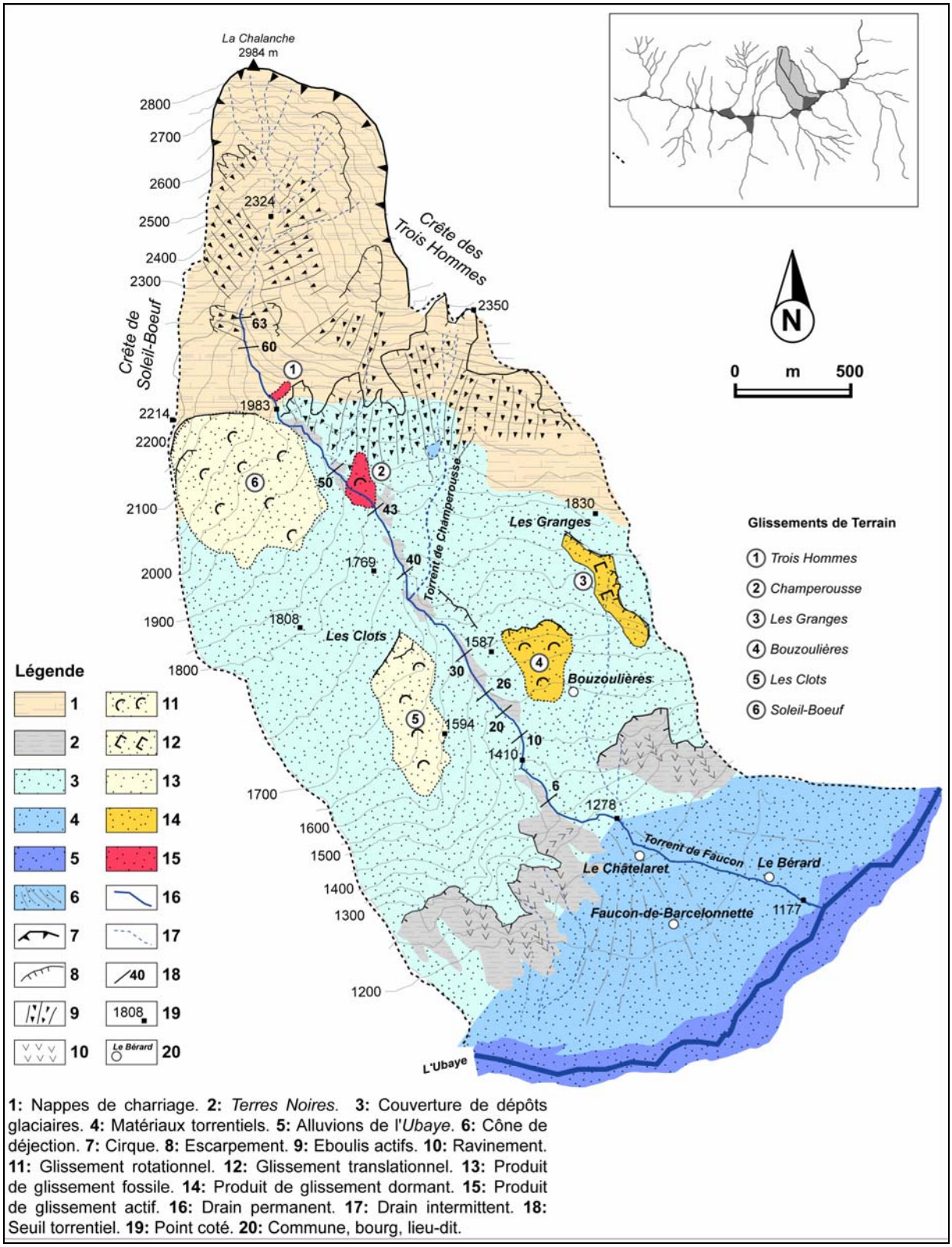


Figure 3.1 *: Carte morphologique du bassin versant du torrent de Faucon.*

Le bassin versant torrentiel du *Faucon* est situé en adret du bassin de *Barcelonnette*, en rive droite de l'*Ubaye*. Sa limite septentrionale correspond à la *Crête des Trois Hommes*. La forme générale du bassin versant est très allongée ; étroit en partie haute (750 m de largeur environ), il s'évase progressivement jusqu'à son cône de déjection.

Il est constitué d'un ensemble hydrographique comprenant un drain principal, le torrent de *Faucon*, et un affluent, le torrent de *Champerousse* (Fig. 3.1). Nous décrirons successivement l'appareil torrentiel du *Faucon* et du *Champerousse*.

3.1.2.1. Morphologie du torrent de Faucon

Le torrent de *Faucon* prend sa source en contrebas de la crête de *La Chalanche* (2984 m) à 2550 m d'altitude environ. D'une longueur de 6 km, il s'écoule dans un long et profond ravin au tracé et au profil transversal changeant. Il draine une surface de 8.2 km^2 en amont du cône de déjection. A partir de la source (2550 m), le torrent dévale 1420 m de dénivellation en 6 km soit une pente moyenne de 17°. La morphologie du chenal est ainsi très changeante. **107 seuils** (81 seuils anthropiques et 26 seuils naturels) provoquent localement des variations dans le profil en long (Fig. 3.2). Ainsi, dans certains secteurs, la pente du profil en long peut atteindre 25° à 50°.

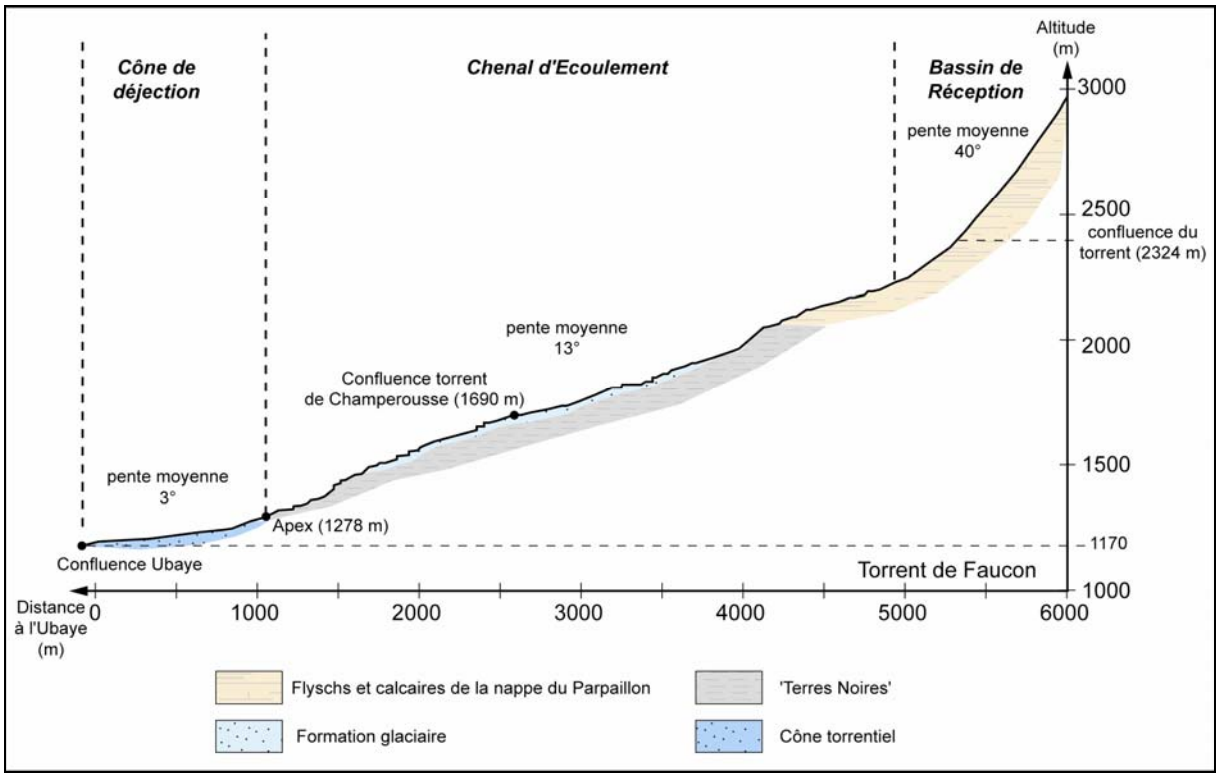


Figure 3.2 *: Profil en long du torrent de Faucon.*

Le torrent affouille en partie haute les calcaires et les flyschs des nappes de l'*Autapie* et du *Parpaillon* (3000 m à 1900 m d'altitude). En partie médiane et basse, il affouille les '*Terres Noires*' et les formations morainiques (1900 m à 1300 m d'altitude).

Surcreusé dans un cirque glaciaire, le **bassin de réception** (Fig. 3.3) culmine à 2984 m. Il cède sa place au chenal torrentiel aux environs de 2250 m d'altitude. Sa superficie est de 0.25 km^2 et il présente une forme d'amphithéâtre avec des crêtes escarpées et fortement inclinées (entre 30° et 50°). Elles sont taillées dans les flyschs à Helminthoïdes de la nappe du *Parpaillon*. De nombreux petits ravins, espacés d'une dizaine de mètres environ, parcourent les parois du bassin de réception.

Figure 3.3 *: Le bassin de réception du torrent de Faucon depuis la crête de Soleil-Bœuf (avril 2002).*

La source est située à la confluence de plusieurs ravins. Des langues de névé peuvent encombrer le chenal sur plusieurs centaines de mètres ; dans ce secteur, le chenal torrentiel est très étroit et escarpé, il s'élargit progressivement vers l'aval jusqu'au chenal d'écoulement proprement dit.

Débutant à 2250 m d'altitude environ, le **chenal d'écoulement** est peu sinueux. Le chenal a une pente moyenne de 13°, mais il présente un profil en long très irrégulier. Cette irrégularité est provoquée conjointement par les seuils naturels et anthropiques et par la disposition structurale. Dans la zone de contact entre les '*Terres Noires*' autochtones et les nappes de charriages, on observe une forte augmentation de la pente du profil (Fig. 3.2). Le chenal d'écoulement est encombré par endroits de nombreux dépôts issus de laves torrentielles granulaires ou cohésives, de crues torrentielles, de produits de glissement, etc. Ces dépôts prennent la forme de levées, de terrasses perchées, d'embâcles, etc. Les **profils transversaux** sont très changeants mais **trois grands types** peuvent être distingués (Fig. 3.4) :

- ***un profil en V,*** avec des versants abrupts et des berges raides, généralement érodées ou sapées à la base. Les formations superficielles sont peu nombreuses sur le substratum des schistes noirs de la nappe de l'*Autapie* en partie haute, et des *Terres Noires* et marno-calcaires en partie centrale et basse. Ce type de profil est accompagné la plupart du temps par une forte pente du lit torrentiel (>10°), de nombreuses zone d'érosion (incision linéaire, sapement de berge) et de nombreux seuils naturels. Par contre, il est très rare de trouver des dépôts de laves torrentielles dans ces zones. Quand le chenal devient très étroit, de nombreux embâcles naturels sont observés ;
- ***un profil à fond plat,*** aux versants moins escarpés, où le torrent bien souvent divague au gré des dépôts torrentiels et des seuils naturels ou anthropiques. Le fond du lit est large, présentant à la faveur d'une diminution de la pente d'importants dépôts de laves torrentielles. Ils prennent la forme de larges terrasses, de levées pouvant atteindre 3 à 4 m de haut ou bien encore de lobes. Contrairement au profil précédent, les formations superficielles (colluvions, moraines, formations de pente) sont nombreuses, recouvrant de façon plus ou moins continue le substratum marneux ;

▪ ***un profil dissymétrique*** associant un versant raide (souvent raviné en partie haute ou sujet à des phénomènes d'érosion hydro-gravitaire) et un versant aux pentes plus douces. Des dépôts torrentiels recouvrent par endroit le bas des versants à pente douce. La dissymétrie des versants est associée bien souvent à une opposition lithologique ou à la présence d'un mouvement de terrain sur l'une des deux rives.

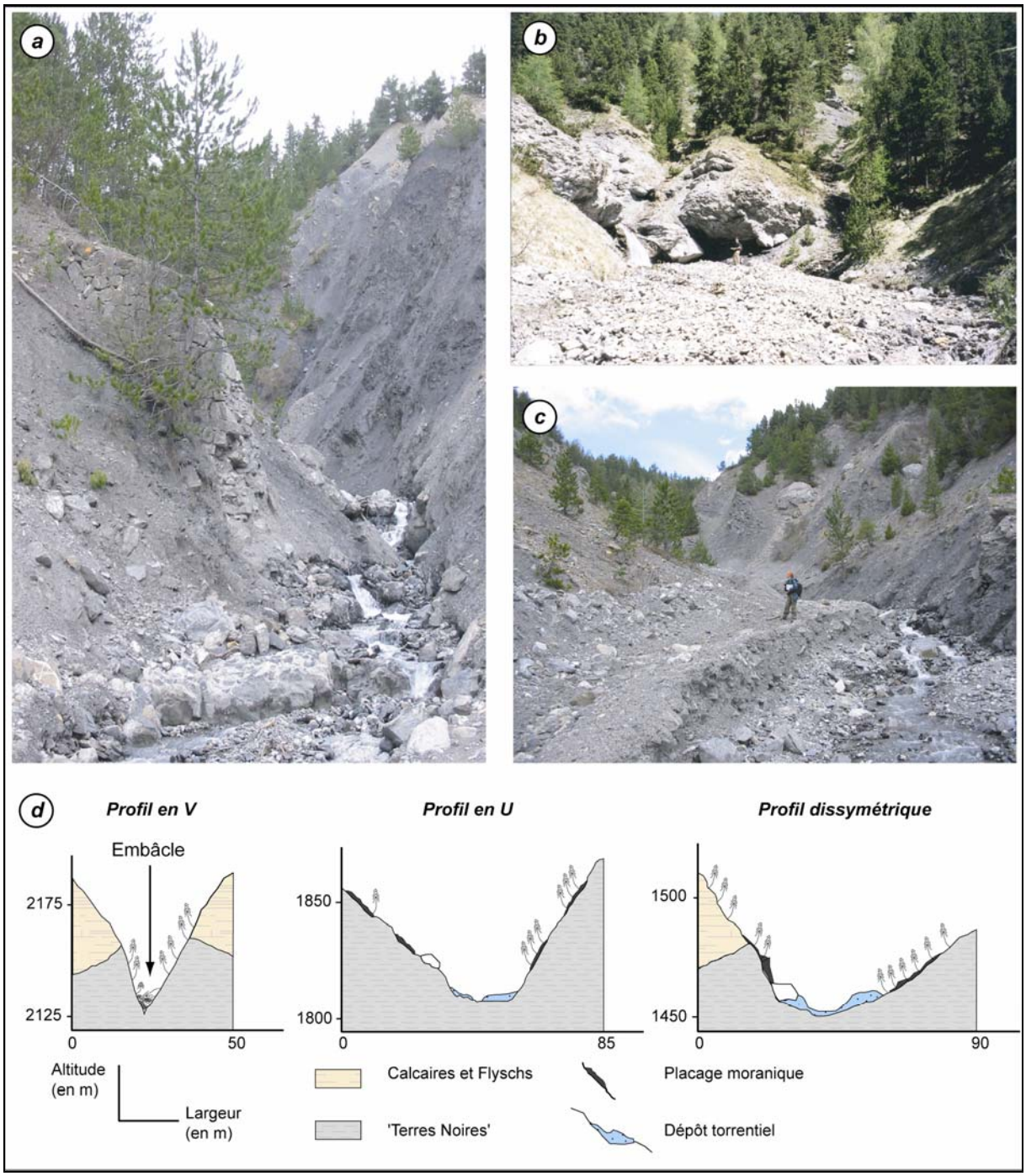


Figure 3.4 *: Le chenal torrentiel du Faucon.*

a : photographie d'un profil en V avec en rive droite le vestige d'un seuil en pierres maçonnées ;
b : photographie d'un profil en U ;
c : photographie d'un profil dissymétrique avec en rive droite une terrasse torrentielle en voie de réincision ;
d : schéma illustrant les trois types de profils.

Les terrains contigus au chenal torrentiel sont parfois affectés par des **mouvements de terrain** divers, de quelques dizaines à quelques milliers de m^3 : glissement, ravinement, éboulement, etc. A partir des observations et des relevés de terrain, 6 glissements importants peuvent être qualifiés selon leur activité comme actif, dormant et fossile. Les principaux mouvements de terrain sont les glissements de *Bouzoulières*, *Champerousse*, *Les Clots*, *Les Granges*, *Soleil-Bœuf*, et *Trois Hommes*.

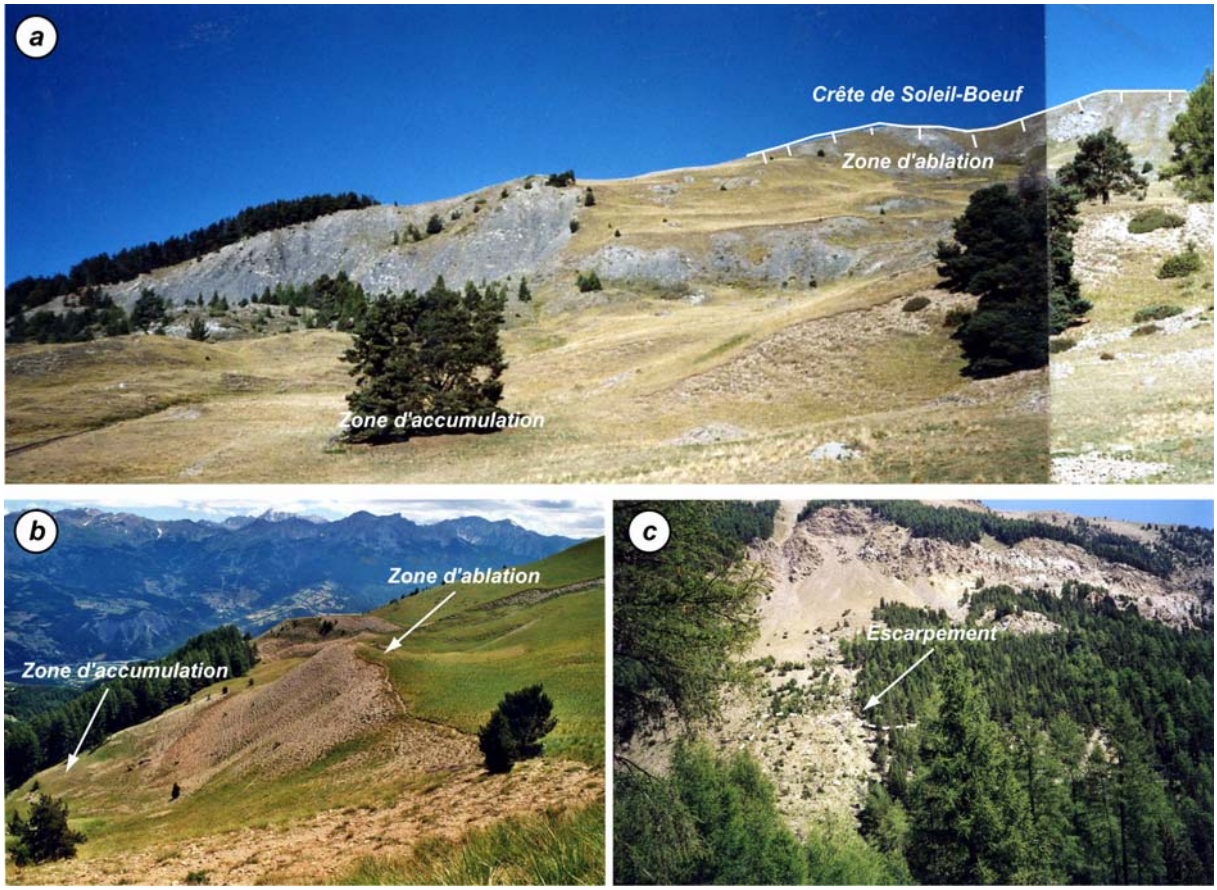


Figure 3.5 *: Glissements de terrain dans le bassin versant du torrent de Faucon.*

a : vue sur le glissement de terrain fossile de Soleil-Boeuf ;
b : vue sur le glissement de terrain fossile des Clots ;
c : vue sur le glissement de terrain actif de Champerousse.

En rive droite du torrent de *Faucon*, les deux glissements de terrain **fossiles** de *Soleil-Bœuf* (Fig. 3.5a) et des *Clots* (Fig. 3.5b) sont les plus étendus ; le premier affecte les flyschs, alors que le second affecte les marnes noires et les formations morainiques.

En rive gauche, les deux glissements de terrain **dormants** de *Bouzoulières* et des *Granges* affectent tout deux les moraines et les marnes noires ; les seuls signes d'activité sont perceptibles au niveau de l'escarpement principal où des traces d'érosion récente mais modérée sont visibles.

Les deux glissements les plus **actifs** sont situés en rive gauche, leur taille est plus réduite que les quatre précités mais ils sont directement connectés au torrent (Fig. 3.1). Les glissements de *Champerousse* et des *Trois Hommes* prennent place dans la zone de contact entre les marnes noires et les nappes de charriage. Ces instabilités, combinées à l'érosion torrentielle constante (sapements de berges) confèrent une topographie chahutée aux versants et aux berges. Une description plus détaillée (à l'échelle du bief) du chenal torrentiel et des versants du *Faucon* sera donnée dans le chapitre 4.

Le cône de déjection (Fig. 3.6) a une largeur maximale d'un peu plus de deux kilomètres et s'étend sur une longueur de 1750 m environ, entre les altitudes 1278 m (apex) et 1175 m en bordure de l'*Ubaye*. De pente faible (2° à 5°), le cône de déjection est incisé par le torrent sur 2 à 4 m de profondeur. Il se développe sur une superficie de 1.1 km^2, soit 10,5% de la superficie totale du bassin versant.

Ce cône torrentiel est composé de deux entités. **Le cône ancien** occupe la majorité de la surface. Des forêts et des cultures recouvrent l'essentiel de cette surface. Les sédiments qui le composent sont des dépôts limoneux, fins et renfermant bon nombre de débris végétaux. Ces dépôts alluviaux sont recouverts par endroit de dépôts de laves torrentielles. Ces dépôts ont une épaisseur estimée à une dizaine de mètres (Miramont. 1998). Ils sont datés de la période du '*Remblaiement Holocène Principal*' (Jorda. 1980). Le **cône actif** est constitué de nappes torrentielles superposées disposées à une centaine de mètres de part et d'autre du chenal. Les coupes stratigraphiques décrivent une succession de dépôts de laves torrentielles et des niveaux de charriage torrentiel plus classique (Remaître *et al.*. 2002). Les nappes torrentielles les plus anciennes ont été datées de l'âge de Fer (2190 ± 200 B.P.) à partir de sépultures retrouvées sous le village actuel de *Faucon-de-Barcelonnette* (Muller et Jorda. 1990).

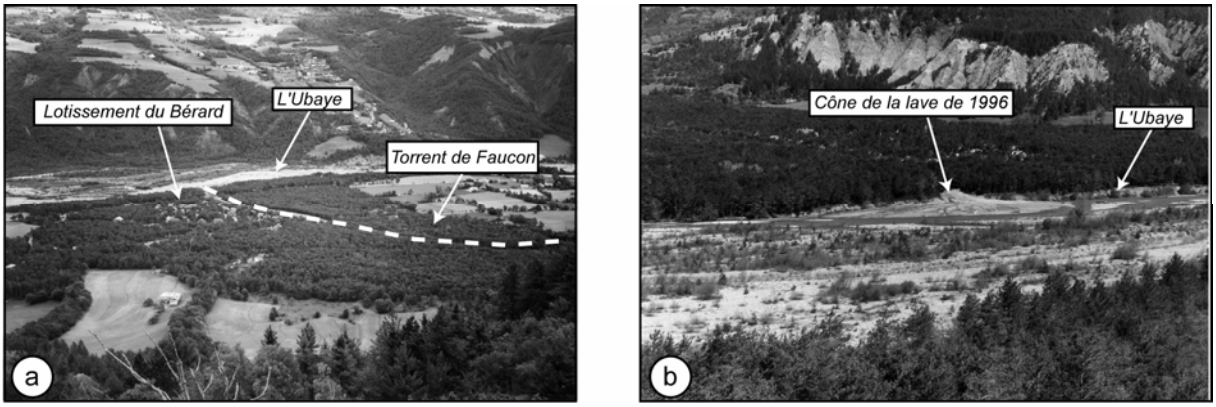


Figure 3.6 *: Le cône de déjection du torrent de Faucon.*

a : vue sur le cône de déjection depuis le Bourget ;
b : vue sur la partie inférieure du cône de déjection en 1997. le delta-cône formé par la lave d'août 1996 est encore visible.

A l'image de la plupart des torrents actifs du Bassin de *Barcelonnette*, le torrent de *Faucon* a fait l'objet de nombreux travaux de reboisement et de correction. En 1860, il a été choisi par *Prosper Demontzey* pour servir de 'laboratoire', afin de tester des dispositifs qui allaient ensuite être installés dans le torrent du *Riou Bourdoux* (Sivan, 2000). Ainsi, plus de cent seuils en pierre maçonnées ont dans un premier temps été construits entre 1860 et 1870. A partir de 1880, des seuils en béton sont construits pour renforcer le dispositif de correction. A l'heure actuelle, **81 seuils torrentiels** (en 2005) sont dénombrés. Toutes les informations quant à leur type, leur état, leur localisation, etc. peuvent être trouvées en annexe (Annexe 5).

Ce dispositif de correction a pour objectif de garantir la sécurité des éléments exposés localisés sur le cône de déjection (Fig. 3.7). Le lotissement du *Bérard*, situé en rive gauche, les ponts et la route départementale RD 900 constituent les principaux enjeux menacés par les débordements éventuels d'une lave torrentielle.

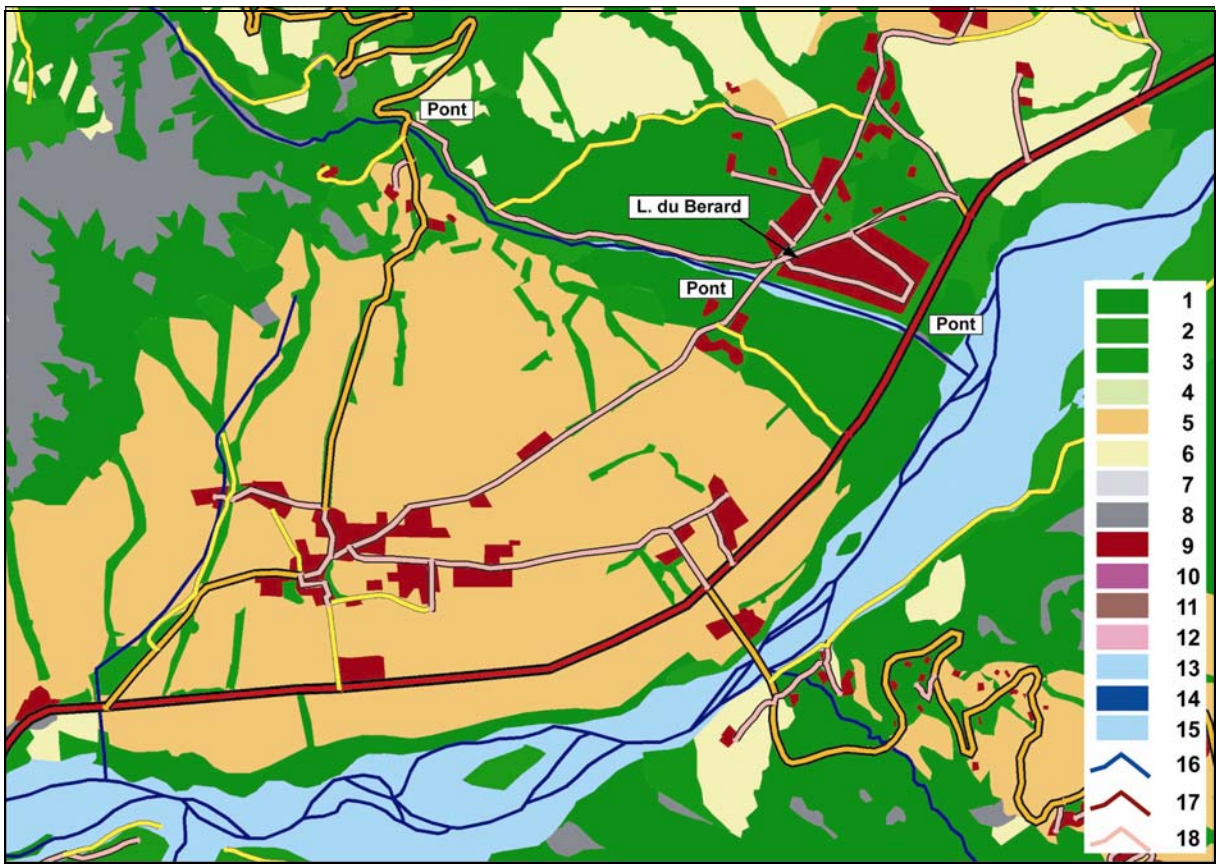


Figure 3.7 *: Occupation du sol sur le cône de déjection du torrent de Faucon.*

1 : conifères denses, 2 : conifères moins denses, 3 : feuillus, 4 : pelouses alpines, 5 : cultures, 6 : prairies permanentes, 7 : roches nues, 8 : marnes noires, 9 : zones urbanisées, 10 : zones industrielles ou commerciales, 11 : aérodrome, 12 : extraction de matériaux, 13 : cours d'eau, 14 : lacs, étangs, 15 : alluvions, 16 : lit vif, 17 : route, 18 : chemin, piste.

3.1.2.2. Morphologie du torrent de Champerousse

En partie centrale du chenal torrentiel (1690 m), le torrent de *Faucon* reçoit un affluent en rive gauche, le torrent de *Champerousse*. D'une longueur de 1 km environ, il draine le flanc Est du bassin versant de *Faucon*. Le torrent de *Champerousse* prend sa source en contrebas de la *crête des trois hommes*, au sein de la nappe du *Parpaillon* (Fig. 3.8a).

La pente moyenne du chenal torrentiel est très forte de l'ordre de 23°. Trois sections peuvent être distinguées en fonction de leur pente moyenne (Fig. 3.8a).

Le bassin de réception *stricto sensu* (pente moyenne 40°) est localisé au sein d'un escarpement rocheux armé par les flyschs dissociés de la nappe du *Parpaillon* (Fig 3.8b). Cet escarpement surplombe un tablier d'éboulis incisés par plusieurs ravins bien individualisés.

Une rupture de pente (1 960 m) marque la transition entre le bassin de réception et le secteur suivant. Ce secteur est compris entre deux chemins vicinaux : le chemin horizontal en amont, et le chemin menant vers *Soleil-Bœuf* en aval. La pente de ce secteur est moins forte passant de 15° à 6°. Le long de cette zone, le fond du lit et les berges sont tapissés par une végétation arbustive et arborée assez bien développée à l'abri de plusieurs seuils. Quelques petits glissements superficiels sont visibles par endroits mais ils n'excèdent pas 1 à 2 m de profondeur. Les matériaux du lit sont grossiers, composés de cailloux, de galets et de blocs de toutes tailles parfois emballés dans une matrice sableuse.

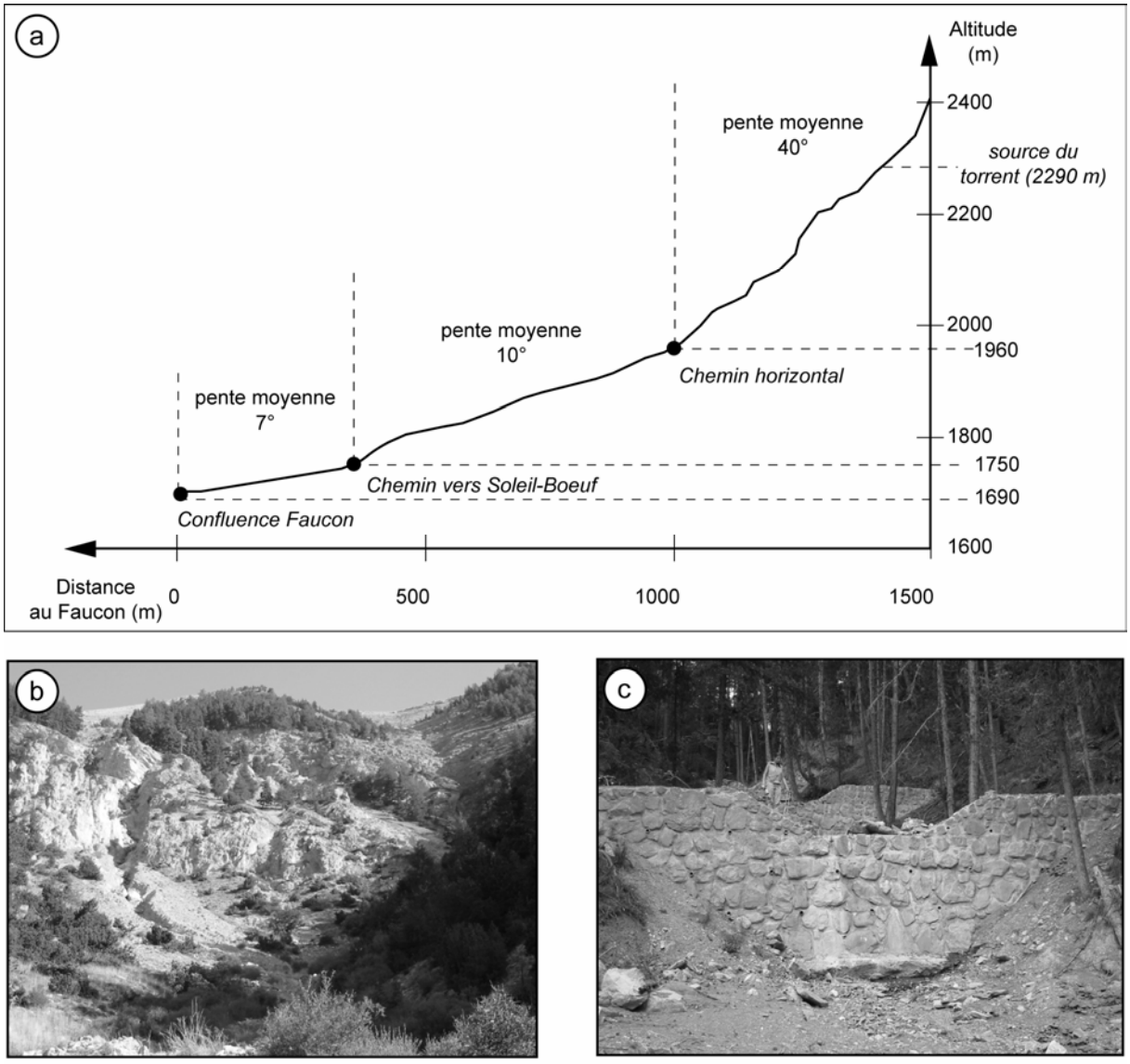


Figure 3.8 *: Le torrent de Champerousse.*

a : profil en long du torrent de Champerousse ;
b : vue sur le bassin de réception depuis l'abris de Champerousse ;
c : vue sur le chenal torrentiel de Champerousse en partie basse.

Le troisième et dernier secteur s'étend du chemin vers *Soleil-Boeuf* jusqu'à la confluence avec le torrent de *Faucon*. Sur l'ensemble de ce secteur, la morphologie du lit torrentiel et des versants est très peu variable. Les versants sont raides, avec une légère dissymétrie en partie haute de ce secteur. A l'aval immédiat du chemin vers *Soleil-Bœuf*, le lit est rempli par un matériau grossier très hétérogène composé de sables grossiers, de cailloux et de blocs. La pente est assez faible de l'ordre de 7°. Puis, jusqu'à la confluence avec le torrent de *Faucon,* des dépôts, composés de matériaux fins et épais de 50 cm environ, encadrent un lit torrentiel étroit (2 m) où les matériaux grossiers sont plus abondants.

Le torrent de *Champerousse* a été corrigé : 33 seuils torrentiels ont été aménagés sur le torrent. Un descriptif de ces ouvrages de correction peut être consulté en annexe (Annexe 6).

3.1.3. Les sites d'études secondaires

3.1.3.1. Le bassin versant du torrent de Sanières

Le bassin versant (Fig. 3.9) du torrent des *Sanières* occupe une surface de 6 km^2 environ et s'étend entre 2874 m et 1215 m d'altitude. Sa forme générale est particulièrement allongée. Sa largeur varie entre 750 m en partie haute et près de 3 kms sur son cône de déjection. Les terrains sont constitués majoritairement par les calcaires et les flyschs de la nappe du *Parpaillon*. Cette lithologie s'étend de 2900 m à 1350 m. Le torrent affouille les '*Terres Noires*' entre 1750 et 1200 m d'altitude. Des formations glaciaires recouvrent par bribes les affleurement des nappe et de marnes en dessous de 2100 m d'altitude environ en rive droite et 1700 m en rive gauche.

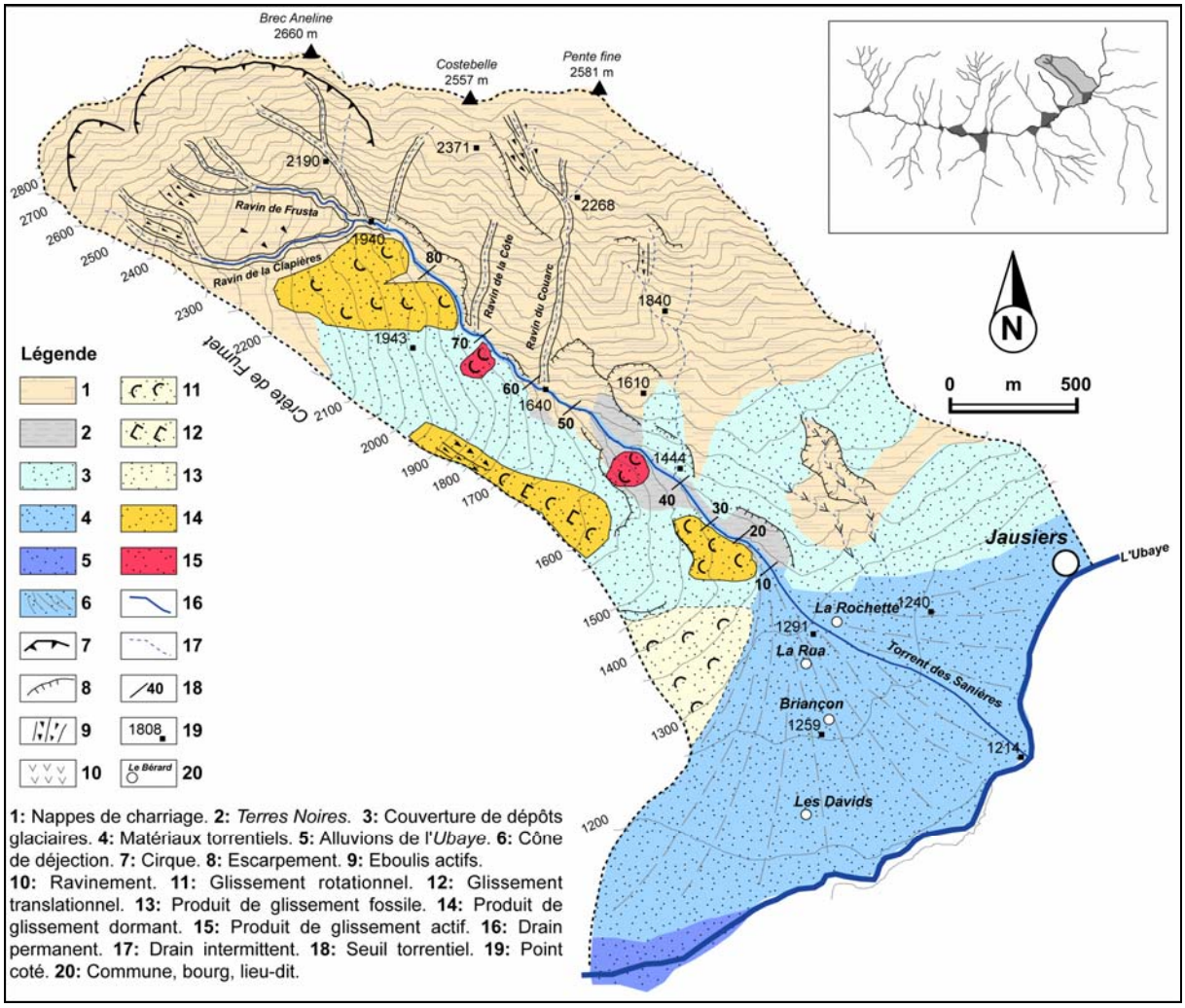


Figure 3.9 *: Carte morphologique du bassin versant du torrent des Sanières.*

Le profil en long du torrent des *Sanières* (Fig. 3.10) distingue classiquement les trois secteurs fonctionnels :

- Le **bassin de réception** d'une surface de 0.8 km^2 s'étend entre 2900 m et 1900 m d'altitude. Les versants et le profil en long sont particulièrement pentus, (pentes variant entre 70° et 30°). Le torrent se forme véritablement à la confluence de plusieurs ravins qui incisent deux cirques glaciaires situés entre la *Tête de Crouès* et *le Brec Aneline* (2660 m). Dans ce secteur, on observe sur le chenal principal une dizaine de petits seuils torrentiels en maçonnerie, qui sont tous détruits ou en très mauvais état ;

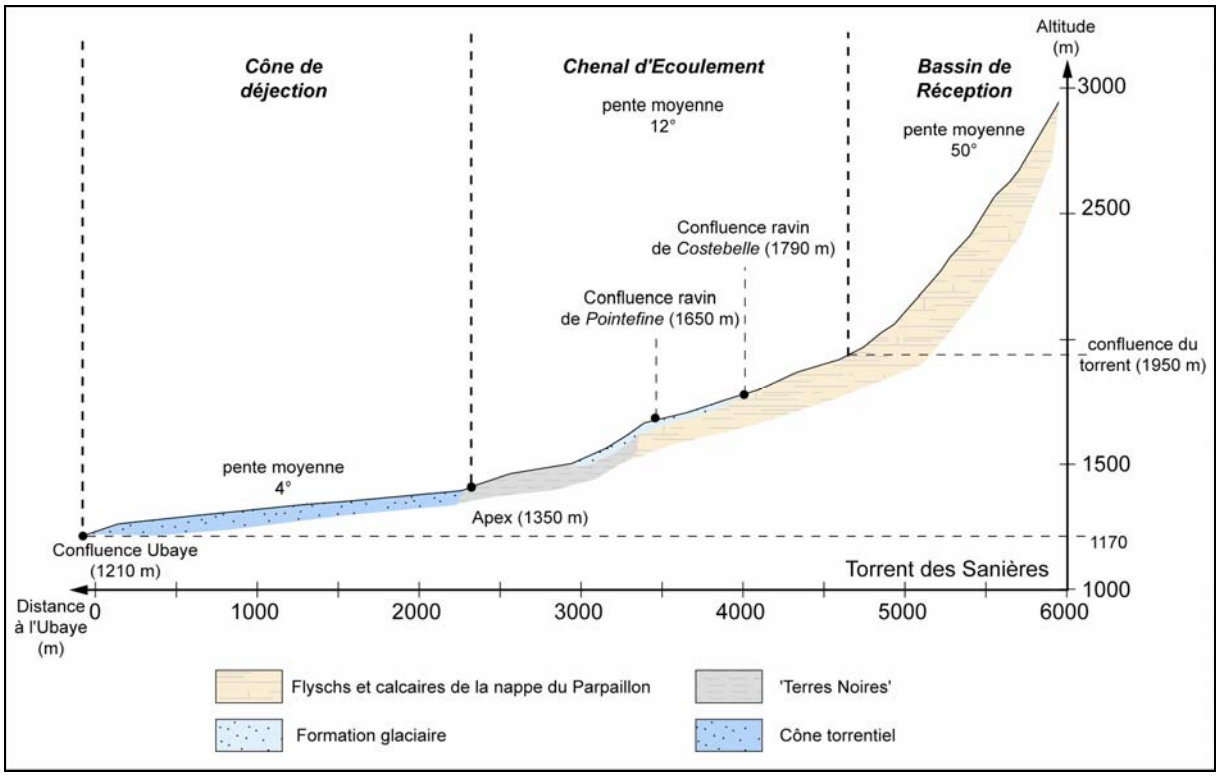


Figure 3.10 *: Profil en long du torrent des Sanières.*

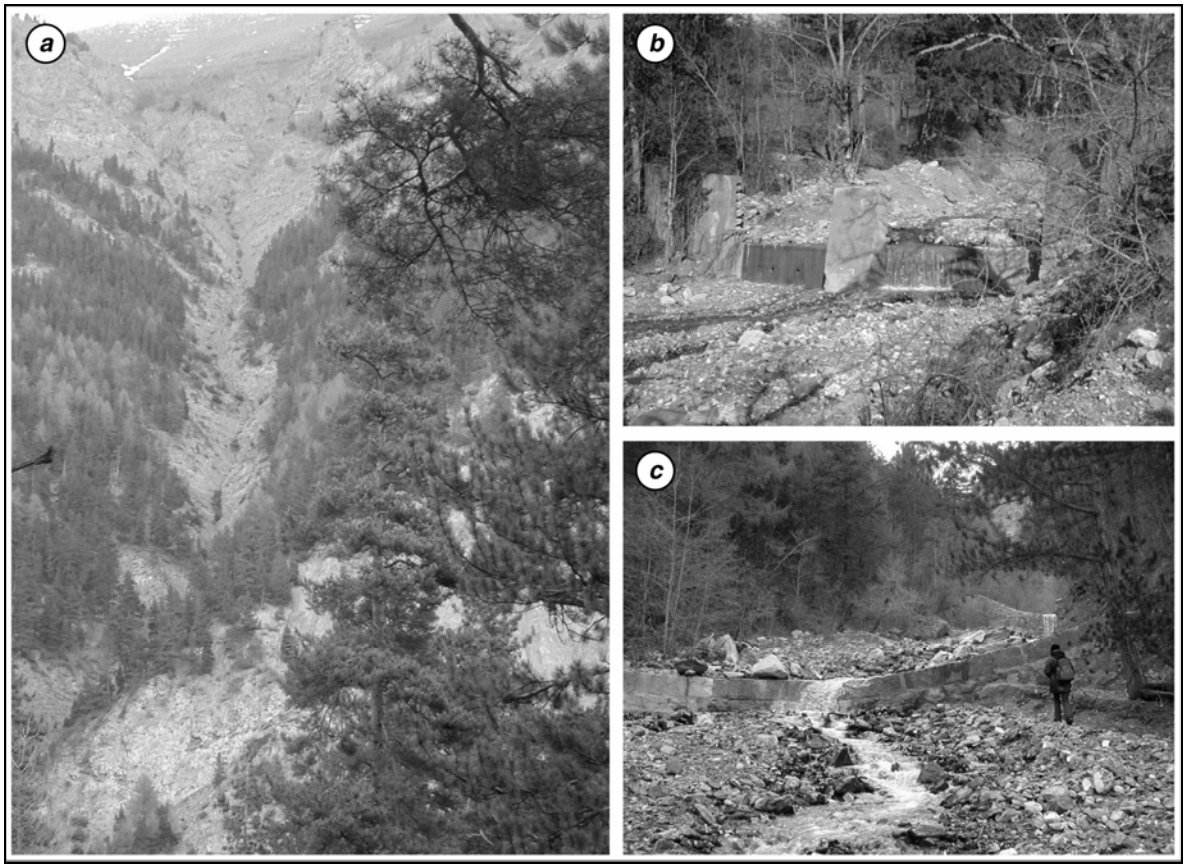


Figure 3.11 *: Morphologie du chenal torrentiel des Sanières.*

a : vue sur le ravin de Costebelle depuis le versant en rive gauche ;
b : vue sur le seuil bétonné N°4 ;
c : vue sur le seuil maçonné N°16.

▪ Le **chenal d'écoulement** s'étend entre 1900 et 1360 m d'altitude, sur une longueur de 2500 m environ. Sur l'ensemble de ce secteur, le profil transversal du torrent des *Sanières* est dissymétrique ; les versants de rive droite (20-40°) sont plus pentus que les versants de rive gauche (15-25°). Plusieurs glissements de terrain rotationnels actifs sont directement connectés au chenal torrentiel (Fig. 3.9). Ils sont localisés indifféremment dans les flyschs, les calcaires et les marnes. La pente du profil en long baisse progressivement vers l'aval, elle varie entre 25 et 8°.

Dans la partie supérieure du chenal d'écoulement, le torrent affouille exclusivement les flyschs et les calcaires. Il reçoit en rive droite deux affluents (Fig. 3.11a) qui prennent leur source en contrebas de la *Crête de Costebelle* (2557 m) et *Pentefine* (2581 m) et incisent les matériaux de nappes. Dans la partie inférieure, en dessous de 1750 m d'altitude, le torrent affouille les marnes noires.

▪ **Le cône de déjection** est l'un des plus imposant de la vallée, il occupe une vaste zone de 3 km^2 environ entre l'apex situé en amont du hameau de *La Rochette* (1350 m d'altitude) et l'*Ubaye* (1215 m) pour une pente moyenne de 4°. L'occupation du sol se répartit entre des pâturages, des cultures et des prés de fauche. Cinq zones d'habitation s'individualisent : la ville de *Jausiers* et les hameaux de *La Rochette*, de *La Rua*, de *Briançon* et des *Davis*. Mis à part le hameau de *La Rochette*, les zones d'habitations sont relativement éloignées du chenal. La route départementale RD900 croise le torrent en partie basse du cône torrentiel.

Différents types d'aménagements ont été réalisés. Les travaux ont débuté au milieu des années 1870, au même moment que les travaux sur le *Riou Bourdoux* et les autres torrents actifs. Ces travaux ont consisté à des reboisements et à l'installation d'ouvrages de correction torrentielle. Dans la partie inférieure, quatre digues ont été réalisées de 1890 à 1998 au droit de berges insuffisamment élevées. Mais l'essentiel des ouvrages de correction torrentielle consiste en une vaste série de seuils torrentiels. A l'heure actuelle près de 85 seuils équipent le chenal torrentiel : 25 seuils bétonnés dont l'état est globalement satisfaisant (Fig. 3.11b) et 60 seuils maçonnés dont l'état est le plus souvent mauvais (Fig. 3.11c). Les seuils maçonnés sont localisés pour la plupart en partie haute de ce secteur.

3.1.3.2. Le torrent du Bourget

Le torrent du *Bourget* est situé entre les torrents du *Faucon* et des *Sanières*. Il se développe sur une surface de 5.5 km^2 à la confluence avec l'*Ubaye* (Fig. 3.12). Il prend sa source en contrebas de la *Tête de Frusta* (2926 m) et s'écoule sur une longueur de 5 km environ dans une vallée profondément encaissée. Sa pente moyenne est de 17°.

La forme générale du bassin versant est très allongée. Très étroit en partie haute (250 m), le bassin versant s'élargit progressivement jusqu'au cône de déjection (1000 m). Le profil en long (Fig. 3.13) distingue classiquement les trois unités morphologiques du torrent avec des pentes entre 25° et 45° dans le bassin de réception, entre 10° et 20° dans le chenal torrentiel et de 5° sur le cône de déjection.

▪ Le **bassin de réception** est particulièrement vaste (3 km^2), il est armé dans les calcaires et les flyschs de la nappe du *Parpaillon* qui affleurent de 2900 à 1900 m d'altitude environ. De nombreux couloirs d'éboulis vifs parcourent le bassin de réception, en contrebas de deux cirques glaciaires. Ils convergent vers le torrent en un point unique vers 2350 m d'altitude. Un vaste glissement de terrain actif est localisé en rive droite, il prend place en contrebas du cirque occidental et s'étend sur près de 750 m pour un dénivelé de 650 m. Il affecte les matériaux de la nappe du *Parpaillon* ;

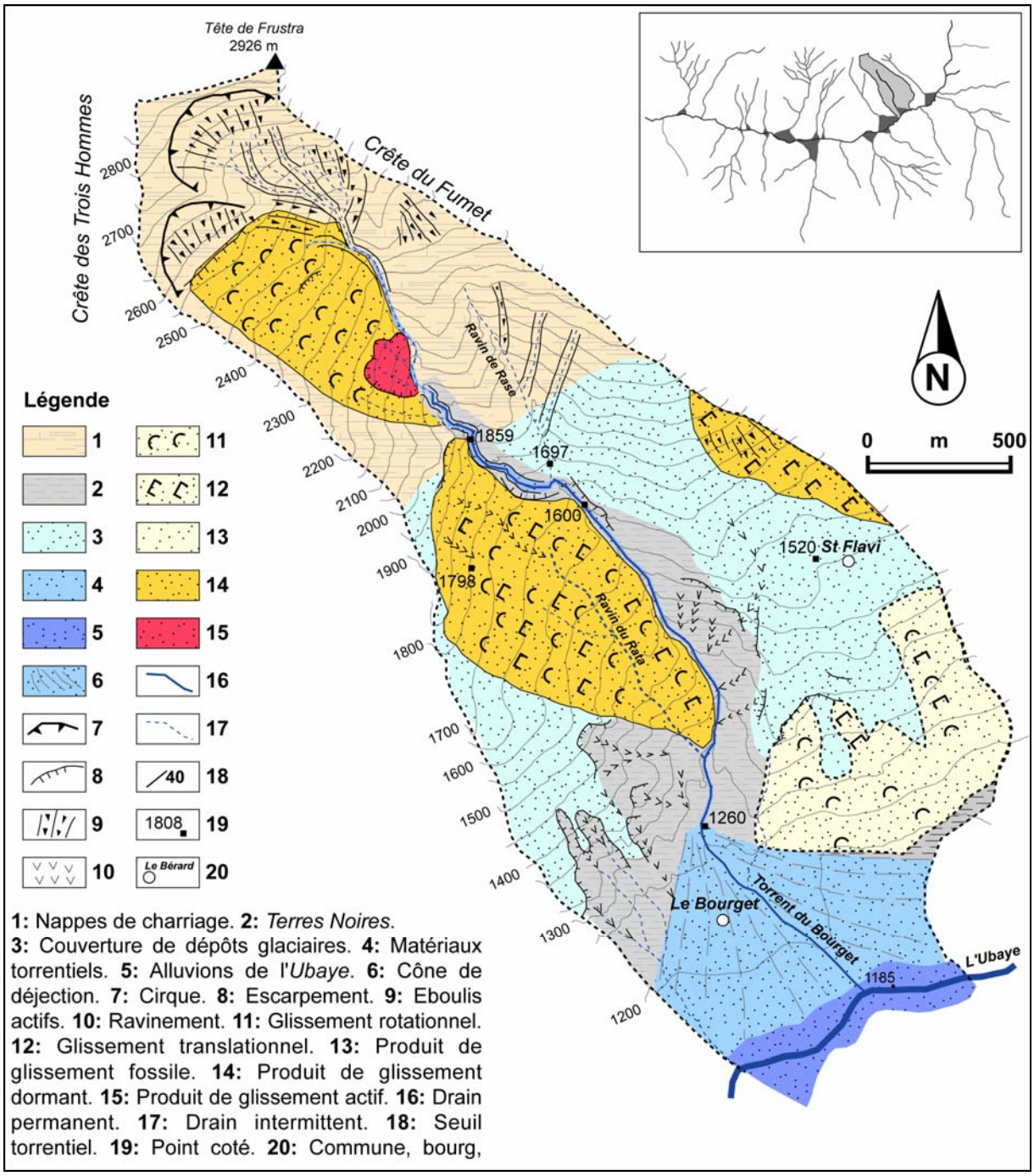


Figure 3.12 *: Carte morphologique du bassin versant du torrent du Bourget.*

▪ Le **chenal d'écoulement** s'incise dans les '*Terres Noires*' et les formations morainiques, particulièrement ravinées. Ces formations morainiques drapent l'essentiel des versants en dessous de 1900 m. Le chenal torrentiel s'encaisse profondément dans les '*Terres Noires*'. Le torrent est particulièrement sinueux et incisé entre 1900 et 1650 m d'altitude, il forme dans cette zone un ravin délimité par des escarpements actifs. Le torrent reçoit en rive gauche un affluent, le *ravin de la Rata* (Fig. 3.15). Ce ravin incise des terrains affectés par un glissement de terrain dormant. Il s'étend sur près d'un kilomètre pour un dénivelé de 700 m environ et affecte les '*Terres Noires*' et les formations morainiques ;

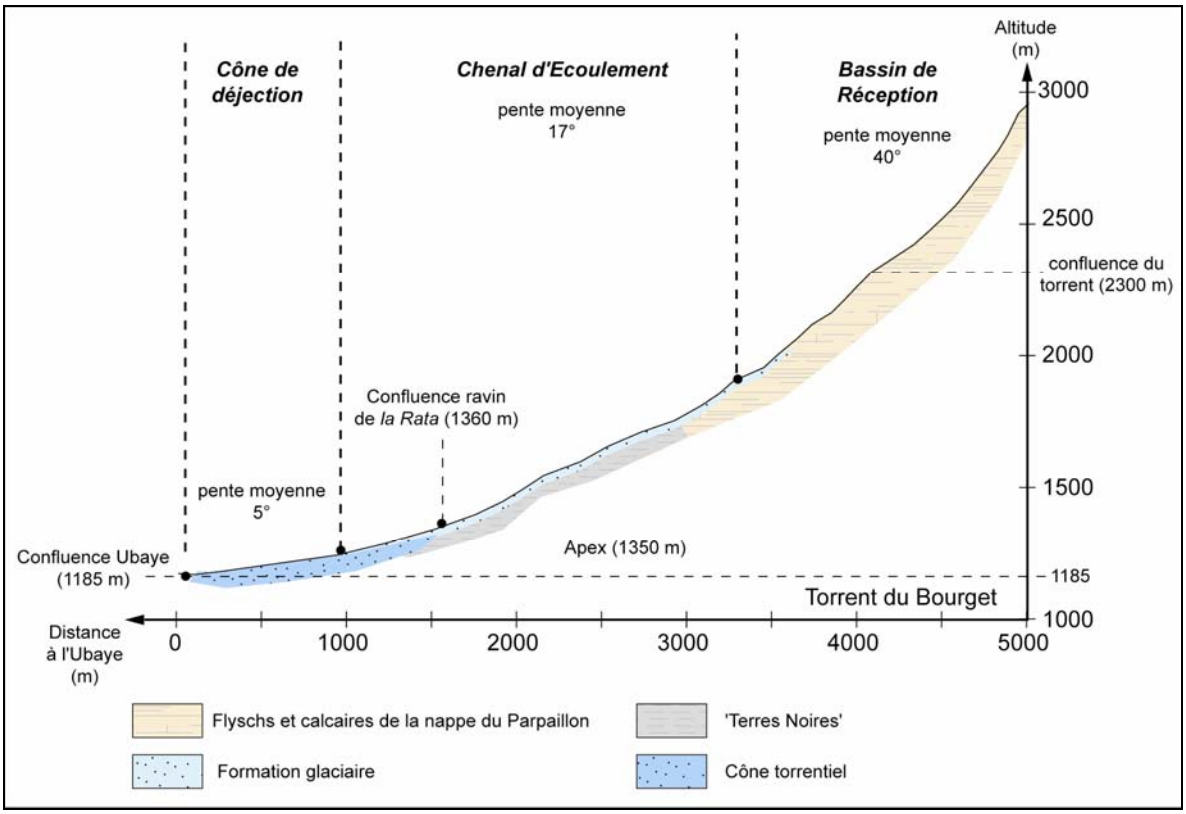


Figure 3.13 *: Profil en long du torrent du Bourget.*

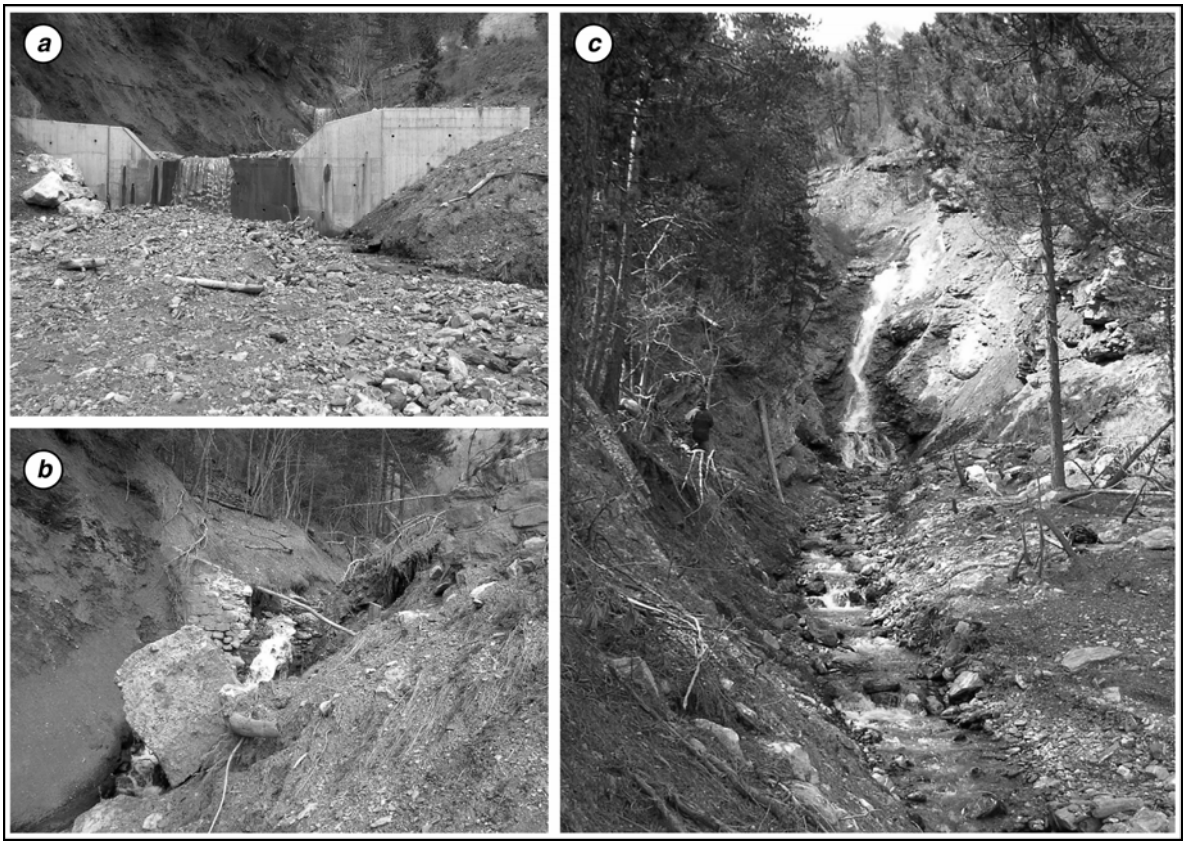


Figure 3.14 *: Prise de vue (a) d'un seuil bétonné (N°26), (b) d'un seuil maçonné (N°29) et (c) d'un seuil naturel sur le torrent du Bourget.*

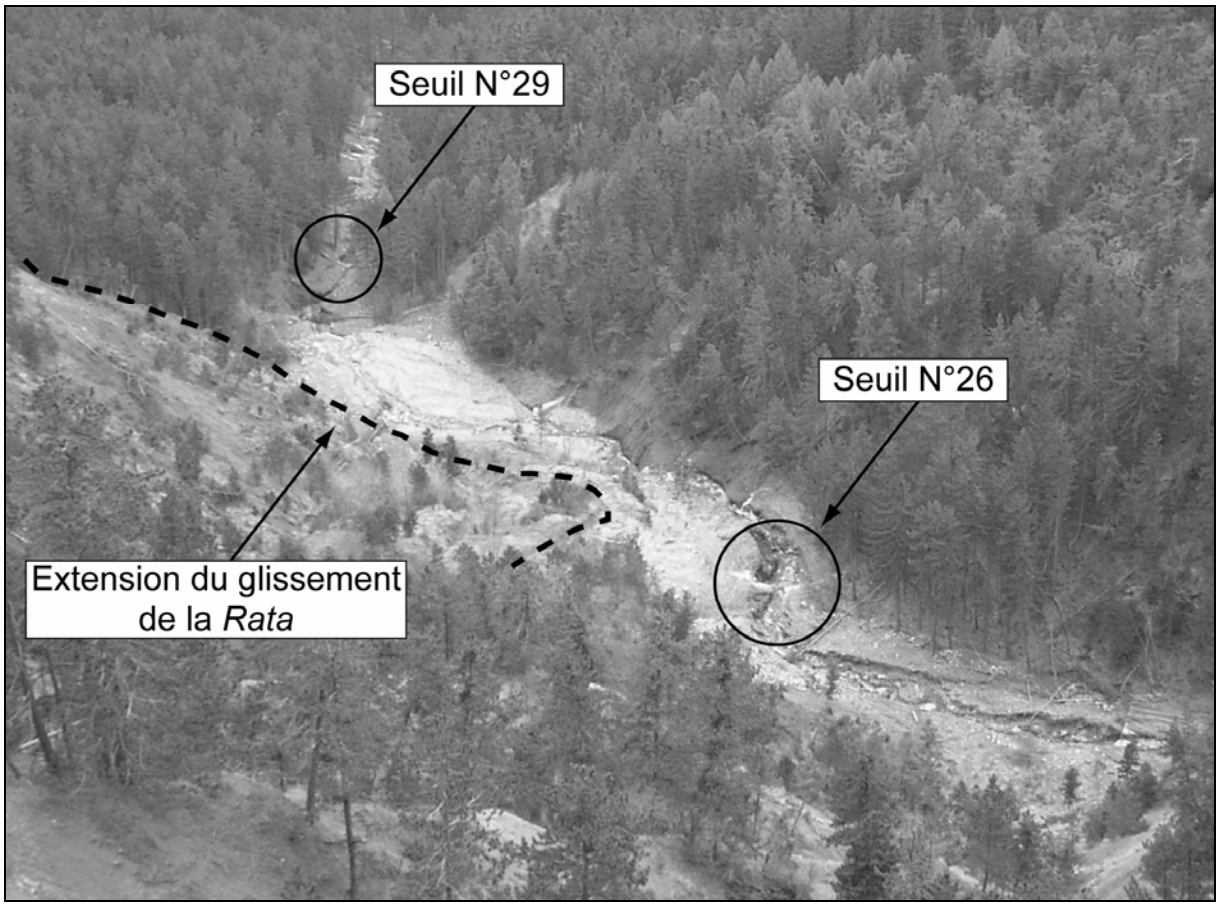


Figure 3.15 *: Vue sur la partie basse du glissement du Rata et sur le chenal torrentiel du Bourget.*

- Le **cône de déjection** a une surface de 0.8 km^2 environ, il s'étend de 1220 m d'altitude à 1185 m. Très peu d'éléments sont exposés au torrent du *Bourget*, le village du *Bourget* étant relativement éloigné. Par contre, le torrent menace la route départementale de la RD900, deux chemins vicinaux, deux fermes isolées et bien sur l'ensemble des seuils torrentiels.

Le torrent du *Bourget* a été corrigé depuis le milieu du 19è siècle : semis de graines de résineux et de feuillus, construction de seuils en maçonnerie (Fig. 3.14b et 3.16) et en pierres sèches dans les petits ravins, clayonnages et travaux de drainage superficiel. La correction torrentielle s'est ensuite poursuivie, mais les ouvrages ont été régulièrement endommagés par les glissements de terrain, ou les crues et laves successives.

Des ouvrages en béton armé (Fig. 3.14a) ont été construits à partir des années 1872-1875 et 1950-1960. Récemment, sur les vingt dernières années, près de 200 000 euros ont été investis pour conforter certains seuils torrentiels ou bien en construire des nouveaux.

Aujourd'hui, on recense 60 seuils torrentiels bétonnés et 70 seuils en maçonnerie ou en pierres sèches. En 1999, les services RTM estimaient qu'un tiers des seuils torrentiels en béton était enseveli ou endommagé. Les seuils en pierre sèche présentaient un état de vieillissement avancé.

Figure 3.16 *: Vue en 1885 sur les barrages torrentiels en partie basse du torrent du Bourget.*

3.1.3.3. Le torrent de l'Abeous

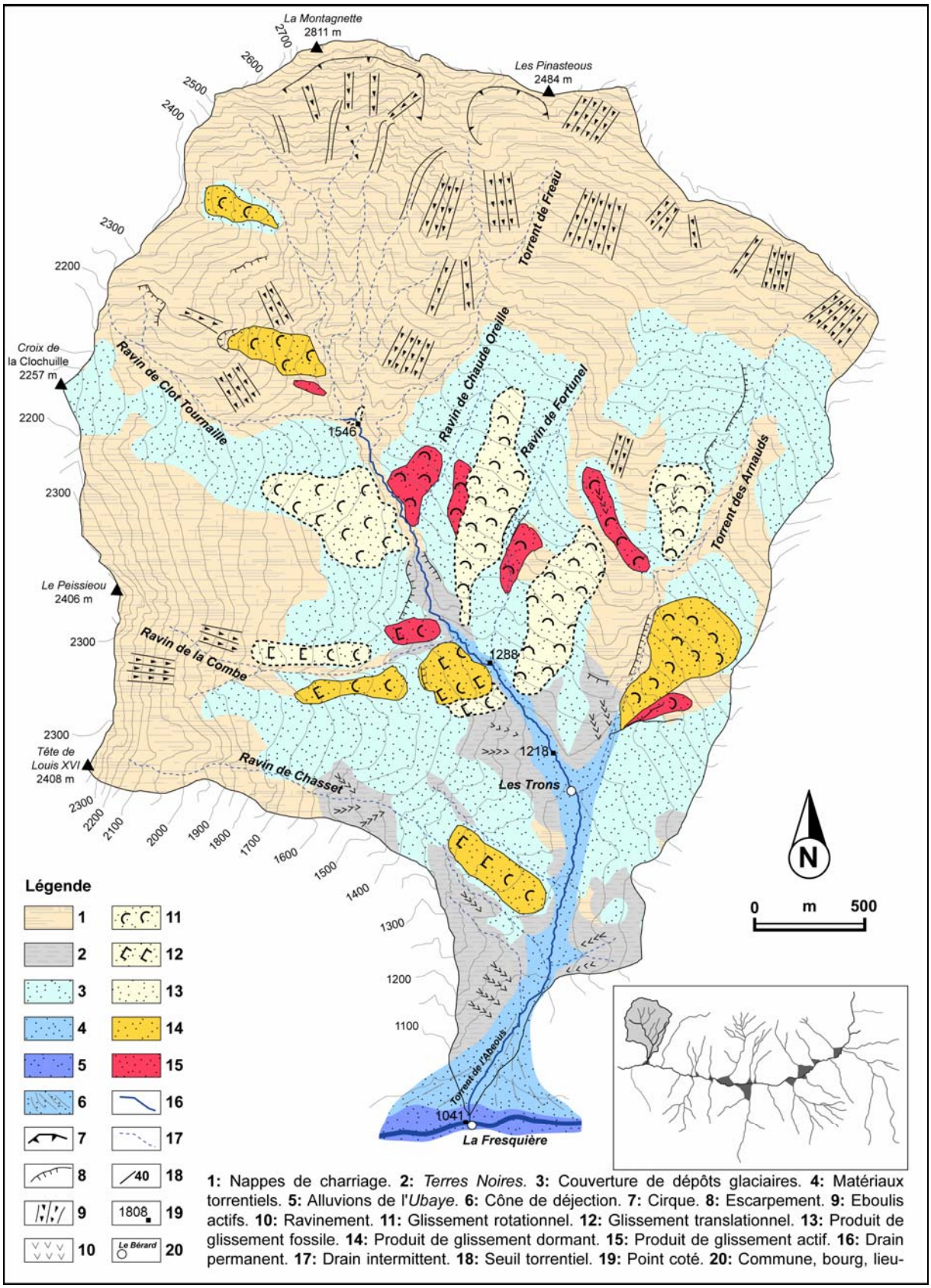


Figure 3.17 *: Carte morphologique du bassin versant du torrent de l'Abeous.*

Le torrent de l'*Abeous* est situé à l'extrême ouest du bassin de *Barcelonnette* (Fig. 3.17). Le bassin versant occupe une surface de 15 km^2 environ. Il s'étend de 2811 m d'altitude à 1015 m. Il s'écoule sur un peu moins de six kilomètres, avec une pente moyenne de 14° et se jette dans l'*Ubaye* au droit de *Meolans-Revel* (1029 m). La forme générale du bassin versant est relativement circulaire, contrairement aux bassins versants des trois autres sites d'étude. La partie supérieure du bassin est armée des calcaires et des flyschs de la nappe du *Parpaillon* (de 2800 à 1600 m d'altitude). En dessous de 1600 m, la torrent affouille les '*Terrres Noires*' et les formations morainiques. Les '*Terres Noires*' sont très fortement ravinées.

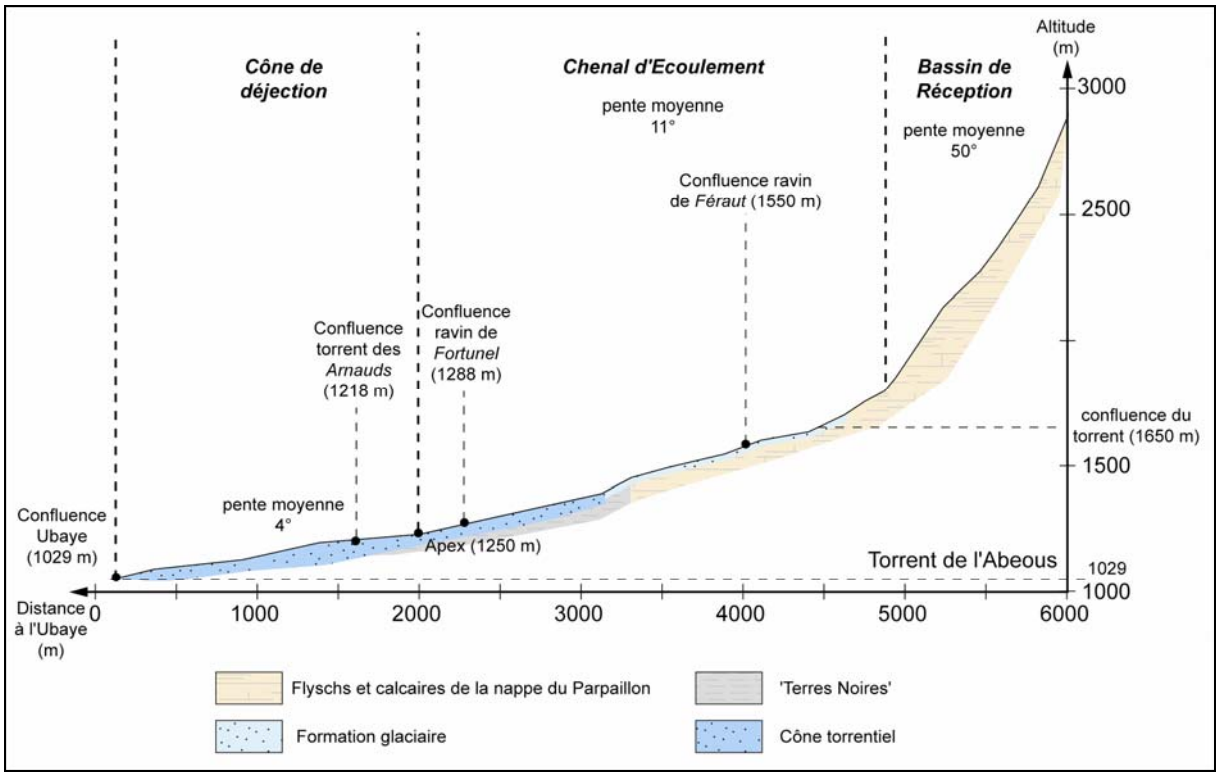


Figure 3.18 *: Profil en long du torrent de l'Abeous.*

La rupture de pente (1650 m) visible sur le profil en long du torrent (Fig. 3.18) est caractéristique de la limite entre l'allochtone et l'autochtone.

▪ Le **bassin de réception** du torrent est vaste (9 km^2 environ), il prend la forme d'une véritable couronne. Le torrent prend sa source au sein d'un vaste cirque glaciaire, en contrebas de *La Montagnette* (2811 m), la confluence de plusieurs ravins donnent naissance au torrent proprement dit (1650 m). La pente du profil en long dans ce secteur varie entre 55 et 25°, le chenal torrentiel est étroit et s'incise directement dans le substratum. Dans ce secteur, les versants sont drapés par de très nombreux tabliers et couloirs d'éboulis actifs directement connectés au chenal. En rive droite, deux glissements de terrain actifs affectent les nappes de charriage ;

▪ Le **chenal d'écoulement** s'étend sur 1,5 km environ. En partie haute, le lit est pentu (>20°) et le chenal étroit. En partie basse, le lit s'élargit progressivement ; la pente du profil s'abaisse régulièrement (de 15 à 7°) jusqu'à l'apex (1250 m). Plusieurs ravins viennent se jeter dans l'*Abeous* dans ce secteur, comme par exemple les ravins de *Féraut* ou de *Fortunel*. De nombreux mouvements de terrain affectent les versants dans ce secteur à la limite entre l'allochtone et l'autochtone. Ces glissements sont pour la plupart dormants, sauf un glissement translationnel actif développé dans les moraines et les marnes noires.

▪ Le **cône de déjection** s'étend sur 0.60 km^2 environ sur une pente moyenne de 4°. Le chenal est encaissé de 2.50 m à 5.00 m dans le cône. Le torrent des *Arnauds* rejoint l'*Abeous* à proximité de l'apex. Les principaux éléments présents sur le cône sont une partie de la commune de *Meolans-Revel* et le pont qui enjambe la route départementale RD.900. De plus, un camping et deux sites de rafting sont situés sur le cône, à proximité du chenal torrentiel.

Près d'une cinquantaine de seuils équipent le chenal torrentiel. Les 40 seuils situés entre 1600 et 1350 m d'altitude sont tous des seuils maçonnés, ils sont pour la plupart remplis ou en mauvais état. Sur le cône de déjection, 10 seuils bétonnés, en bon état, se succèdent.

3.2. Evénements torrentiels dans le bassin de Barcelonnette entre 1996 et 2004

3.2.1. L'événement du 19 août 1996 sur le torrent de Faucon

Le **19 août 1996** un épisode torrentiel s'est déclenché dans le torrent de *Faucon*. Selon les riverains, il se serait déclaré aux environs de 16H15. En progressant, il a alors déposé un volume important de matériaux dans le chenal torrentiel et sur le cône de déjection. Vers 16H30, sur une hauteur de 4 à 5 m, l'écoulement a atteint le lotissement du *Bérard* (Fig. 3.19). En quelques endroits, les matériaux ont débordé par dessus les digues aménagées le long du chenal torrentiel. L'écoulement est venu frôler l'intrados du tablier des ponts du *Châtelaret* (1) et du V.C.3. (2). Sur ce dernier, quelques projections boueuses ont recouvert le garde fou et la chaussée.

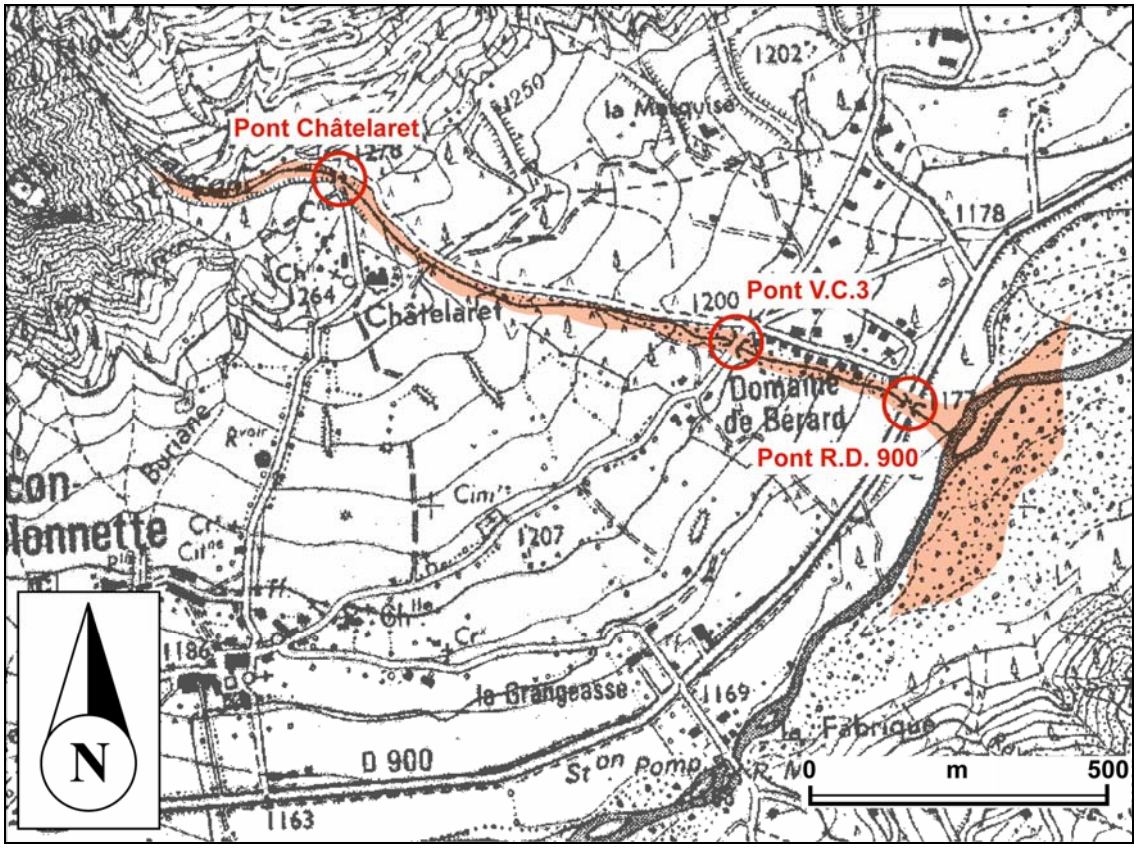


Figure 3.19 *: Localisation des débordements et des ponts sur le cône de déjection du torrent de Faucon.*

Figure 3.20 *: Photographie prise vert l'amont depuis le pont de la R.D.900 le 20 août 1996 (photographie de N. Masselot, publiée dans Sivan, 2000).*

Vers l'aval, les matériaux ont débordé de près de 50 cm au-dessus du pont de la R.D.900 (3 ; Fig. 3.20) ; les conséquences directes ont été la fermeture provisoire de la route départementale 900 reliant *Barcelonnette* à *Jausiers*. A la confluence avec *l'Ubaye*, les matériaux se sont étalés dans le lit majeur en un large cône d'épandage dont les dimensions ont atteint une centaine de mètres de longueur, une largeur maximale de 250 m, et une épaisseur variant de 2 à 4 m.

Au lotissement du *Bérard*, seul le jardin de la maison la plus proche, située seulement à une dizaine de mètres du chenal, a été touché par quelques débordements. Les barrages et les seuils ont été vraisemblablement endommagés par l'écoulement torrentiel ; toutefois, il n'est pas possible de connaître avec précision l'impact de cet événement sur ces ouvrages dans la mesure où nous ne dispositions pas d'informations précises sur leur état avant 1996.

3.2.2. Les événements du 4 juin 2002 sur les torrents de Faucon et des Sanières

Dans la nuit du 4 au 5 juin 2002, entre 2 et 5 heures du matin, les torrents de *Faucon* et des *Sanières* ont connu un gonflement de leur débit sans témoins oculaires directs pouvant apporter des précisions. Les observations des agents du service RTM faites quelques heures après les événements, et nos propres observations faites 4 jours après apportent toutefois quelques informations quant à ces deux événements.

Dans le torrent de *Faucon*, l'événement torrentiel a déposé de nombreux matériaux qui ont comblé une bonne partie du chenal torrentiel. L'ensemble du chenal torrentiel situé sur le cône a été comblé à des hauteurs différentes (entre 0.25 et 2 m). Le secteur longeant le lotissement du *Bérard* est comblé jusqu'au gabarit. Les dépôts ne sont pas cimentés et sont constitués de matériaux graveleux et de blocailles. Aucun débordement n'a été observé. Les dépôts se sont accumulés en un petit éventail à la confluence avec l'*Ubaye*, mais de taille très modeste (30 m de large environ). L'événement torrentiel a seulement léché le pont de la R.D. 900, des traces de projections boueuses sont observées sur le tablier du pont.

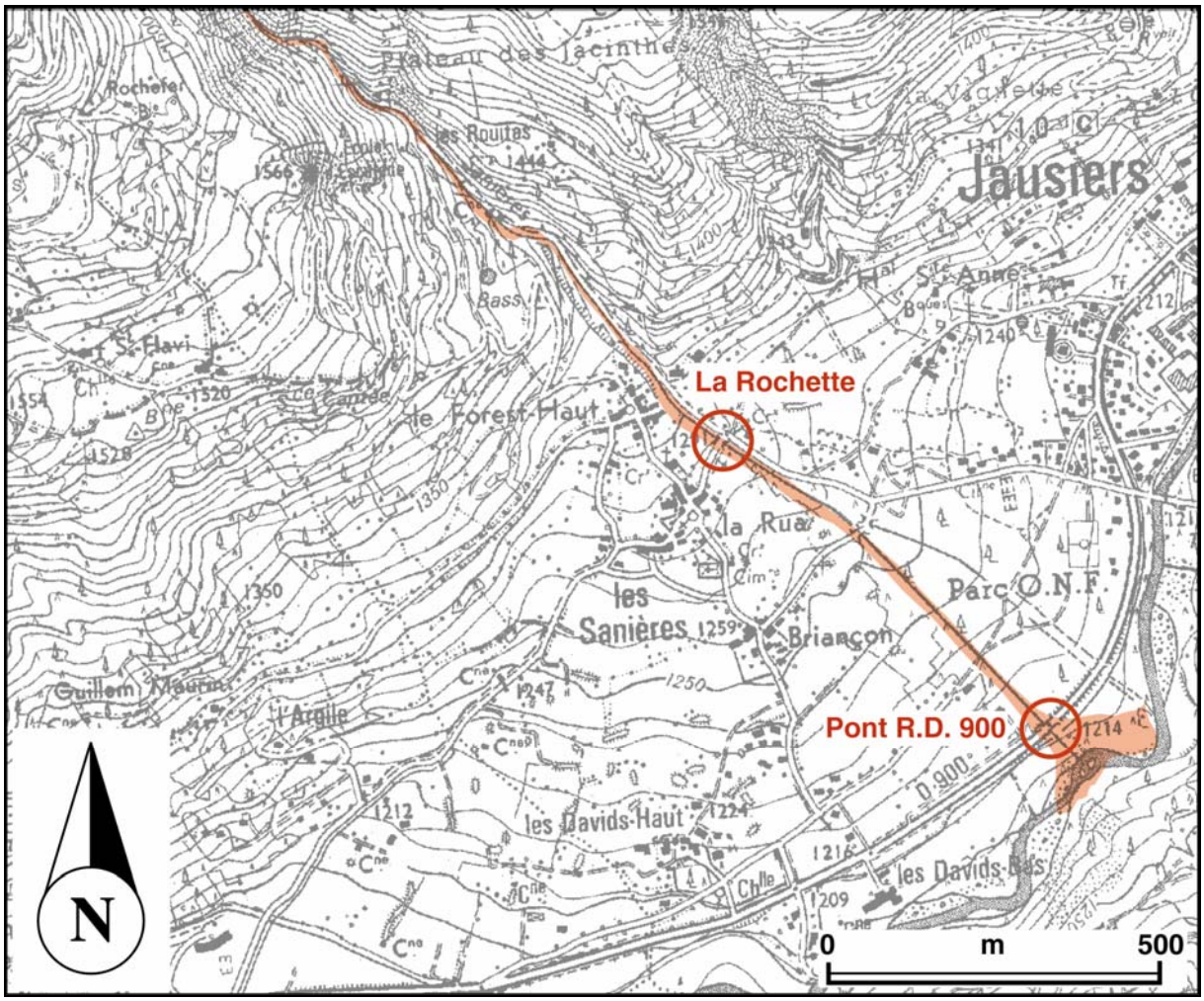


Figure 3.21 *: Localisation des débordements sur le cône de déjection du torrent de Sanières.*

Sur le torrent des *Sanières*, la majorité des dépôts est observée dans la partie inférieure du chenal torrentiel. Le seul débordement est observé dans la partie supérieure du cône de déjection, à l'amont immédiat du hameau de *La Rochette* (Fig. 3.21). Il prend la forme d'un lobe d'une cinquantaine de mètres de long qui longe la rive gauche du chenal principal du torrent des *Sanières*. La largeur du lobe varie entre 2 et 4 m. Comme le chenal torrentiel du *Faucon*, les dépôts sont venus combler une bonne partie du chenal torrentiel sur le cône de déjection. Des projections tapissent le pont de la R.D. 900. Les projections visibles sous le pont indiquent que la hauteur de l'écoulement était de l'ordre de 2 m.

3.2.3. Les événements de l'été 2003 sur les torrents de l'Abeous, du Bourget et de Faucon

Au cours de l'été 2003 plusieurs événements de type 'lave torrentielle' se sont déclenchés dans le Bassin de *Barcelonnette* et dans la vallée de la *Haute-Ubaye*. L'événement survenu en *Haute-Ubaye* s'est déclenché dans un ravin où jusqu'ici aucun événement n'avait été recensé. Trois torrents ont connus des épisodes de laves torrentielles : le torrent de l'*Abeous* le 27 juillet, les torrents du *Bourget* et du *Faucon* le 5 août.

3.2.3.1. L'événement du 27 juillet 2003 : torrent de l'Abeous

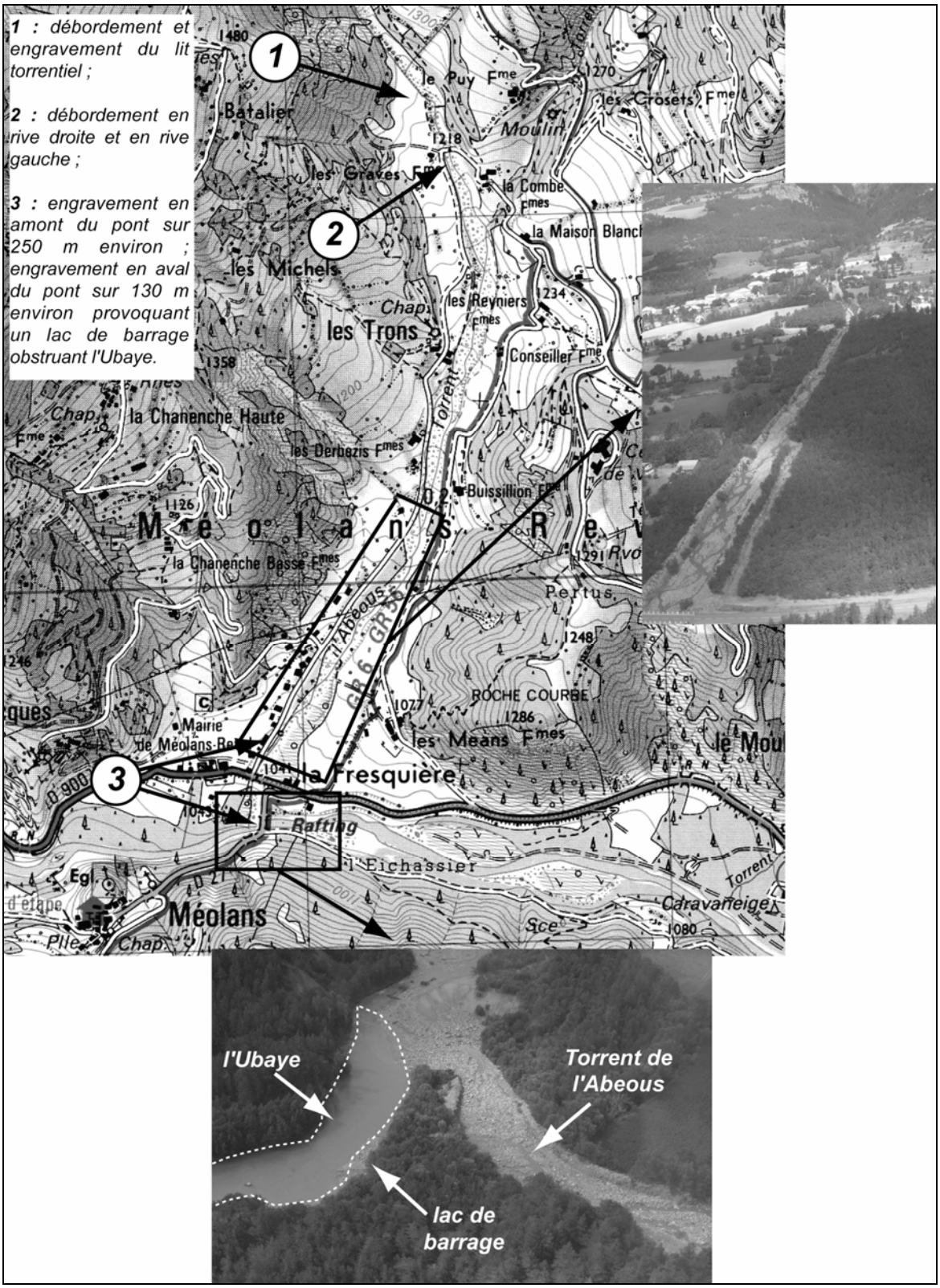


Figure 3.22 *: La lave torrentielle du 27 juillet 2005 sur le torrent de l'Abeous (Photographies prises par M. Peyron (Services RTM, Barcelonnette)).*

Le 27 juillet 2003, un événement torrentiel s'est déclenché dans le torrent de l'*Abeous*, à la suite d'un violent orage de grêle localisé dans le haut du bassin de réception du torrent. Vers

17H00, une lave torrentielle a été observée dans la partie inférieure du torrent. Des témoins indiquent que la lave torrentielle a rempli le chenal très rapidement jusqu'au gabarit. Plusieurs vagues se sont succédées. La lave a débordé en plusieurs endroits (Fig. 3.22), la description est donnée de l'amont vers l'aval :

- a l'amont de '*la Maison Blanche*', au niveau du Puy (1), la lave a débordé une digue en béton en rive droite du torrent, elle est venue engraver des prés sur une épaisseur de 5 à 10 cm ;

- quelques mètres à l'aval du premier débordement (2), la lave a endommagé un radier. Elle a débordé en rive droite et en rive gauche sur près de 30 m. L'épaisseur des dépôts de débordement est de 20 à 40 cm ;

- en amont de la R.D. 900 (3), le chenal torrentiel a été engravé par la lave sur près de 250 m. La hauteur de l'engravement varie entre 1.50 et 2.50 m. Des traces de boue sur le tablier du pont permettent d'estimer la hauteur maximale de l'écoulement à près de 5.00 m. En aval de la R.D. 900, la hauteur d'engravement augmente sensiblement. Sur les 150 derniers mètres du torrent de l'*Abeous*, la hauteur d'engravement est de l'ordre de 4.00 m. Les dépôts ont provoqué une obstruction de l'*Ubaye* ; un lac de barrage s'est formé sur l'*Ubaye* sur près de 150 m en amont (Fig. 3.22).

L'épisode torrentiel a mis à mal certains ouvrages : le radier de la combe a été affouillé sur près de 2.00 m et la partie centrale du tablier a été emportée par la lave. Le contre barrage du seuil 2 a été détruit, seules les ailes sont restées en place. A l'amont de ces seuils, de nombreux blocs, de tailles impressionnantes (entre 20 et 80 m^3), ont été déposés par la lave. L'enfoncement du lit en partie médiane est très forte. Dans le ravin de *Fortunel* (Fig. 3.18), l'incision du lit atteint 4.00 m. Aucune information n'est disponible sur le mécanisme de déclenchement de la lave torrentielle.

3.2.3.2. Les événements du 5 août 2003

Le mardi **5 août 2003** deux importantes laves torrentielles se sont déclenchées quasiment simultanément dans les torrents du ***Bourget*** et du ***Faucon***. Suite à un **violent orage**, les deux torrents ont débordé de leur lit avec pour conséquence l'interruption de la circulation sur la R.D. 900 pendant plusieurs heures. Sur le cône de déjection du *Faucon*, au lotissement du *Bérard* situé à quelques mètres du torrent, **neuf propriétés ont été envahies par la boue** sur une épaisseur moyenne de 1 m.

Les dépôts et les principaux désordres et dégâts occasionnés sont décrits sur la base de témoignages et d'observations (des habitants du lotissement du *Bérard*, des éleveurs de bétail et des services RTM (Mr Guité et Mr Peyron)).

a) Le torrent de Faucon

Le 5 août 2003, vers 18h00, le débit du torrent de *Faucon* a gonflé brutalement. Les témoignages des habitants du domaine du *Bérard* permettent de décrire correctement l'événement pour le torrent du *Faucon* (Annexe 2).

Les eaux chargées ont rapidement fait place à un « écoulement boueux » charriant des éléments plus grossiers. En cinq minutes, **une dizaine de bouffées de laves** s'est succédée. Si les premières vagues n'ont pas débordé, la dernière vague plus haute que les autres a largement débordé au droit du pont V.C.3. (Fig. 3.23a) où les berges ont une hauteur proche de 2 m. La hauteur de cette vague a été estimée « à 6,50 m » par un témoin qui ne voyait plus alors la cime des arbres bordant le chenal torrentiel. Notons toutefois que

cette hauteur est peut-être largement surestimée en raison de l'effet d'optique lié à la configuration topographique du site.

Un témoin indique que les débordements se sont produits à la suite d'un **encombrement progressif du pont V.C.3**. A cet endroit, les culées du pont font office de goulot d'étranglement en rétrécissant la largeur du lit de 5,5 m à 3,5 m, réduisant ainsi la section mouillée de moitié (Fig. 3.23b et c). Les matériaux se sont accumulés à l'amont du pont. La dernière bouffée a alors largement débordé en emportant le tablier du pont. Le « mélange boueux » a ensuite envahi les jardins des maisons situées à quelques mètres du torrent. **La vitesse de la lave a été estimée** par les témoins à **10 m.s^{-1}** (objets flottants). Mme *Peycher*, témoin, indique, que de mémoire, la lave torrentielle coulait plus lentement en 1996. Elle précise également que contrairement à 1996, aucun bruit annonciateur n'a été perçu (Annexe 2).

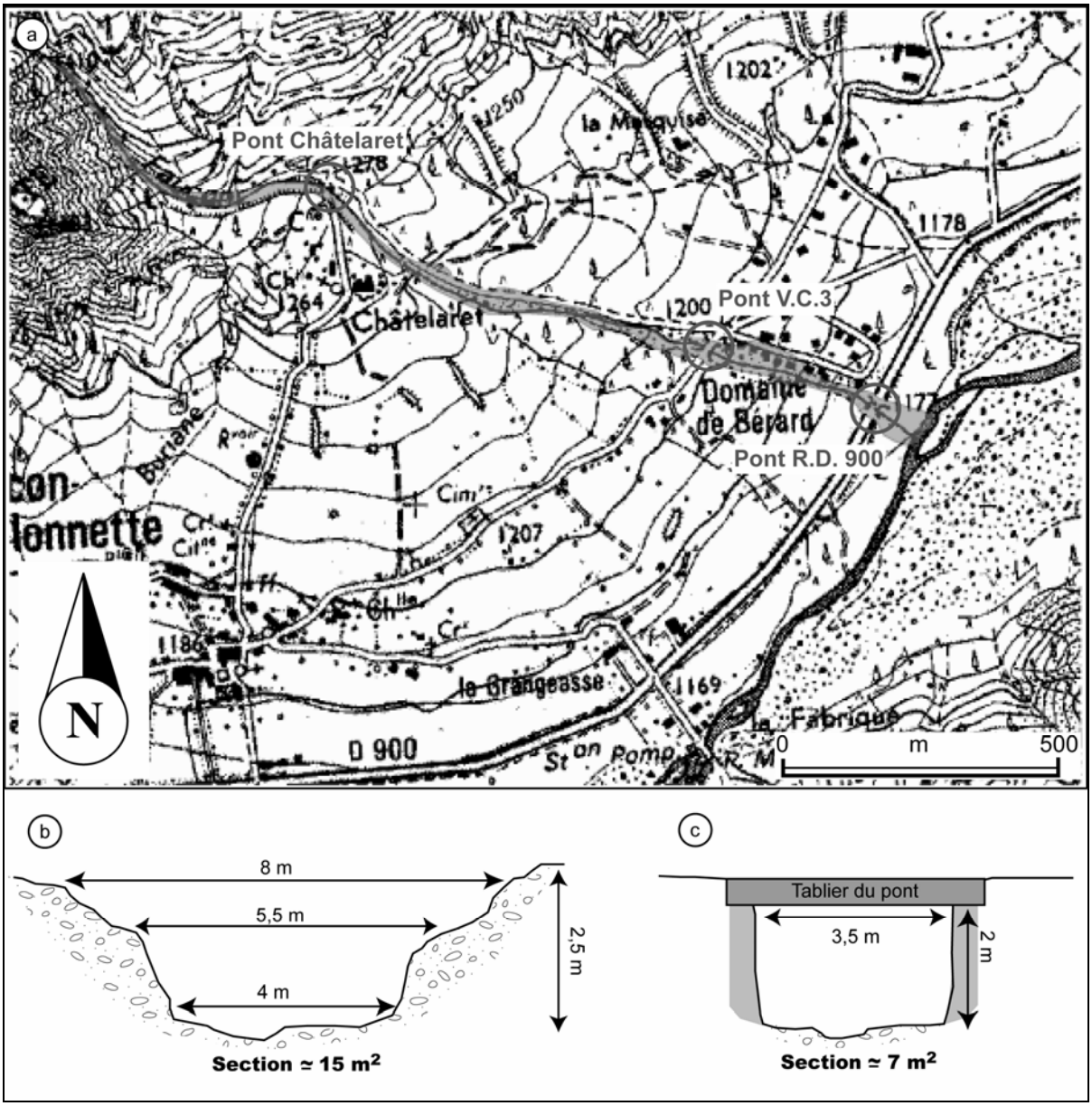


Figure 3.23 *: Localisation des trois ponts sur le cône de déjection et coupes transversale du pont V.C.3.*

a : localisation des trois ponts enjambant le torrent de Faucon sur le cône de déjection ;
b : coupe schématique du torrent de Faucon 10 m à l'amont du pont V.C.3 ;
c : coupe schématique du torrent de Faucon au droit du pont V.C.3.

Depuis les deux derniers curages pratiqués dans le torrent du *Faucon* au cours de l'été 2002 (après la crue du 4 juin 2002), la rive droite est plus haute que la rive gauche, ainsi les premiers débordements se déversent en rive gauche. En rive droite, des dépôts de laves torrentielles ont recouvert les rives et les terrains adjacents sur près de 10 000 m^2 et sur une épaisseur comprise entre 0.25 et 1.00 m, soit un volume estimé entre 2 500 et 10 000 m^3. En rive gauche, au droit du domaine de *Bérard*, les débordements ont recouvert une surface de l'ordre de 8 000 m^2, sur une épaisseur comprise entre **0,50** et **1,50 m**, soit un volume estimé compris entre **4 000 et 12 000 m^3**. Les services RTM ont estimé le volume total de l'événement à 56 000 m^3. Mais le volume total doit être compris entre **45 000 et 75 000 m^3** (Koulinski, 2004). Les dépôts boueux observés possèdent tous une couleur grise foncée.

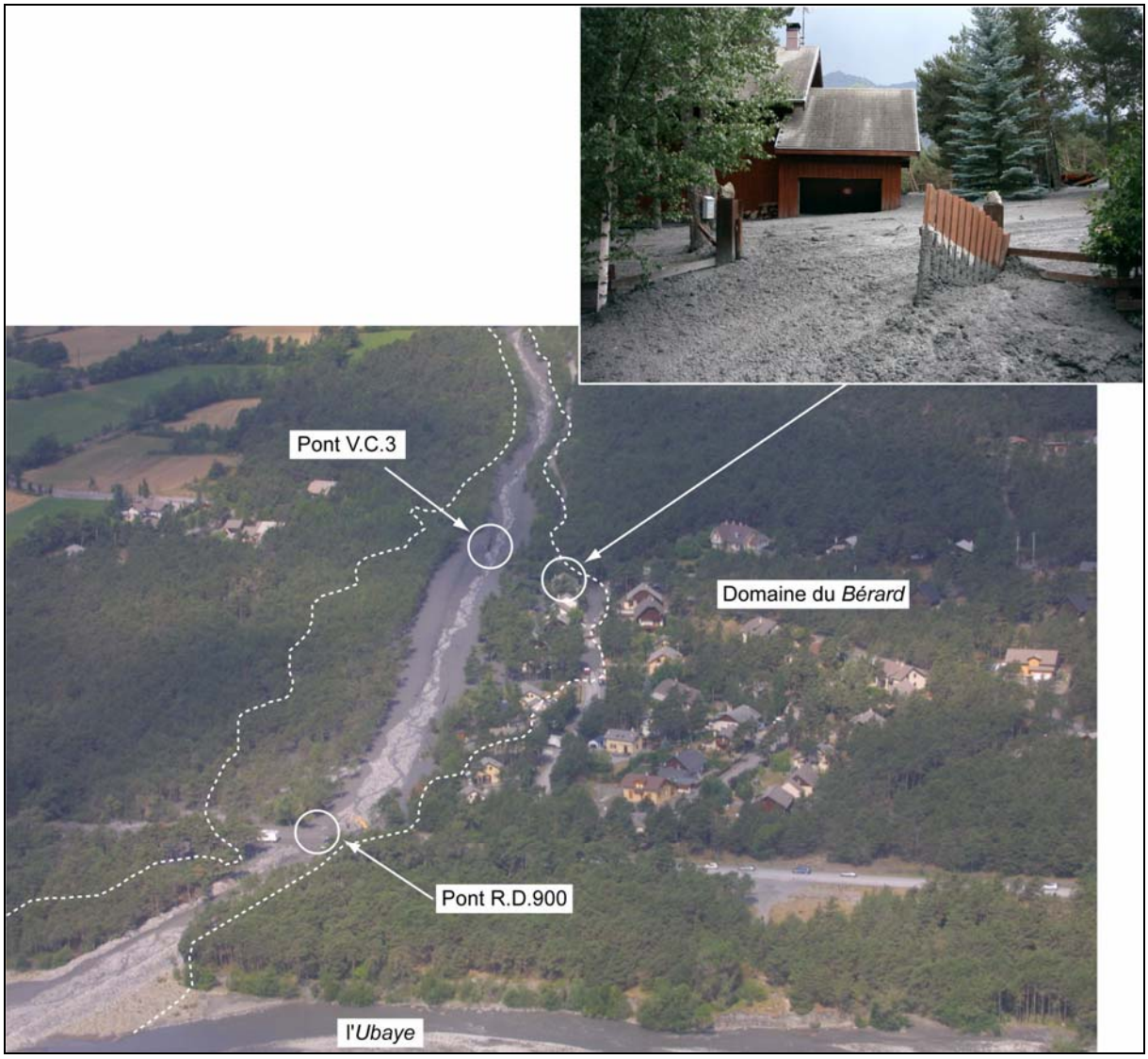


Figure 3.24 *: Dégâts et débordements sur le cône de déjection du torrent de Faucon (Photographies prises le 6 août 2003 par M. Peyron (Services RTM, Barcelonnette)).*

Si la lave torrentielle n'a duré que quelques minutes (entre 5 et 10 min), elle a occasionné de nombreux dégâts par ses débordements. Le pont de la R.D. 900 a été submergé sur plus d'un mètre coupant la route pendant plusieurs heures. De plus des câbles de télécommunication situés au droit du pont de la R.D. 900 ont été endommagés. Six maisons du domaine du *Bérard* et plusieurs voies de communication ont été touchées par les débordements (Fig. 3.24).

La propriété située à l'aval immédiat du pont V.C.3 a été la plus gravement touchée par ces débordements. Le pont V.C.3 a lui été emporté par la lave, sa rupture par la dernière bouffée a entraîné les débordements sur le domaine du *Bérard*. Les coûts occasionnés par les débordements du torrent de *Faucon* ont été de l'ordre de 415 000 € ; les déblaiements du lit torrentiel et du lotissement du *Bérard* (100 000 €) et la reconstruction du pont V.C.3. (125 000 €) ont constitué une bonne partie des dépenses.

b) Le torrent du Bourget

Sur le torrent du *Bourget*, les dégâts occasionnés ont été moins importants (Fig. 3.25) malgré des **débordements** sur les deux rives du torrent ; la rive gauche étant la première a être touchée par la lave. Aucune propriété n'a été envahie par la boue. Le pont V.C.3. du *Bourget* a été submergé, mais il a tenu bon (Fig. 3.26). Les débordements ont eu lieu majoritairement en rive gauche, mais ils sont restés relativement limités (entre 1500 et 3000 m^3). Plus en amont, une citerne DFCI. a été partiellement enfouie par les dépôts en rive droite. Plusieurs chemins vicinaux traversant le torrent ont été coupés. La R.D. 900 a été coupée par les débordements du torrent. En aval du pont de la R.D.900 les dépôts se sont étalés sous la forme d'un éventail en rive droite de l'*Ubaye* (Fig. 3.25 et 3.26).

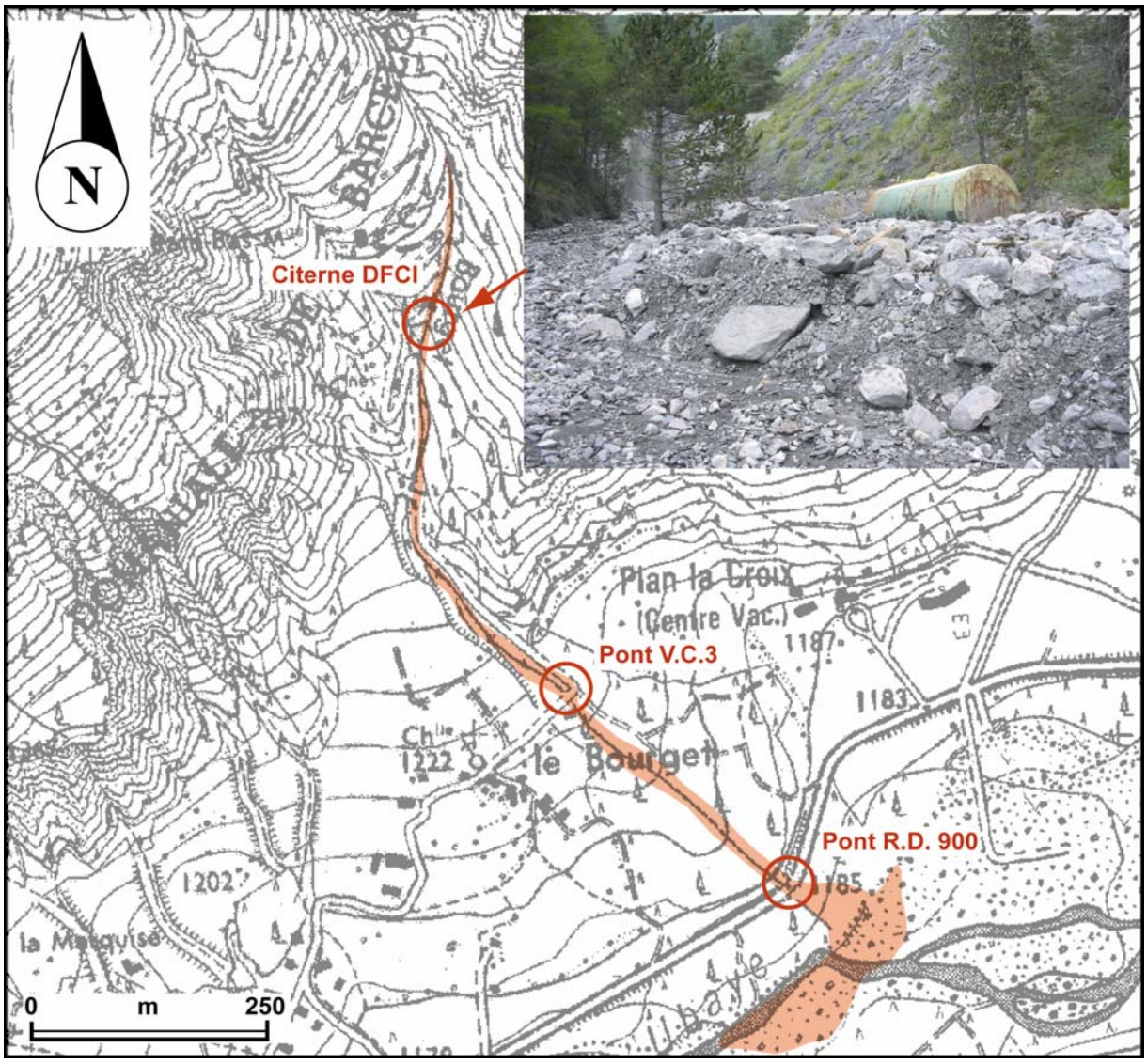


Figure 3.25 *: Localisation des débordements (en grisé) sur le cône de déjection du torrent du Bourget et photographie du débordement au niveau de la citerne DFCI.*

Figure 3.26 *: Dégâts et débordements sur le cône de déjection du torrent du Bourget (Photographies prises le 6 août 2003 par M. Peyron (Services RTM, Barcelonnette)).*

3.3. Conclusion du chapitre 3

Les torrents du bassin de *Barcelonnette* ont connu une activité torrentielle soutenue durant la période 1996-2004. Cette activité torrentielle a concerné principalement les torrents de l'*Abeous*, du *Bourget*, de *Faucon* et des *Sanières*. Certains de ces événements ont causé d'importants dégâts, comme en 1996 et en 2003 sur le torrent de *Faucon*.

Ces observations vont permettre d'essayer de répondre précisément aux différents questionnements évoqués précédemment. Hiérarchisés de l'amont vers l'aval d'un bassin versant torrentiel, et du déclenchement au dépôt, ces questions sont :

- (1) Quels sont les **mécanismes de déclenchement** des laves torrentielles dans ces torrents ? Pour les sites de *Faucon* et de *Champerousse*, quels sont **les zones les plus susceptibles** à déclencher des laves ? et selon quels mécanismes ?

- (2) Quels **volumes de matériaux** peuvent être libérés par **les zones contributives** après le déclenchement (versant et lit torrentiel) ? Quels sont les facteurs qui vont favoriser cette contribution ?

- (3) Quelles sont les caractéristiques **sédimentologiques et rhéologiques** des laves torrentielles due bassin de *Barcelonnette* ? Ces caractéristiques évoluent-elles significativement durant un événement ? Peut-on définir **une loi de comportement** pour ces écoulements ?

- (4) Quel est le **volume minimal de matériaux** à libérer pour qu'une lave torrentielle atteigne le cône de déjection ?

- (5) Peut-on représenter **la propagation et l'étalement** des laves torrentielles par des **outils numériques**, selon diverses hypothèses de volumes libérés, de rhéologie du matériau ? Comment peut-on intégrer les processus de contribution dans ces outils numériques ?

- (6) Quel est l'impact des **ouvrages de correction** torrentielle sur la propagation et la contribution des laves torrentielles ?

- (7) Quels sont les paramètres les plus importants à acquérir et à surveiller pour donner un **diagnostic fiable** quant à la survenance d'une lave torrentielle ?

La deuxième partie de ce mémoire est consacrée à la recherche des réponses aux questions 1 à 3 sur la base d'une observation et d'une cartographie du torrent de *Faucon* à l'échelle du chenal torrentiel, c'est-à-dire à une échelle de l'ordre du 1/1000ème. Des investigations spécifiques ont également été mises en œuvre. Les questions 4 à 7 seront traitées dans la troisième partie.

2ème PARTIE : EVENEMENTS TORRENTIELS A L'ECHELLE DU CHENAL

La ***deuxième partie*** est consacrée à l'étude de trois événements torrentiels survenus sur le torrent de *Faucon*. Cette étude porte à la fois sur la morphologie (du lit et des versants) et sur les matériaux (dépôts torrentiels et formations superficielles sources).

Le ***quatrième chapitre*** analyse la morphologie fine du torrent de *Faucon* après trois événements torrentiels survenus en 1996, 2002 et 2003. Les trois évènements sont décrits pour des zones 'homogènes' en insistant sur le fonctionnement de ces zones (zones d'érosion/dépôt dans le chenal, description de l'état du lit, des berges torrentielles, des versants contigus et des seuils torrentiels). Enfin, les investigations menées sur une zone potentielle de déclenchement (le glissement de terrain de *Champerousse*) sont décrites.

Dans le ***cinquième chapitre,*** les caractéristiques sédimentologiques, hydrodynamiques, géotechniques et rhéologiques des dépôts de laves torrentielles et des matériaux sources (issus des zones '*réelles*' ou '*potentielles*' de déclenchement et d'alimentation) sont analysées. Après avoir défini le type d'écoulement associé aux dépôts étudiés, les analyses comparatives entre les matériaux sources et les dépôts de laves sont présentées. Les lois de comportement des matériaux sont définies et l'évolution des caractéristiques rhéologiques en fonction de la granulométrie et de la teneur en eau est discutée. Des essais rhéologiques sur des mélanges artificiels de '*matériaux sources*' sont présentés et comparés aux caractéristiques rhéologiques des dépôts de laves torrentielles.

Le ***sixième chapitre*** est une synthèse entre les observations relatives au torrent de *Faucon* (Chapitre 4) et les caractérisations des matériaux (Chapitre 5). Une interprétation du fonctionnement, en termes de volumes écoulés et de types de matériaux impliqués, de l'appareil torrentiel de *Faucon* pour chacun des événements de 1996, 2002 et 2003 est proposée. Cette interprétation est présentée pour les phases de déclenchement, de propagation et de dépôt. Pour la phase de déclenchement, les mécanismes de déclenchement et les volumes associés sont estimés et discutés. Pour la phase de propagation, les paramètres hydrauliques (volumes globaux et caractéristiques d'écoulement) et l'évolution des caractéristiques des matériaux pendant la propagation (sédimentologie et rhéologie) sont confrontés et analysés. La phase de dépôt est analysée en évoquant la distribution spatiale des dépôts de laves torrentielles dans le chenal et sur le cône. Enfin, une étude statistique des caractéristiques des biefs torrentiels du Faucon est réalisée sur la base d'une analyse en composantes principales (ACP) et d'une classification hiérarchique ascendante (CAH). Les résultats de ces analyses statistiques sont confrontés aux observations relatives à la lave de 2003.

Chapitre 4 : EVOLUTION MORPHO-DYNAMIQUE DU CHENAL TORRENTIEL DE FAUCON DE 1998 à 2003

Pas de laves torrentielles, sans matériaux disponibles. Cette expression résume à elle seule la problématique de l'analyse des conditions de déclenchement des laves torrentielles : la disponibilité des matériaux est une condition nécessaire (mais non suffisante) à toute lave torrentielle. Quels sont les processus géomorphologiques qui contrôlent la fourniture en matériaux disponibles ? Quelles sont les conditions géomorphologiques favorables au déclenchement des laves torrentielles ? Quelles sont les caractéristiques physiques des formations superficielles sources (comportement pré-rupture) et des matériaux de laves (comportement post-rupture) ?

Ces points d'achoppement concernent plus particulièrement deux des trois phases de la cinématique des laves torrentielles : **le déclenchement et la propagation**. Les observations morphologiques de la phase de dépôt sont nombreuses du fait essentiellement de leur proximité aux zones anthropisées (Bonnet-Staub, 1998 ; Sorgi-de-Gennaro, 1999). Par contre, les observations et la cartographie morphologique '*fine*' du déclenchement et de la propagation d'événements de laves torrentielles restent rares (Alcoverro *et al.*, 1999 ; Batala *et al.*, 1999). Ceci est un frein significatif à la connaissance des mécanismes de déclenchement et de contribution.

Les relations entre l'occurrence des laves torrentielles dans un bassin versant d'une part, et ses propriétés géomorphologiques d'autre part sont étroites (§ 1.3.). Les processus géomorphologiques vont rendre disponibles des matériaux et les acheminer vers le chenal torrentiel. L'étude de la géomorphologie du bassin versant constitue donc une étape fondamentale : elle a été menée sur le *Faucon* à l'échelle du chenal torrentiel. Les objectifs de l'analyse géomorphologique sont multiples :

- décrire la morphologie fine du bassin versant et du chenal torrentiel afin de définir les zones potentielles de déclenchement et de contribution (Chapitres 4 et 6) ;
- identifier, cartographier (Chapitre 4) et caractériser (Chapitre 5) les formations superficielles sources disponibles ;
- identifier, cartographier (Chapitre 4) et hiérarchiser (Chapitre 6) les biefs du torrent de *Faucon* et définir leur fonctionnement (Chapitre 6) pour trois épisodes torrentiels.

Dans ce Chapitre 4, pour répondre à ces objectifs (Tab. 4.1, 4.2 et 4.3), il a ainsi été nécessaire au préalable :

- d'établir une typologie des formations superficielles selon des principes de description et de représentation cartographique orientée '*lave torrentielle*' ;
- de décrire la morphologie '*fine*' du chenal torrentiel après les trois événements (zones d'érosion/dépôt dans le chenal, caractéristiques du profil en long, état des berges torrentielles et des versants contigus, et évolution de l'état des seuils torrentiels) ;
- de décrire et de suivre une zone potentielle de déclenchement (le glissement de terrain de *Champerousse*).

Tableau 4.1 *: Zones sources de déclenchement : cartographie morphodynamique du bassin versant (II.1)*

Etapes	Objectifs	Moyens	Chapitre
II.1 : Cartographie morphodynamique du bassin versant	Localiser les zones potentielles de déclenchement ; Evaluer les volumes potentiellement mobilisables pour chacune de ces zones ; Définir les processus morphologiques en relation avec les mécanismes potentiels de déclenchement.	Photo-interprétation de photographies aériennes IGN multidates ; Observations morphologiques sur le terrain couplées à des levés topométriques et/ou au GPS ; Synthèse des cartes et des documents disponibles (cartes géologiques, etc) et réalisation de documents spécifiques adaptés.	**Chapitre 4**

Tableau 4.2 *: Analyse de la phase de propagation : Morphologie du chenal torrentiel et des versants contigus découpés en biefs homogènes (III.1 et III.2)*

Etapes	Objectifs	Moyens	Chapitre
III.1 : Morphologie du chenal torrentiel découpé en biefs homogènes	Identifier les biefs fonctionnels et établir une typologie de ces biefs ; Définir et localiser les volumes de matériaux 'disponibles' dans le chenal torrentiel ; Définir les conditions d'écoulement (bief favorable à l'érosion, favorable au dépôt, etc.) d'une lave torrentielle dans chacun des biefs.	Réalisation du profil en long en croisant les types de mesure (Topofil, Tachéométrie, GPS) ; Morphométrie du chenal (largeur du lit mineur, du lit majeur, hauteur des berges, etc.) par des levés *in-situ* ; Localisation et description des seuils torrentiels ; Description et estimation du volume des matériaux par des levés sur le terrain ; Analyse de clichés photographiques du chenal torrentiel pris à des dates différentes.	**Chapitre 4**
III.2 : Morphologie des versants contigus au chenal torrentiel découpé en biefs homogènes	Définir pour chaque bief les hauteurs maximales d'écoulement et la section mouillée associée ; Définir et localiser les volumes de matériaux disponibles sur les versants contigus au chenal.	Levés sur le terrain pour : 1) cartographier les formations. et l'occupation du sol ; 2) cartographier les instabilités affectant les versants contigus ; 3) définir les caractéristiques morphométriques des versants à partir de profils en travers.	**Chapitre 4**

Tableau 4.3 *: Analyse de la phase de dépôt : étapes IV.1 à IV.3*

Etapes	Objectifs	Moyens	Chapitre
IV.1 : Morphologie du chenal torrentiel découpé en biefs homogènes	Définir les zones favorables au débordement sur le cône de déjection.	Etablissement du profil en long du chenal torrentiel en croisant des données topographiques (Topofil, Tachéométrie, GPS) ; Morphométrie du chenal (largeur du lit mineur, du lit majeur, hauteur des berges, etc.) par des levés *in-situ* ; Localisation et description (type, état, dimensions, etc.) des seuils torrentiels dans le chenal.	**Chapitre 4**
IV.2 : Topographie du cône de déjection.	Localiser les zones préférentielles d'étalement ;	Levés topographiques du cône de déjection par GPS et/ou des levés tachéométriques ; Production d'un MNT du cône.	**Chapitre 4**
IV.3 : Inventaire et description des éléments exposés et des enjeux	Identifier les éléments exposés pour évaluer les conséquences d'éventuels débordements.	Localiser et décrire les éléments exposés présents sur le cône de déjection ; Cartographie des éléments exposés dans le SIG ArcView 3.1.	**Chapitre 4**

4.1. Méthodologie et moyens mis en œuvre pour les investigations

Les recherches entreprises depuis plusieurs décennies sur le thème des laves torrentielles se sont trop souvent limitées à évoquer les relations entre le déclenchement des laves et le substrat géologique en omettant ou en diminuant le rôle des formations superficielles et de la morphologie 'fine' du chenal torrentiel (Vandine, 1985 ; Meunier, 1991 ; Takahashi, 1991). Pour l'étude des mécanismes de contribution qui agissent à une échelle beaucoup plus fine que les mécanismes de déclenchement (§ 1.3.), les seules informations géologiques ne sont pas suffisantes. En effet, la majeure partie des matériaux mobilisables sont des dépôts dans le lit ou bien des formations superficielles recouvrant des pentes latérales menaçant de glisser (Johnson et Rodine, 1984 ; Meunier, 1988 ; Genevois *et al.*, 1995).

Cette section donne les différents éléments nécessaires à une bonne observation morphologique d'un chenal torrentiel : définitions des formes et des formations, critères de description et principes de représentation. D'une manière plus globale, cette démarche rationnelle doit permettre :

- d'identifier les zones de déclenchement, de dépôt et d'érosion de plusieurs laves torrentielles observées dans le torrent de *Faucon* ;
- d'évaluer les volumes associés à ces zones.

Avant de conduire plus en avant les observations et les analyses, il convient de donner les définitions des formes et des formations observées dans le cadre de ce travail.

4.1.1. Cartographie morphologique de l'appareil torrentiel

4.1.1.1. Eléments de définitions

La morphologie torrentielle spécifique (berge, chenal, versant, section mouillée, hauteur d'écoulement, épaisseur des dépôts, profondeur d'incision) et les formations superficielles associées aux événements torrentiels observés sont maintenant définies.

a) Morphologie torrentielle

Les formes sont observées le long du chenal torrentiel et peuvent être localisées dans le chenal torrentiel, sur les berges ou sur les versants contigus.

Le **chenal torrentiel** correspond au lit du torrent et peut être unique ou décomposé en un lit mineur et un lit majeur (Fig. 4.1). Il est délimité de part et d'autre par des versants ou des berges. Ces versants ou ces berges peuvent être affectés par des processus de versant (glissement superficiel ou non, éboulement, sapement, etc.).

Les **berges torrentielles** sont le produit de l'incision torrentielle. Dans la plupart des cas elles correspondent à des dépôts incisés par le torrent lors des fortes crues. Ces berges peuvent être formées dans des dépôts de laves torrentielles, des colluvions ou bien encore des banquettes morainiques. Par conséquent, elles sont uniquement observées lorsqu'il y'a la présence de formations superficielles meubles dans le lit majeur du chenal torrentiel. Dans le cas inverse, les berges sont confondues avec les versants (Fig. 4.1).

Les formations observées dans le chenal torrentiel sont : les **dépôts de crue torrentielle** et les **dépôts de laves torrentielles.**

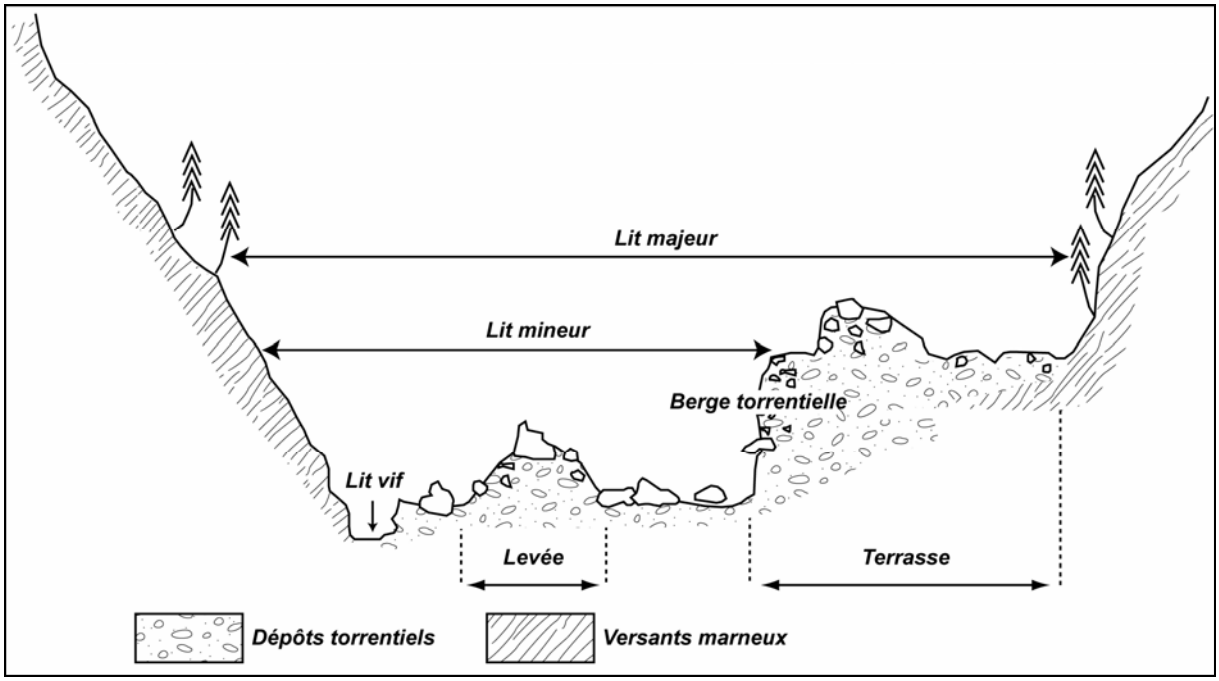


Figure 4.1 *: Morphologie d'un chenal torrentiel.*

Les dépôts de crue torrentielle remplissent le fond du chenal. Ce sont des **alluvionnements** de matériaux grossiers (sables, galets, cailloux, blocs, etc.) non cimentés qui peuvent prendre la forme de couches pavées, de terrasses, etc. Par endroit, des petites vasques peuvent être remplies de matériaux limoneux ou limono-argileux.

Les dépôts de **laves torrentielles** prennent la forme de levées qui s'appuient sur le pied du ou des versants, ou bien encore de lobes (§ 1.2.).

b) Formations superficielles

Plusieurs types de formations peuvent être observés dans les torrents du Bassin de *Barcelonnette* (§ 2.5.1.). Elles se regroupent en quatre ensembles distincts en fonction des processus génétiques (van Westen, 1993, à l'échelle d'un ensemble de bassins versants ; Terlien, 1996, à l'échelle du bassin versant) : les formations du **domaine glaciaire**, les formations du **domaine périglaciaire**, les formations liées à **l'action de l'eau** et les formations issues des **mouvements de terrain**.

▪ Dans le Bassin de *Barcelonnette*, les formations du **domaine glaciaire (FS01)** se présentent sous plusieurs formes : arcs morainiques, bourrelets, terrasses, glaciers rocheux (Flageollet *et al.*, 1999 ; Weber, 2001). Ces formes regroupent des formations glaciaires (morainiques) aux caractéristiques très proches l'une de l'autre en termes de granulométrie ou de comportement géotechnique (Maquaire *et al.*, 2003 ; Malet, 2003). Ces formations glaciaires peuvent être remaniées ou affectées par différents processus de versant : solifluxion, coulée boueuse, glissement de terrain superficiel (Campy et Macaire, 1989).

▪ Deux grands types de formations du **domaine périglaciaire** peuvent être distingués. Les **formations liées au processus d'éboulisation (FS04)** sont liées entre autres aux actions conjuguées de la cryoclastie et du ruissellement. On peut distinguer plusieurs types d'éboulis, en fonction de la forme du dépôt (tablier, cône, couloir, etc.) et la taille des éléments (éboulis fins, éboulis grossiers). Dans le bassin de *Barcelonnette*, ces éboulis sont situés essentiellement en contrebas des escarpements armés par les calcaires et les flyschs des nappes de charriage (§ 2.3.), et dans les bassins de réception de certains appareils torrentiels. Les **colluvions et les formations de pente** sont très largement présents à l'échelle du bassin de *Barcelonnette*, mais sont dans la plupart des cas assimilés à la couverture morainique discontinue (Weber, 2001). Ces formations de pente recouvrent différents substrats (autochtones et allochtones). Sur l'allochtone (nappes de l'*Autapie* et du *Parpaillon*, **FS03**), ces formations de pente ressemblent fortement aux moraines à ceci près que les éléments grossiers sont anguleux et ne présentent pas de traces liées à l'activité glaciaire (stries). Sur l'autochtone (marnes noires, **FS02**), ces formations de pente peuvent correspondre à des situations morphologiques différentes : comblement de ravine, recouvrement de pente monotone, glacis (Maquaire *et al.*, 2003).

▪ Trois grands types de formations liées **aux actions de l'eau** peuvent être distingués dans le Bassin de *Barcelonnette* : les alluvions, les dépôts lacustres et les dépôts torrentiels. Seuls ces derniers sont présents dans notre terrain d'étude. Les **dépôts torrentiels** sont représentés essentiellement par les larges épandages sous forme de cônes, de levées, etc. Les cônes anciens et récents ne seront pas distingués car les matériaux constitutifs sont grossièrement les mêmes. Par contre, une distinction entre les **dépôts de laves torrentielles**, et les **dépôts de crues torrentielles** est définie. Cette distinction se fait par la morphologie du dépôt et la texture du matériau (Meunier, 1991 ; Bonnet-Staub, 1998 ; Remaître *et al.*, 2002).

▪ La forte dépendance du comportement mécanique des formations liées **aux processus de mouvement de masse** à la roche mère (matériaux sources) nécessite de distinguer les formations remaniées issues des glissements marneux, de celles issues des glissements

affectant un ensemble de formations. On distinguera ainsi deux grands types de produits de glissement. Les **produits de glissement à genèse marneuse (FS05)** peuvent être issus de glissements actifs (*Poche*) ou de glissements dormants (*Bouzoulières*). Ces formations possèdent globalement des caractéristiques mécaniques assez proches ou peu éloignées du matériau d'origine (Maquaire *et al*., 2003). Les **produits de glissement à genèse mixte** sont issus d'un mélange de plusieurs formations superficielles. Dans ce travail, deux types de produits de glissements à genèse mixte ont été distingués en fonction des formations impliquées : **marnes et colluvions (FS06)** ; **matériaux des nappes de charriage et colluvions (FS07)**.

4.1.1.2. Critères de description

Les critères de description et de reconnaissance des formes torrentielles (géométrie, position) et des formations (couleur, texture, position) sont présentés dans cette sous-section.

a) Morphologie du lit torrentiel

La morphologie torrentielle concerne à la fois la morphologie du chenal proprement dit, et la morphologie des dépôts et des zones d'érosion après un événement de type lave torrentielle. Plusieurs descripteurs ont été utilisés pour les définir.

Le **lit torrentiel** est décrit selon plusieurs critères morphologiques. Ces critères correspondent aux dimensions géométriques des différents éléments du chenal torrentiel. Ainsi, la **pente du lit**, la **largeur** du **lit majeur** et du **lit mineur**, la **hauteur des berges**, la **section mouillée** sont les principaux descripteurs utilisés.

Les **dépôts** et/ou **traces d'érosion** sont des descripteurs qui rendent compte du passage d'une lave torrentielle (Fig. 4.2) ; la mesure de leurs dimensions permet d'estimer la hauteur d'écoulement, l'épaisseur et le volume des dépôts.

La **hauteur d'écoulement** est mesurée pour estimer les paramètres hydrauliques (section mouillée, vitesse, débit) de la lave torrentielle associée à ces dépôts. La hauteur d'écoulement correspond à la hauteur maximale d'un dépôt de lave torrentielle (lobes ou traces) par rapport au point le plus bas du chenal torrentiel le jour de l'observation.

Outre son intérêt dans l'estimation des dégâts sur le cône de déjection, l'estimation des **épaisseurs de dépôts** permet d'évaluer les volumes déposés par des calculs géométriques. L'épaisseur des dépôts est estimée à partir d'observations morphologiques et de mesures de terrain au mètre-ruban. Pour les dépôts **liés à des débordements**, l'épaisseur correspond à la hauteur comprise entre le point haut du dépôt et le point haut de la berge. Pour les dépôts restés **confinés dans le chenal torrentiel**, l'épaisseur est mesurée directement sur des coupes fraîches.

La **profondeur d'incision** (érosion linéaire) provoquée par le passage d'une lave torrentielle est appréciée par le biais de traces (sapements de berge), d'observations morphologiques multi-dates (photographies, croquis, etc.) et des mesures de terrain au mètre-ruban.

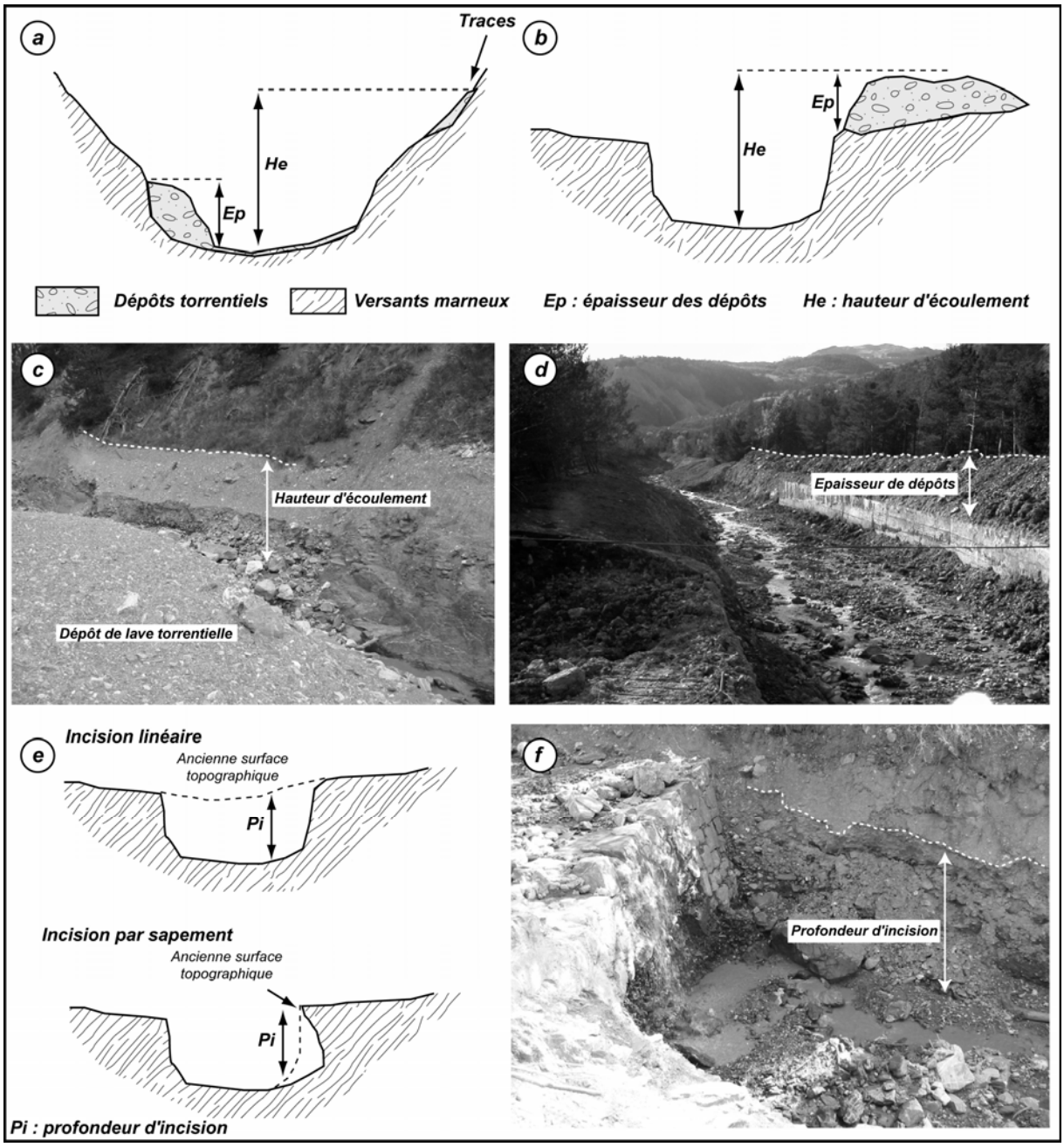


Figure 4.2 *: Critères de description de la morphologie torrentielle.*

a : épaisseur des dépôts et hauteur d'écoulement pour un dépôt confiné dans le chenal ;
b : épaisseur des dépôts et hauteur d'écoulement pour un dépôt de débordement ;
c : photographie d'un dépôt de lave confiné et hauteur d'écoulement associée ;
d : photographie d'un dépôt de débordement de lave et épaisseur de dépôt associée ;
e : profondeur d'incision pour une incision linéaire et une incision par sapement de berge ;
f : photographie d'une incision par sapement et profondeur d'incision associée.

Le **type d'aménagements anthropiques** constitue le dernier type de descripteur utilisé. Les **réseaux de drainage** et les **seuils torrentiels** ont été décrits et répertoriés (Tab. 4.4). Les catalogues photographiques des seuils torrentiels des torrents de *Faucon* (Annexe 7) et de *Champerousse* (Annexe 8) sont disponibles en annexe.

Tableau 4.4 *: Les descripteurs de la morphologie torrentielle.*

Morphométrie du lit	Pente du lit (°)
	Largeur du lit majeur (m)
	Largeur du lit mineur (m)
	La hauteur des berges (m)
	La section mouillée (m²)
	Le type de profil en travers (symétrique, dissymétrique, U, V)
	Présence d'un affluent naturel ou anthropique (irrigation, drainage)
Morphologie d'une lave torrentielle	La hauteur maximale d'écoulement (m)
	L'épaisseur des dépôts de laves torrentielles (m)
	La profondeur d'incision (m)
Caractéristiques des seuils torrentiels	Altitude de la base et de la cuvette du seuil (m)
	La hauteur du seuil
	La largeur du seuil et du déversoir (m)
	Le type de seuils (pierres sèches, maçonné, béton armé)
	L'état du seuil (bon, endommagé, comblé, etc.)
	Les données historiques (date de construction, rénovation, etc.)

b) Morphologie des versants et formations superficielles

Les descripteurs de la morphologie torrentielle ne sont pas uniquement réservés au seul lit torrentiel. Ils concernent également, 'l'environnement' du lit, à savoir **les versants**. Pour chacun des versants, **les formations superficielles**, les **instabilités** et **l'occupation du sol** ont été cartographiées.

Les **formations superficielles** ont été classées selon trois descripteurs :

- le processus de mise en place (soit quatre types) ;
- la texture du matériau. Elle va guider son comportement géomécanique et hydrologique (Mulder, 1991 ; Van Asch et Mulder, 1991 ; Van Asch *et al.*, 1993) ;
- l'épaisseur de ces formations superficielles.

Les **instabilités de versant** ont été cartographiées et leurs activités évaluées à partir d'observations de terrain, de cartes morphologiques et de photographies aériennes. Les instabilités ont été décrites à partir de descripteurs classiques (§ 1.1.1., Tab. 1.1) : type d'instabilité (glissement de terrain, éboulement, écroulement), géométrie (surface, profondeur), matériaux impliqués.

L'**occupation du sol** a été cartographiée en tenant compte à la fois des éléments naturels (couverture végétale) et anthropiques (aménagements torrentiels, irrigation, etc.). La couverture végétale a été cartographiée à l'aide d'observations de terrain et de l'étude des photographies aériennes. Les aménagements anthropiques ont été inventoriés et cartographiés sur la base d'observations de terrain et de consultations des archives du service RTM.

4.1.1.3. Principes et modes de représentation

Les principes et les modes de représentation (échelle de représentation, approche géomorphologique, utilisable par un expert/gestionnaire) des formes et des formations superficielles sont maintenant présentés. Les principes de la cartographie sont également présentés pour la morphologie torrentielle, les seuils torrentiels et les formations superficielles.

Les données issues des observations et des mesures de terrain, et de l'analyse de documents, de cartes et de photographies sont répertoriées et cartographiées sous le SIG ArcView ©_3.1. sur un fond photographique. Ce fond est une ortho-photographie aérienne[12] du bassin de *Barcelonnette* prisent en mai 2000. Le choix d'une cartographie sous SIG se justifie pour faciliter par la suite les calculs géométriques sur les surfaces et les volumes des matériaux sources (formations superficielles) et des événements de laves (He *et al.*, 2003). Les données ont également été représentées graphiquement sur un profil au long à l'échelle du 1/1000ème. Les principes d'établissement de ce profil en long sont maintenant présentés.

a) Principes d'établissement du profil en long et représentation des caractéristiques du lit torrentiel et des versants contigus

Le profil en long du torrent est un paramètre essentiel car il traduit la dynamique torrentielle. Un profil en long détaillé du torrent de Faucon a été établi en confrontant plusieurs types de mesures ayant des précisions relatives différentes (Tab. 4.5) :

- des mesures de positionnement (X, Y, Z) de points dans le chenal et des seuils torrentiels au **GPS différentiel**. Compte tenu du confinement de certains secteurs du torrent, seuls 20 seuils ont pu être positionnés au GPS ;
- des mesures altimétriques (Z) à l'altimètre de la cuvette des seuils torrentiels (anthropiques et naturels) ;
- des mesures au **décamètre de la hauteur base-cuvette** pour chacun des seuils répertoriés ;
- des mesures de la distance entre chaque seuil à l'aide d'un **topofil.** Le positionnement des seuils torrentiels visibles sur l'ortho-photographie a pu être contrôlé lors de leur saisie sous le **logiciel ArcView_3.1**.

Tableau 4.5 *: Type de mesures pour établir le profil en long, données mesurées et précisions associées.*

Type de mesures	Données mesurées	Précision
GPS différentiel	Altitude (Z) de la cuvette des seuils, positionnement (X,Y) des seuils	+/- 5 cm
Altimètre	Altitude (Z) de la base et de la cuvette des seuils, hauteur des seuils	+/- 50 cm
Décamètre	Hauteur des seuils	+/- 5 cm
Topofil	Positionnement (X) des seuils	+/- 100 cm
Arc View 3.1	Positionnement (X, Y) des seuils	+/- 50 cm

En dehors d'une obligation d'utiliser différents types de mesures compte tenu des contraintes citées précédemment, une comparaison des résultats obtenus par les différentes méthodes pour chaque type de données acquises est permise. Ainsi, une double ou une triple vérification a été faite pour le positionnement, l'altitude et la hauteur de chaque seuil.

La méthodologie (Fig. 4.3) utilisée pour la réalisation du profil a été dans un premier temps de considérer les points GPS comme des points fixes validés dont la position et l'altitude étaient considérées comme des valeurs « absolues ». Ces vingt points GPS ont constitués les « pivots » du profil, sur lesquels nous nous sommes appuyés pour déterminer la position et l'altitude des autres seuils. L'altitude de la base du seuil a été déterminée pour chaque point GPS en soustrayant à l'altitude GPS de la cuvette, la hauteur du seuil mesurée au décamètre.

[12] L'ortho-photographie aérienne a été gracieusement mise à notre disposition par le *Crige PACA*.

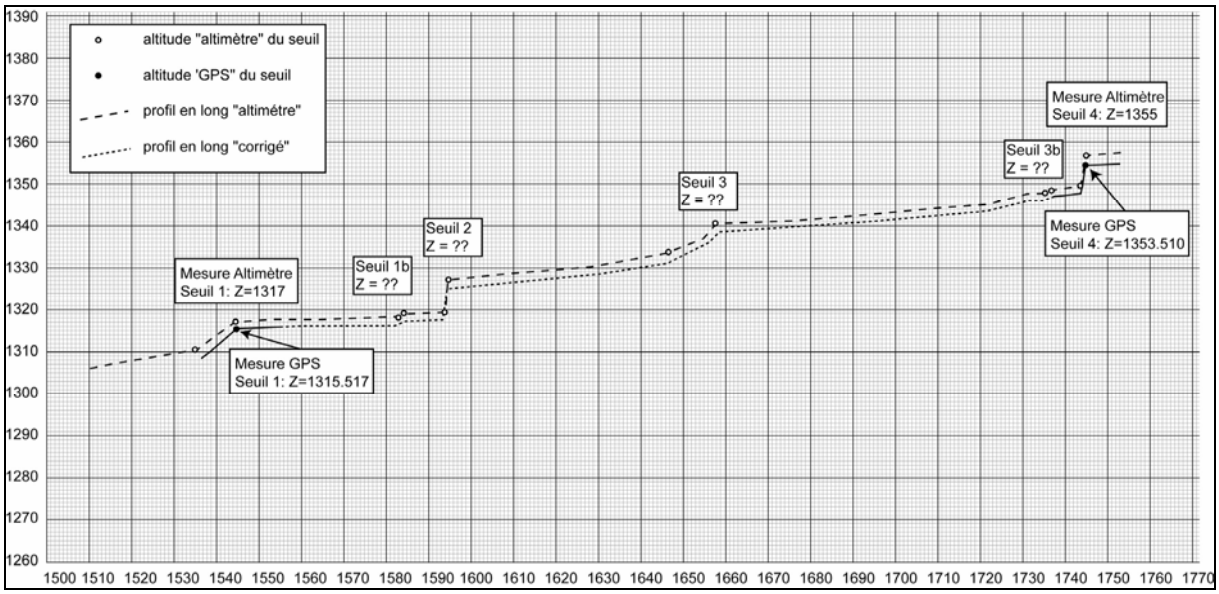


Figure 4.3 *: Méthodologie pour la réalisation du profil en long du torrent de Faucon.*

Le profil en long a été découpé en biefs 'homogènes' qui correspondent à la section comprise entre deux seuils torrentiels (anthropiques ou naturels). **Chaque bief est décrit de l'aval vers l'amont** et porte le nom du seuil torrentiel qui constitue sa terminaison aval. Le choix des seuils torrentiels comme limites de ces biefs a été suggéré par la volonté de faire des observations morphologiques 'multi-dates'. La plupart des seuils torrentiels sont 'relativement stables' dans le temps et identifiables sur le terrain.

b) Morphologie du lit torrentiel, des versants des formations superficielles et aménagements anthropiques

Les informations ont été cartographiées 'classiquement', puis répertoriées dans le SIG. Chaque objet numérisé (polygone) est associé à une table attributaire (Fig. 4.4). Pour le lit torrentiel, les attributs sont :

- la longueur du bief (m) ;
- l'altitude des deux extrémités du bief (m) ;
- la pente du lit (°) ;
- la largeur du lit majeur (m) ;
- la largeur du lit mineur (m) ;
- la hauteur des berges (m) ;
- la section mouillée (m^2) ;
- l'état de stabilité des berges (sapement et affouillement).

Pour les versants, les attributs sont :

- la pente des versants (°) ;
- le type de profil (symétrique, dissymétrique, U, V) ;
- les formations superficielles (type, épaisseur, texture) ;
- l'occupation du sol (végétation arbustive, végétation herbacée, sol nu/roche nue) ;
- les instabilités (glissement, éboulement, ravinement) ;
- la présence d'une source ou d'un affluent.

Les formations superficielles sont cartographiées par aires d'iso-épaisseur. Chacune représentant l'affleurement d'une formation superficielle est rattachée à un bief.

Les aménagements anthropiques ont été également cartographiés :

- les voies de communication (routes, chemins, etc.) ;
- les canaux d'irrigation, les drainages ;
- le bâti (Fig. 3.7) ;
- les seuils torrentiels.

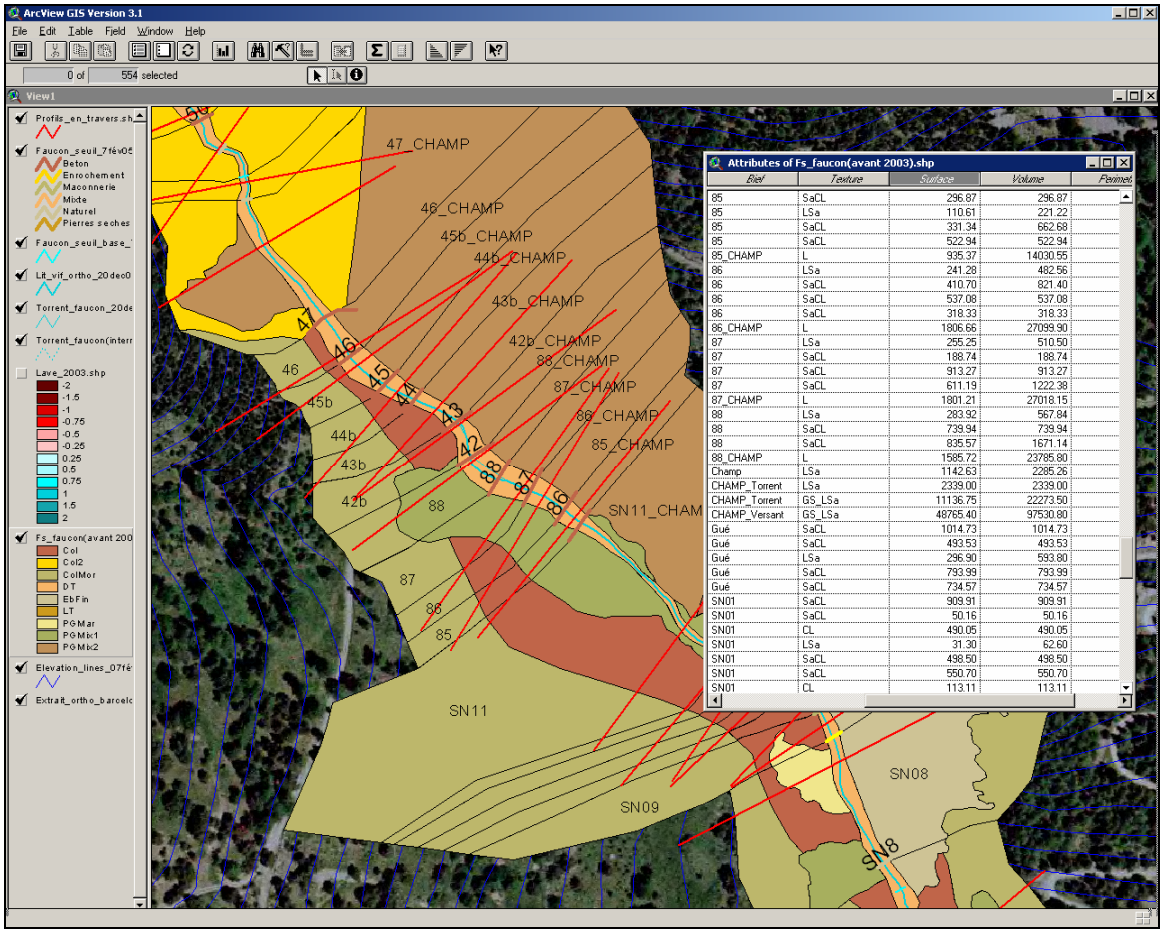


***Figure 4.4** : Cartographie sous SIG des formations superficielles (polygones et table d'attributs associée).*

L'inventaire descriptif et photographique détaillé des seuils a été effectué, pour les torrent de *Faucon* et de *Champerousse,* au cours de l'été 2003 et 2004. La base de donnée a été complétée par les informations sur l'état des seuils recueillies par les services RTM depuis 1981. L'historique de l'état des seuils de 1981 à 2004 est disponible dans l'annexe 9. Pour chaque seuil, les attributs suivants ont été retenus (Fig. 4.5) :

- l'altitude de la base et de la cuvette du seuil (m) ;
- la hauteur du seuil (m) ;
- la largeur du seuil et du déversoir (m) ;
- le type de seuils (maçonné, béton armé, etc.) ;
- une photographie du seuil ;
- l'état du seuil (bon état, endommagé, comblé, etc.) ;
- les données historiques (date de construction, date de rénovation, etc.).

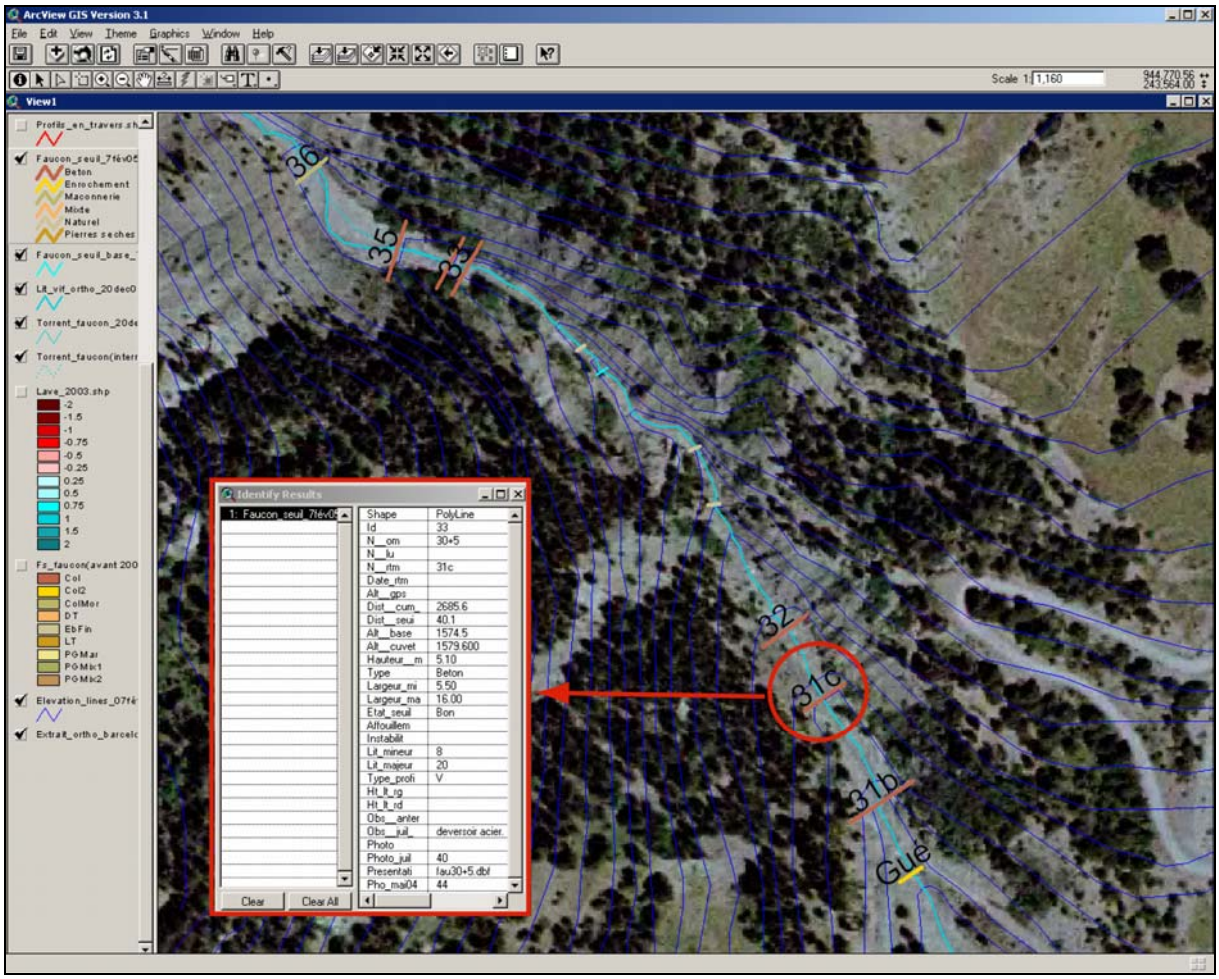


Figure 4.5 *: Cartographie sous SIG des seuils torrentiels (objets et table d'attributs associée).*

c) Représentation des événements de laves torrentielles

Les caractéristiques d'un événement de lave torrentielle ont été également cartographiées par biefs en retenant trois informations principales :

- la hauteur maximale d'écoulement (m) ;
- l'épaisseur des dépôts de laves torrentielles (m) ;
- la profondeur des zones d'incision du lit torrentiel (m).

Sur la base des observations morphologiques dans les torrents à laves menées par d'autres auteurs (Hungr *et al.*, 1987 ; Johnson et Rodine, 1984 ; Bonnet-Staub, 1998 ; Bardou, 2002), trois grands types de dépôts de laves torrentielles peuvent ainsi être distingués. (Fig. 4.6) :

- les deux premiers types (A et B) concernent des dépôts restés confinés dans le chenal torrentiel. Le **type A** se caractérise par la présence de levées latérales de part et d'autre du chenal. Le lit torrentiel lui est exempt de dépôts de laves torrentielles, ou alors quelques traces. Le **type B** est très proche du type A, à ceci près que des dépôts de laves torrentielles sont présents dans le chenal torrentiel. Ces dépôts peuvent remplir tout ou partie du chenal ;

- le troisième type, le **type C** concerne des dépôts de débordements. Ils se présentent dans la très grande majorité des cas sous la forme de lobes dont les dimensions peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres.

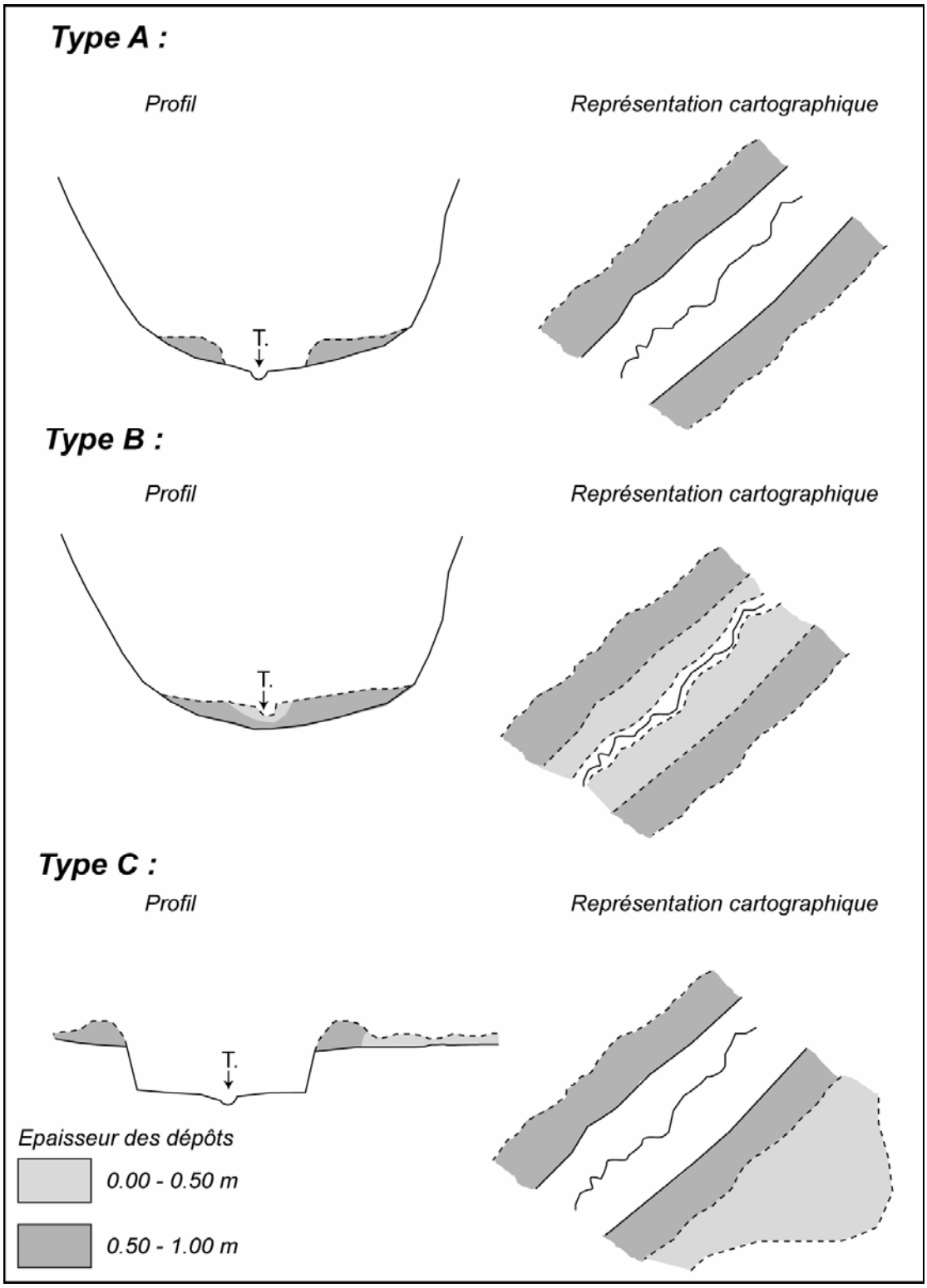


Figure 4.6 *: Nomenclature et représentation cartographique des dépôts de lave torrentielle.*

Chaque type de dépôt est cartographié dans le SIG selon le principe décrit précédemment. Les dépôts sont représentés par des aires d'iso-épaisseur pour chacun des biefs (Fig. 4.7). Il n'existe pas à proprement parler de nomenclature spécifique pour les classes d'épaisseur. Dans ce travail, les classes d'épaisseur ont un incrément de 0.25 m pour les dépôts épais de moins d'un mètre, et un incrément de 0.50 m au delà de cette valeur d'un mètre.

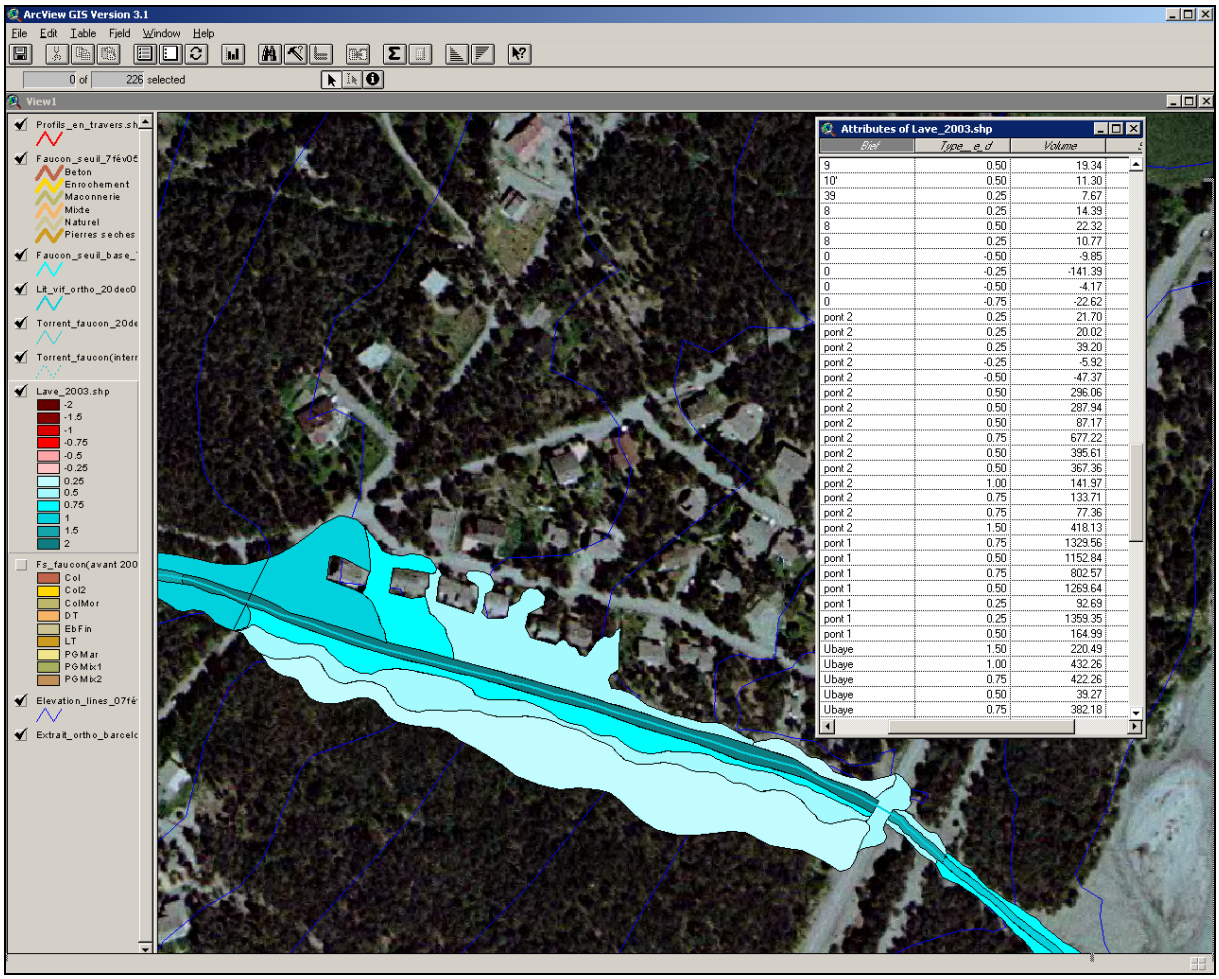


Figure 4.7 *: Cartographie sous SIG des dépôts de lave torrentielle (polygones et table d'attributs associée).*

Les zones d'érosion ont été cartographiées en considérant deux grands types de zones d'érosion (Hungr *et al.*, 1984 ; Johnson et Rodine, 1984 ; Costa, 1987 ; Garitte et Lahousse, 2002) :

- le **type A** est caractérisé par la présence de levées de part et d'autre de la zone d'incision. C'est la morphologie typique des coulées de débris de versant, observés entre autre dans la vallée du *Bachelard* (Bliejenberg, 1988).

- **le type B** est caractérisé par l'absence de levées, il s'agit dans la plupart des cas d'une incision du lit mineur et/ou dans des dépôts de laves préexistants.

Comme les zones de dépôts, les zones d'érosion sont représentées par des aires d'iso-épaisseur pour chacun des biefs. La même nomenclature a été adoptée pour fixer les limites des différentes classes de profondeur d'érosion.

4.1.2. Caractérisation des formations superficielles et suivi d'un glissement de terrain : Réseau d'auscultation et de surveillance

La compréhension et la modélisation des mécanismes qui contrôlent la dynamique torrentielle sont actuellement limitées par le manque de données quantitatives fiables. Ces données doivent être acquises selon un échantillonnage spatial, une fréquence et une durée

propre au processus étudié. Le nombre et la complexité des facteurs de contrôle rendent difficile l'élaboration de modèles physiques fiables. Pour caler et valider les modèles de déclenchement, de propagation et de dépôt, il faut acquérir une base de données sur les matériaux sources et les caractéristiques morphologiques du chenal torrentiel. Dans le cadre de ce mémoire, les opérations entreprises en complément des observations et de la cartographie morphologique avaient deux principaux objectifs :

- caractériser les formations superficielles (épaisseur, contexte géomorphologique, caractéristiques hydrodynamiques in-situ, présence ou absence d'une nappe) ;
- suivre un glissement de terrain susceptible de déclencher ou d'alimenter une lave (glissement de *Champerousse*).

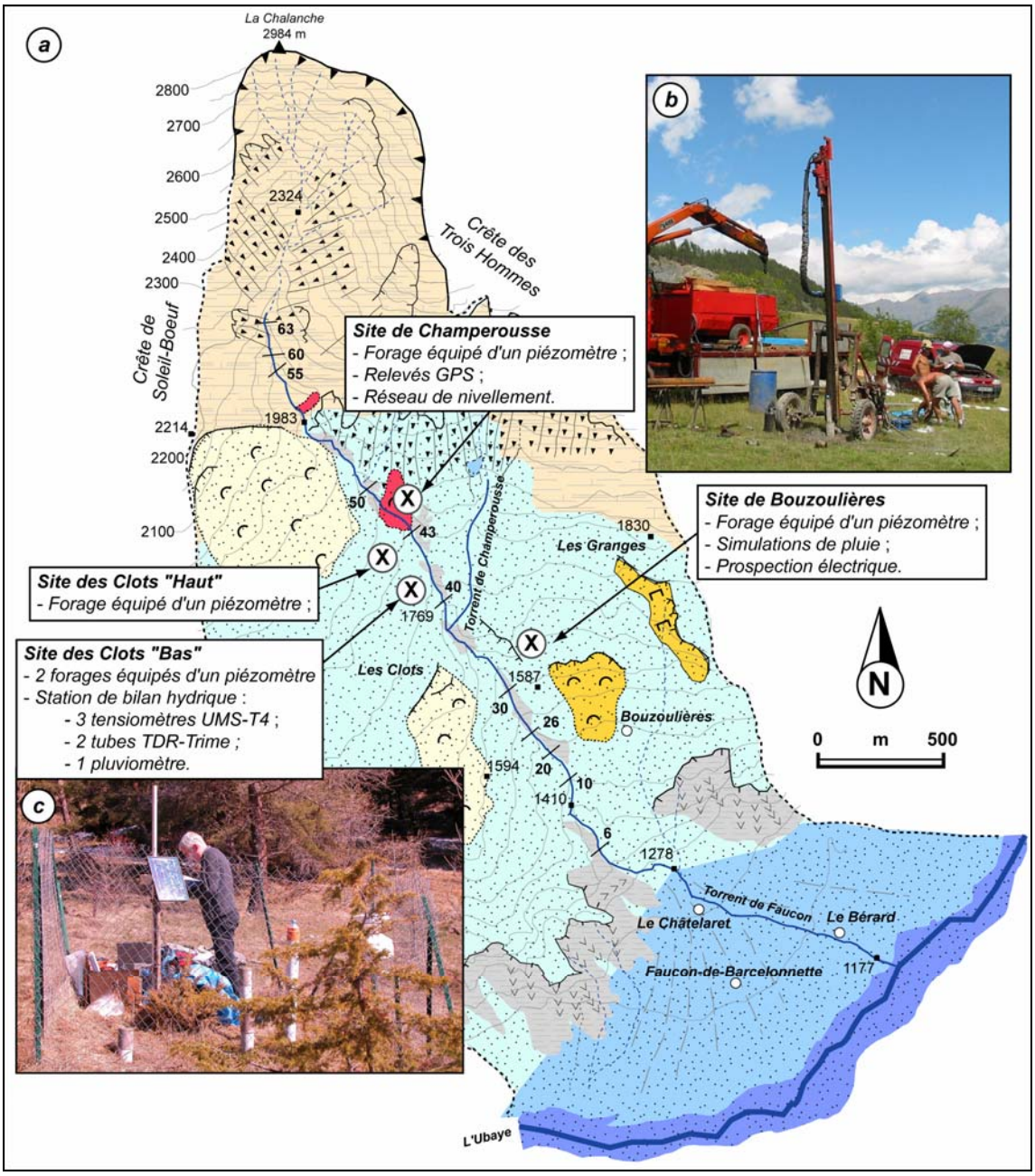


Figure 4.8 *: Localisation des sites d'investigations hydrologiques, hydrogéologiques, cinématiques et géotechniques.*

a : carte de localisation des sites ;
b : photographie d'un forage réalisé par l'équipe de Hydro-Géotechnique sur le site de Bouzoulières ;
c : photographie de la station des Clots « Bas »

Pour répondre à ces objectifs de recherche, plusieurs grandeurs sont mesurées, en continu et/ou ponctuellement lors de campagnes spécifiques, sur plusieurs sites du bassin. On distingue les mesures de base permettant de connaître les grandeurs classiques des formations superficielles, et les mesures occasionnelles, pour répondre ponctuellement à une question donnée. Depuis 2000, les grandeurs de base consistent en des données :

- **pluviométriques**, enregistrées sur un poste pluviométrique[13] installé en 2001 (Fig. 4.8c), dans la partie médiane du bassin versant du *Faucon*. Depuis l'été 2005, trois postes pluviométriques supplémentaires ont été installés : deux dans le bassin versant de Faucon, en contrebas des crêtes de *Soleil-Bœuf* et de *Champerousse*, et une dans le bassin versant du *Bourget*. Ces postes pluviométriques ont été installés dans l'objectif de pallier l'absence de données dans le bassin de *Barcelonnette* sur les précipitations survenues sur les crêtes (§ 2.3.) ;

- **hydrogéologiques** et **hydrodynamiques**, enregistrées par une station de bilan hydrique localisée au même endroit que le pluviographe et plusieurs capteurs[14] (OTT Orphimèdes). Certains limnigraphes ont été déplacés temporairement pour suivre la dynamique dans un secteur spécifique. En complément, des essais d'infiltrométrie *in-situ* (*Beerkan*, essai au double anneau de *Muntz*) et des expériences de pluies artificielles ont été réalisés en différents endroits du bassin versant ;

- **cinématiques,** obtenues par des sessions ponctuelles de mesures au niveau de chantier et au GPS différentiel. Ces mesures cinématiques ont concerné en particulier le glissement de terrain de *Champerousse.* Deux relevés GPS (en 2002 et en 2004), et huit nivellements ont été effectués de 2001 à 2005. Le dispositif et les résultats seront présentés dans la section consacrée à l'étude détaillée du glissement de *Champerousse.* En parallèle, des mesures de positionnement au GPS des seuils torrentiels ont été effectuées *;*

- **géotechniques**, enregistrées ponctuellement lors de campagnes de forages profonds (Fig. 4.8b) et légers. En Juillet 2001, quatre forages de reconnaissance géologique de type destructif, au wagon-drill, en roto-percution, en diamètre 64 mm ont été réalisés par la société *Hydro-Géotechnique Sud-Est.* Un relevé lithologique et les éventuelles venues d'eau ont été relevés. Les quatre forages ont été équipés en piézomètres PVC (Ø 50 mm) crépinés et emballés dans une chaussette géotextile filtrante. Les caractéristiques des piézomètres sont données dans le tableau 4.6, les sondages sont localisés sur la figure 4.8. Des forages légers complémentaires ont été réalisés avec pénétromètre dynamique 'léger' (type Panda, Maquaire *et al.*, 2002) et un vibro-percuteur à gouges permettant d'identifier la nature du matériau, de prélever des échantillons intacts ou remaniés jusqu'à une profondeur de l'ordre de 9 m et d'installer des tubes piézométriques (Genet et Malet, 1997 ; Maquaire *et al.*, 2002). Ces techniques classiques de prospection par forages géotechniques ponctuels ont été complétées par une prospection géophysique. Les objectifs de ces essais géotechniques étaient d'une part de compléter et d'enrichir la base de données sur les formations superficielles dans le bassin de *Barcelonnette*, et d'autre part d'évaluer l'épaisseur des formations superficielles et leur structure verticale pour *in fine* évaluer des volumes.

---

[13] L'installation de la station n'a pas été facile en raison des conditions environnementales (relief, arbres, etc.) qui rendent difficile le respect absolu des normes de l'*Organisation Mondiale de la Météorologie*. Un *pluviographe automatique à augets basculeurs* a été installé dans un champ en partie médiane, en rive droite. Ce pluviographe non chauffant doit être démonté en décembre et réinstallé en mars ou en avril.

[14] Les conditions d'infiltration de l'eau depuis la surface, les conditions de recharge de la nappe, la possibilité de génération de surpressions interstitielles et les variations de teneur en eau dans la zone non saturée du terrain, sont mesurées à partir de *trois cannes tensiométriques UMS T4* pour la mesure du potentiel hydrique (Malet, 2003), de *deux sondes tubes TDR* (*Trime-IMKO*). Les sondes tensiométriques mesurent des potentiel hydriques compris entre 0 et –12 m (équivalent H_20) ou 0 et –1200 kPa. Les trois tensiomètres n'ont jamais décroché. Le principe de la mesure TDR est détaillé dans Dalton *et al.* (1984) et Topp *et al.* (1980). Associés aux limnigraphes, ces deux dispositifs permettent d'apprécier l'état hydrique de la zone non saturée.

Tableau 4.6 *: Caractéristiques des piézomètres*

Forage	Profondeur du piézomètre (m)	Position de la crépine (m)
Bouzoulières (BOU)	15.40	de 0 à 12
Champerousse (CHAMP)	19.20	de 7.5 à 19.20
Clot_Station (CLST)	12.40	de 9 à 12.40
Clot_Haut (CLH)	10.60	de 6 à 10.60

Les investigations ont été essentiellement concentrées sur les formations superficielles non marneuses. Les formations marneuses ont déjà fait l'objet de très nombreuses caractérisations dans le cadre des travaux menés par notre équipe dans le bassin de *Barcelonnette* (Schmutz, 1995, 2000 ; Klotz, 1998, 1999 ; Schmutz *et al.*, 2000 ; Malet, 2003 ; Maquaire *et al.*, 2001, 2003).

La précision des appareils de mesure a fait l'objet d'un travail approfondi dans le cadre de la thèse de Jean-Philippe Malet (2003). L'examen des données acquises sur le site de *Super-Sauze* pour des périodes de très faible évolution (écart-type à la moyenne) a permis de préciser l'incertitude relative des mesures météo-climatiques et hydrologiques à :

- ± 2.1 hPa pour les sondes tensiométriques *UMS-T4* ;
- ± 17 mm pour les limnigraphes *OTT Orphimèdes*.

Les résultats détaillés des investigations seront présentés et discutés dans le chapitre 5 et dans la section consacrée au glissement de terrain de *Champerousse* (§ 4.3.).

4.2. Morphologie du chenal torrentiel de Faucon de 1998 à 2004

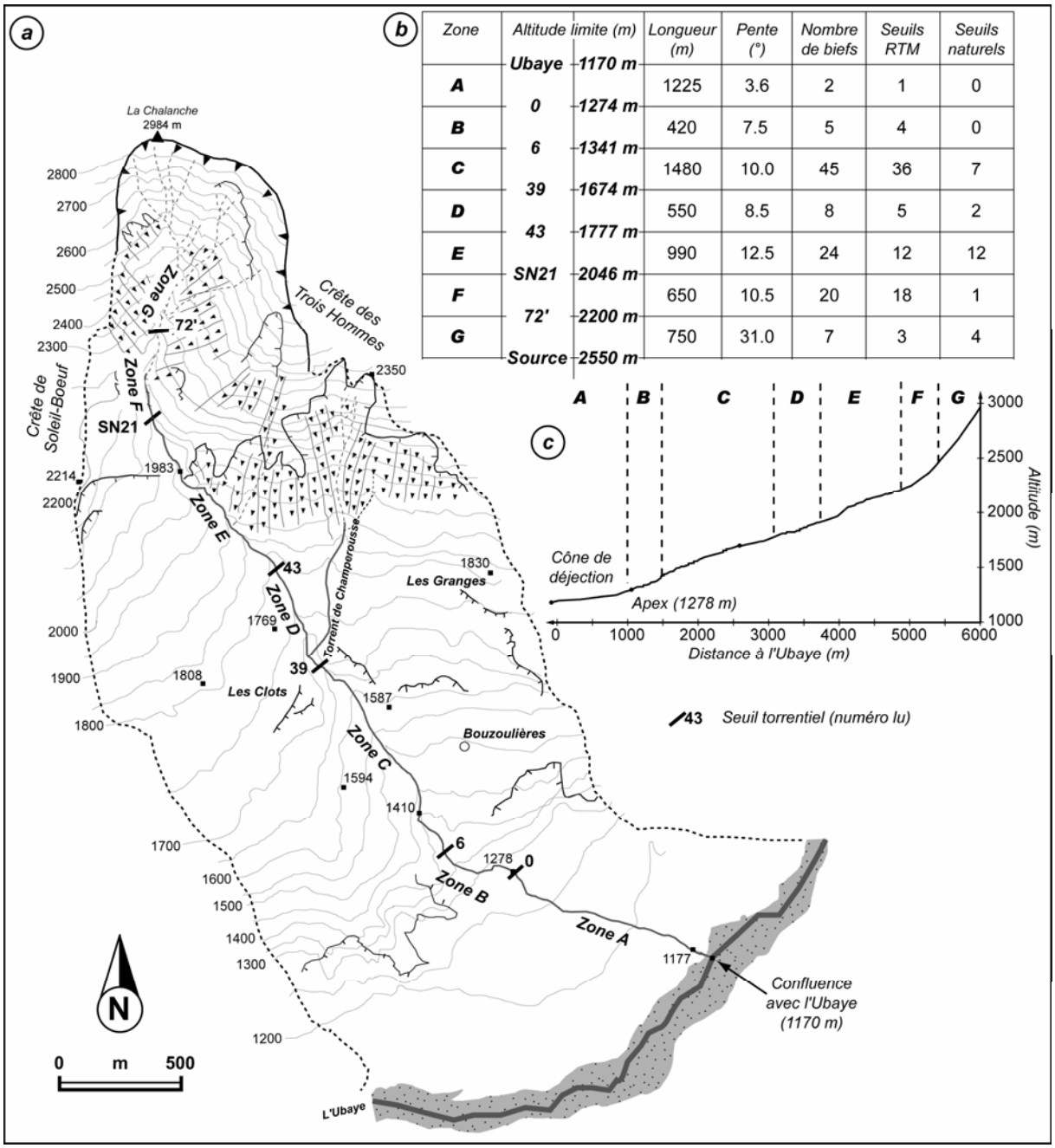
Les mécanismes de déclenchement, de contribution et de dépôt des laves torrentielles ont été étudiés pour le torrent de *Faucon* à travers l'analyse géomorphologique 'fine' du chenal torrentiel après trois événements torrentiels (§ 2.4.2.) : le 19 août 1996, le 5 juin 2002 et le 5 août 2003.

L'observation du chenal torrentiel et sa cartographie tentent de répondre à trois objectifs principaux :

- identifier les zones d'incision et de dépôts pour les trois événements ;
- évaluer les volumes déposés et/ou érodés pour les trois événements ;
- identifier des zones fonctionnelles (déclenchement, contributives) pour de futurs événements.

Pour répondre à ces objectifs, les indices morphologiques de l'activité torrentielle (présence de dépôts torrentiels, traces d'incision/reprise), la dynamique des versants contigus (instabilités) et l'état des seuils torrentiels ont été décrits et cartographiés après chacun des trois événements torrentiels.

Conformément aux principes exposés en § 4.1. et pour faciliter la description, le chenal torrentiel a été découpé en zones sensiblement 'homogènes', sur la base, principalement, des valeurs de pente du profil en long (Fig. 4.9). Ces zones regroupent plusieurs biefs correspondant chacun à une section du profil en long comprise entre deux seuils torrentiels (naturels ou anthropiques). Le bief porte le numéro du seuil situé à l'aval. Les zones sont décrites de l'aval vers l'amont. Le torrent de *Faucon* a été découpé en 111 biefs et celui de *Champerousse* en 43 biefs.



Zone	Altitude limite (m)	Longueur (m)	Pente (°)	Nombre de biefs	Seuils RTM	Seuils naturels
	Ubaye 1170 m					
A		1225	3.6	2	1	0
	0 1274 m					
B		420	7.5	5	4	0
	6 1341 m					
C		1480	10.0	45	36	7
	39 1674 m					
D		550	8.5	8	5	2
	43 1777 m					
E		990	12.5	24	12	12
	SN21 2046 m					
F		650	10.5	20	18	1
	72' 2200 m					
G		750	31.0	7	3	4
	Source 2550 m					

Figure 4.9 *: Localisation et caractéristiques générales des sept zones fonctionnelles du Faucon.*

a : localisation des sept zones dans le bassin versant ;
b : caractéristiques générales des sept zones ;
c : localisation des sept zones sur le profil en long.

Ensuite, chacune de ces zones est caractérisée selon son fonctionnement présumé durant l'événement torrentiel décrit. Nous avons finalement distingué :

- des zones où les phénomènes de dépôts prédominent (dépôt) ;
- des zones où l'incision prédomine (incision) ;
- des zones où l'incision et le dépôt sont observés (incision et dépôt) ;
- des zones sans fonctionnement torrentiel évident (non fonctionnelle).

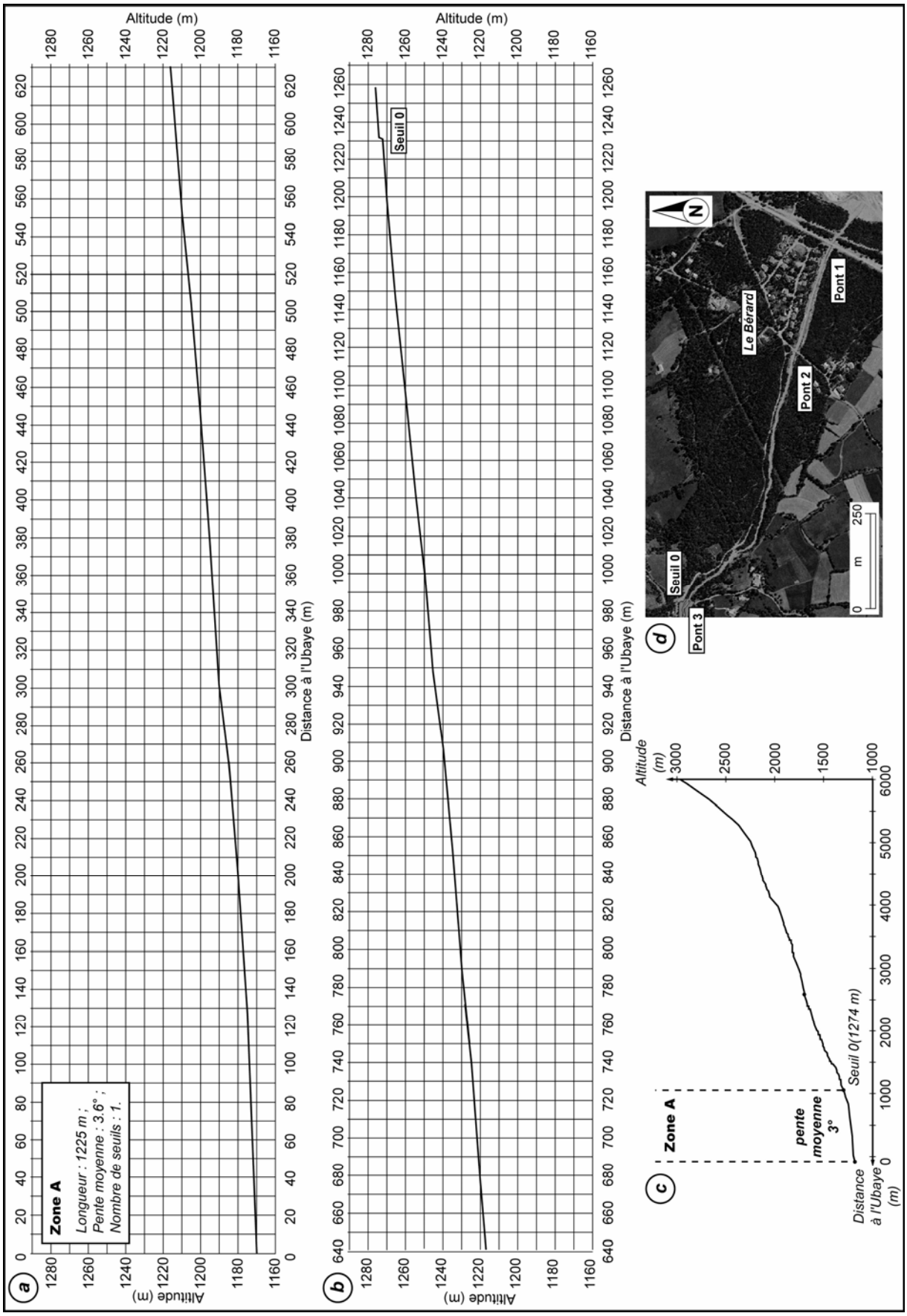


Figure 4.10 *: Profils en long (a et b), localisation (c) et vue aérienne (d) de la zone A du torrent de Faucon.*

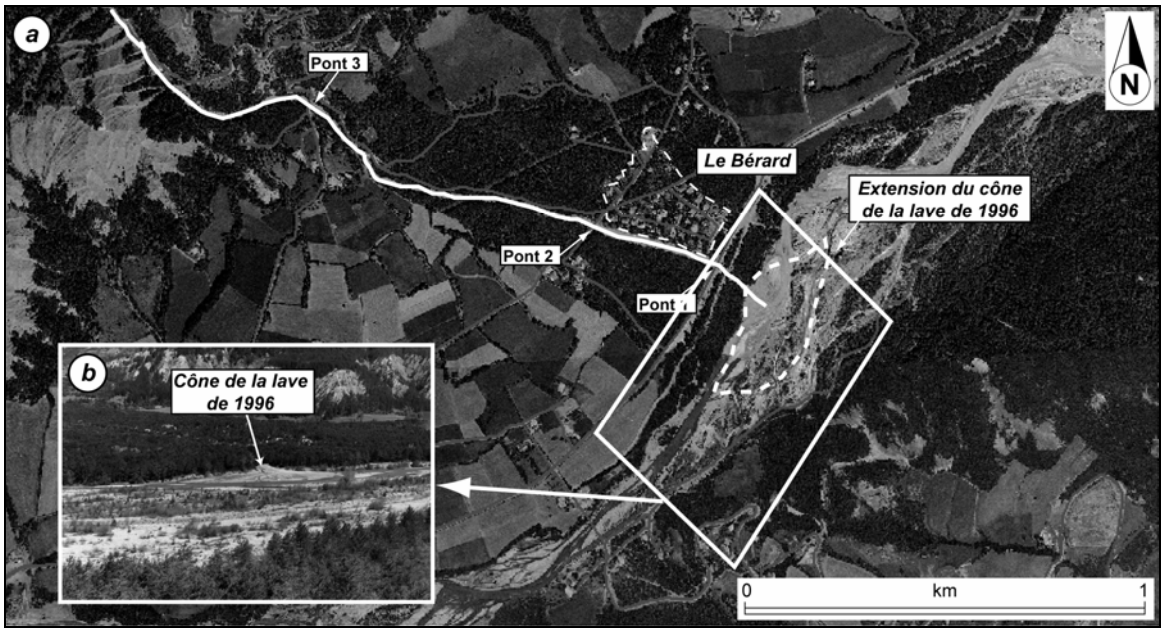


Figure 4.11 *: Vue aérienne de la zone A (a) et vue sur le cône-delta en mai 1997 (b).*

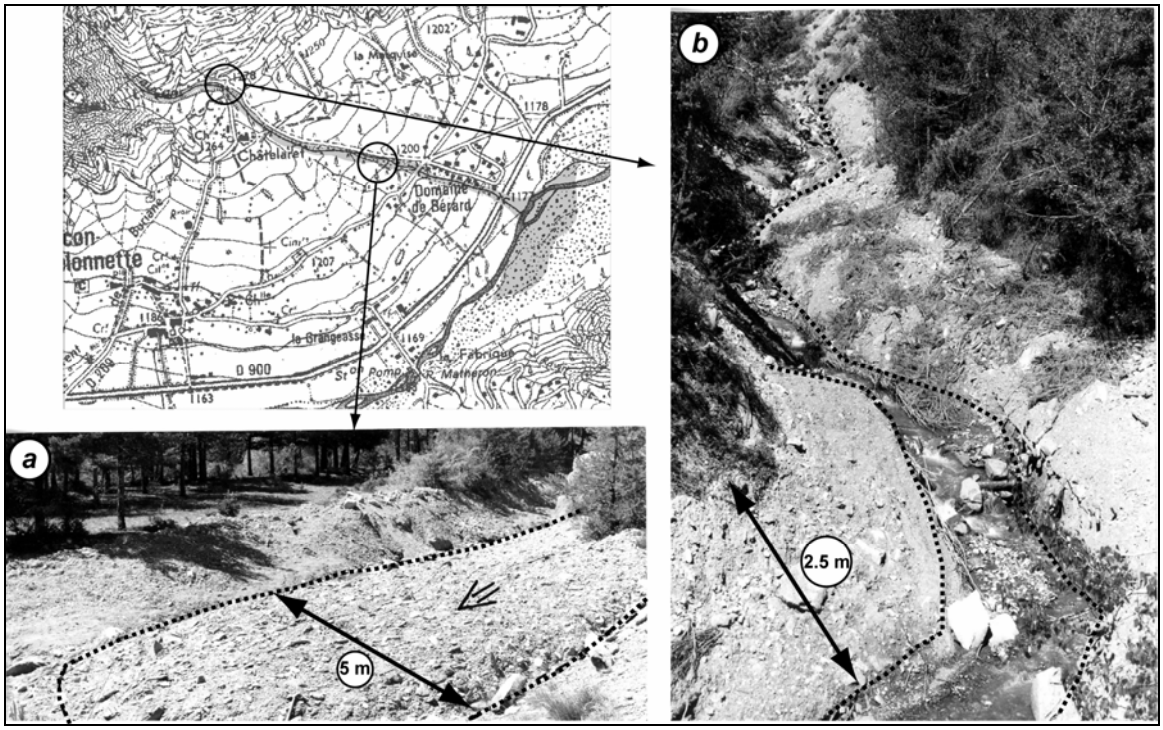


Figure 4.12 : *Morphologie des dépôts de lave torrentielle du 19 août 1996 sur le torrent de Faucon (mai 1997).*

a : vue sur un lobe de lave torrentielle en rive gauche situé entre le pont du Châtelaret et le pont V.C.3 ;
b : vue depuis le pont du Châtelaret sur un dépôt de lave torrentielle dans un virage du torrent de Faucon.

4.2.1. Observations après la lave torrentielle du 19 août 1996

Les premières observations ont été conduites deux ans après l'événement, soit en août 1998, (Pierre et Remaître, 1999 ; Remaître, 2000 ; Remaître *et al.*, 2002), il convient donc de

rester prudent sur les observations présentées ci-après, car des modifications sensibles ont pu intervenir entre temps.

*4.2.1.1. Zone A : **dépôt***

Entre la confluence du torrent de *Faucon* avec l'*Ubaye* et le pont du *Châtelaret (pont 3, situé à l'apex)*, la zone s'étend sur l'ensemble du cône de déjection, sur une longueur de 1225 m et pour une pente moyenne de 3-4° (Fig. 4.10c) ; la pente augmente très faiblement de l'aval vers l'amont (Fig. 4.10a et 10b). La régularité du profil en long sur le cône de déjection témoigne d'un torrent très actif, qui a pu, au cours du temps, lisser la pente de son cône de déjection (Koulinski, 2004). Un seul aménagement torrentiel est présent : une digue en rive gauche du torrent. Cette digue, haute de 2 m, s'étend depuis le pont du V.C.3 (pont 2) jusqu'au pont de la R.D.900 (pont 1). Elle protège le lotissement du *Bérard* (Fig. 4.11a).

A la confluence avec le torrent de l'*Ubaye*, le torrent a formé un véritable cône-delta qui a repoussé l'*Ubaye* vers le sud sur plus de 100 m (Fig. 4.11b). Les dimensions de ce cône atteignaient en mai 1997, 250 m de large, pour une longueur de 150 m environ. En septembre 1998, elles n'étaient plus que de 200 m de large pour une longueur d'une centaine de mètres. Ce cône est composé majoritairement de matériaux fins indurés ennoyant des matériaux grossiers (blocailles). La largeur du torrent varie de 8 et 12 m. La profondeur du chenal augmente régulièrement de l'aval vers l'amont : elle est de l'ordre de 1 m à la confluence avec l'*Ubaye*, de 2 m au niveau du pont V.C.3 (pont 2, Fig. 4.10d), et de 4 m au droit du *Châtelaret* (pont 3). Le profil en travers est un profil en U sur la majeure partie de la zone, avec tout de même une dissymétrie qui se marque progressivement vers l'amont à partir de 1300 m d'altitude pour atteindre en partie supérieure : 3° en rive droite et 17° en rive gauche

L'ensemble de cette zone est recouvert par les alluvions torrentielles du torrent de *Faucon* et de l'*Ubaye*. L'épaisseur de ces alluvions varie entre 10 et 20 m (Miramont, 1998). En limite amont de la zone, les premiers affleurements de marnes noires apparaissent.

Des dépôts torrentiels (Type A) encombrent une bonne partie du chenal de cette zone A. Leurs épaisseurs varient entre 1 et 2 m. Des levées, incisées sur une hauteur de 1 à 1.50 m, sont observées de part et d'autre du lit vif.

Plusieurs traces, encore bien visibles deux années après l'événement, attestent du passage de la lave torrentielle de 1996 :

- sous le pont de la R.D.900, des traces de boues retrouvées sous le tablier du pont et sur la rambarde montrent que l'écoulement a débordé le pont sur 20 à 40 cm environ ;

- en rive droite, à l'aval du pont V.C.3., des dépôts indurés de laves torrentielles (Type C), épais de 10 à 30 cm sur une longueur d'une trentaine de mètres environ ;

- en rive gauche, entre le pont V.C.3. et le pont du *Châtelaret*, un dépôt de débordement de lave torrentielle (Type C) s'étend du près de 150 m (Fig. 4.12a). Sa terminaison aval prend la forme d'un lobe épais de 0.50 à 0.75 m. Il s'étend latéralement jusqu'à la lisière du chemin qui longe le torrent ;

- sous le pont du *Châtelaret*, les dépôts de laves (Type A) présentent une morphologie typique de 'virage' (Fig. 4.12b). Les dépôts sont situés de part et d'autre du chenal, sous la forme de levées particulièrement larges (entre 3 et 6 m de large). Les levées situées à l'extérieur du virage sont plus hautes que celles en rive opposée (phénomène de super-élévation, Johnson, 1984 ; Scott, 1988).

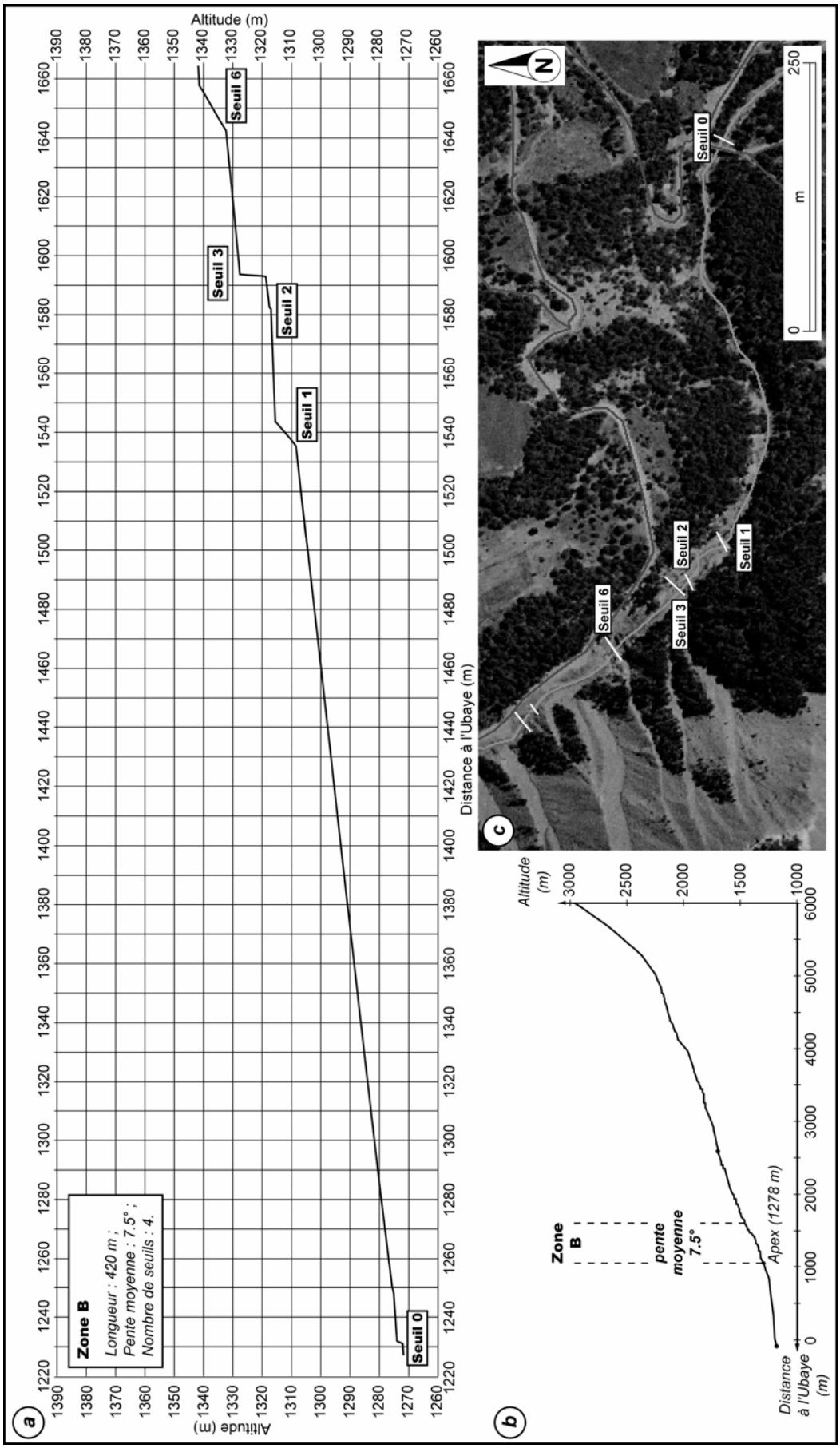


Figure 4.13 *: Profils en long (a), localisation (b) et vue aérienne (c) de la zone B du torrent de Faucon.*

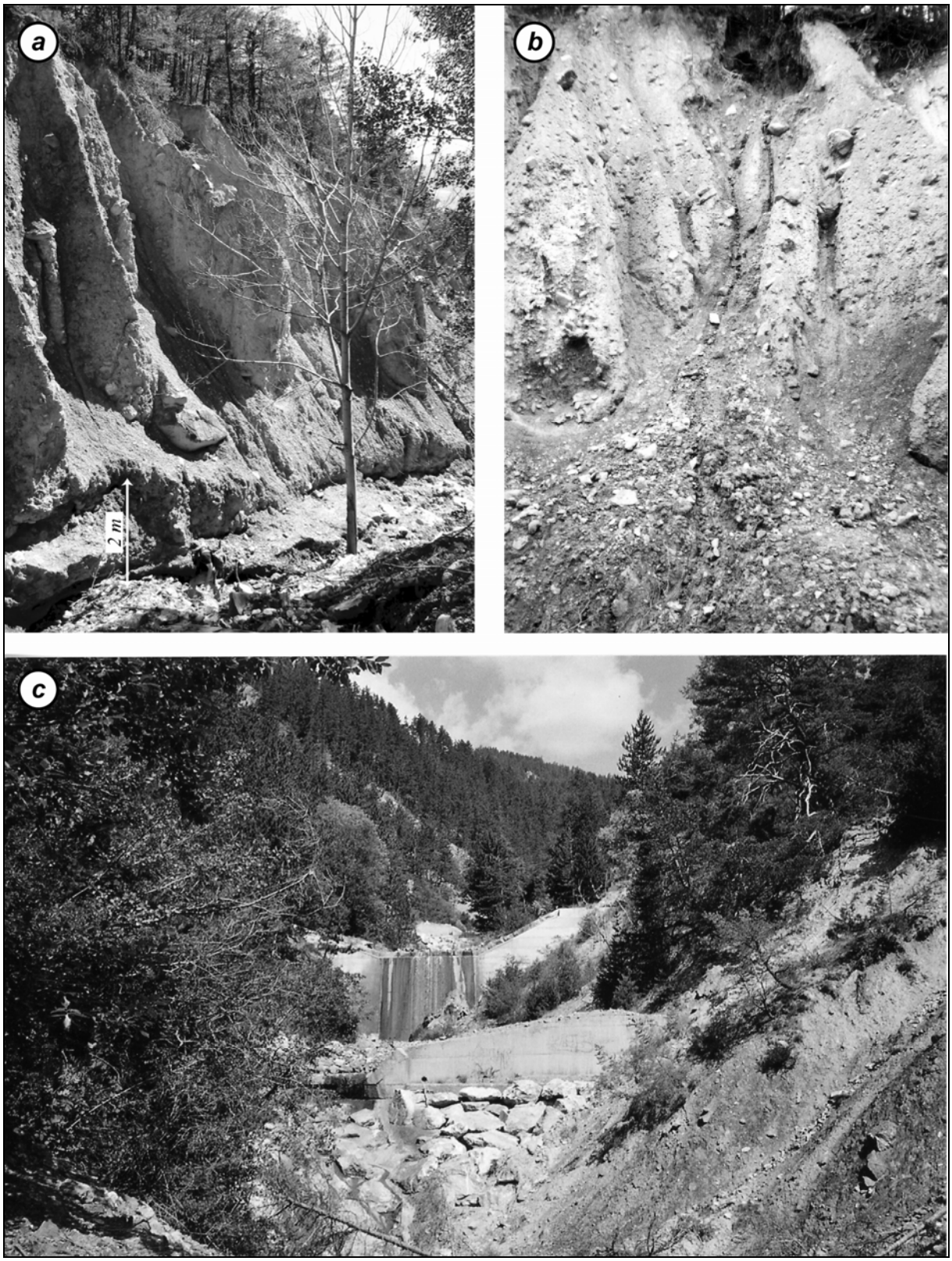


Figure 4.14 *: Vues sur la morphologie du chenal torrentiel dans le secteur B.*

a : vue les demoiselles coiffées en rive gauche ;
b : vue une demoiselle coiffée qui s'est effondrée dans le torrent (à noter la morphologie caractéristique de coulée avec une cicatrice d'arrachement, un petit chenal et un petit cône) ;
c : vue sur les seuils 1 et 3).

4.2.1.2. Zone B : ***dépôt***

Cette courte zone (420 m de long) est composée de quatre biefs et quatre seuils torrentiels anthropiques (Fig. 4.13). Excepté le seuil 2 (enfoui), tous les seuils en béton sont en bon état (Fig. 4.14c). Notons que le seuil 1 est armé d'un tablier en enrochement.

La pente moyenne est de l'ordre de 7.5° et varie entre 4° et 10°. Les pentes du profil en long sont relativement régulières. La morphologie du chenal torrentiel est caractérisée par un profil en U, parfois dissymétrique. Cette dissymétrie s'accentue vers l'amont. La largeur du torrent varie entre 15 et 25 m.

Dans ce secteur de transition entre le cône torrentiel et le chenal, les formations superficielles sont principalement des marnes noires altérées et des formations morainiques. Dans la partie inférieure de cette zone (entre le seuil 0 et le seuil 1), ces formations glaciaires présentent une morphologie en demoiselles coiffées (Fig. 4.14a). Certaines d'entre elles sont particulièrement instables avec petits glissements superficiels (Fig. 4.14b).

Des dépôts de laves torrentielles (Type A) peuvent être observés. Ces dépôts prennent la forme de lobes peu épais situés sur les deux rives du torrent. Entre les deux, le lit vif s'est incisé sur quelques centimètres. Les ailes des seuils sont toutes remplies par les dépôts de laves torrentielles, certaines jusqu'au gabarit (seuil 3 notamment).

4.2.1.3. Zone C : ***dépôt et incision***

Ce long secteur (un peu moins de 1500 m) est composé de 45 biefs. La pente moyenne est de l'ordre de 10° et varie entre 4° et 18°. Les pentes du profil en long sont relativement irrégulières pour chaque bief, avec une succession de pentes fortes et de pentes faibles (Fig. 4.15 et 4.16). Les pentes les plus fortes sont concentrées dans la partie médiane de cette zone. La morphologie du chenal torrentiel, à l'image de la pente moyenne du torrent est caractérisée par une certaine irrégularité.

Dans l**a partie basse**, la largeur du torrent varie entre 6 m au seuil 7 et 35 m au bief 8. Dans les secteurs les plus larges, un lit mineur (6 à 12 m) et un lit majeur (20 à 30 m) peuvent être distingués. L'irrégularité de la largeur du chenal est à mettre en relation avec la morphologie des berges et des versants liée aux marnes noires en rive droite (Fig. 4.17). Sur cette rive, un réseau complexe de ravines parallèles et coalescentes s'est développé entre 1300 et 1500 m d'altitude selon une organisation en 'patte d'oie'. Ces ravines sont orientées perpendiculairement (ouest-est) au chenal torrentiel. D'une longueur de 150 à 250 m, six interfluves (échines) quasiment nus, aigus et très pentus (> 30°) sont régulièrement espacées de 50 m environ. Ils individualisent des ravines profondes qui s'étendent sur une pente de 15° environ Quand la rive droite correspond au pied d'une échine, le torrent est étroit car il est contraint par l'échine et ne peut se développer latéralement. Quand la rive droite correspond au pied d'une ravine, le torrent est plus large, car il correspond à la large zone (30 à 40 m) de déjection de la ravine.

Les parties médianes et hautes (entre les seuils 10 et 39, Fig. 4.15) correspondent au secteur du profil en long le plus pentu. La morphologie du chenal présente un profil en V avec parfois une dissymétrie des versants. Le chenal étroit (entre 4 et 5 m de largeur) évolue entre des versants relativement raides : 16 à 24° pour la rive droite, 22 à 31° pour la rive gauche. Profondément encaissé (entre 10 et 15 m), le torrent s'écoule dans une 'gorge' où les marnes noires et les formations morainiques constituent la majorité des affleurements (Fig. 4.18). Les versants raides sont soumis à de très nombreux petits glissements superficiels dont les matériaux encombrent le chenal par endroit. Ces glissements affectent les deux rives. (Fig. 4.19). De nombreux blocs encombrent le chenal, piégeant les débris végétaux (troncs et branchages) qui forment de petits embâcles.

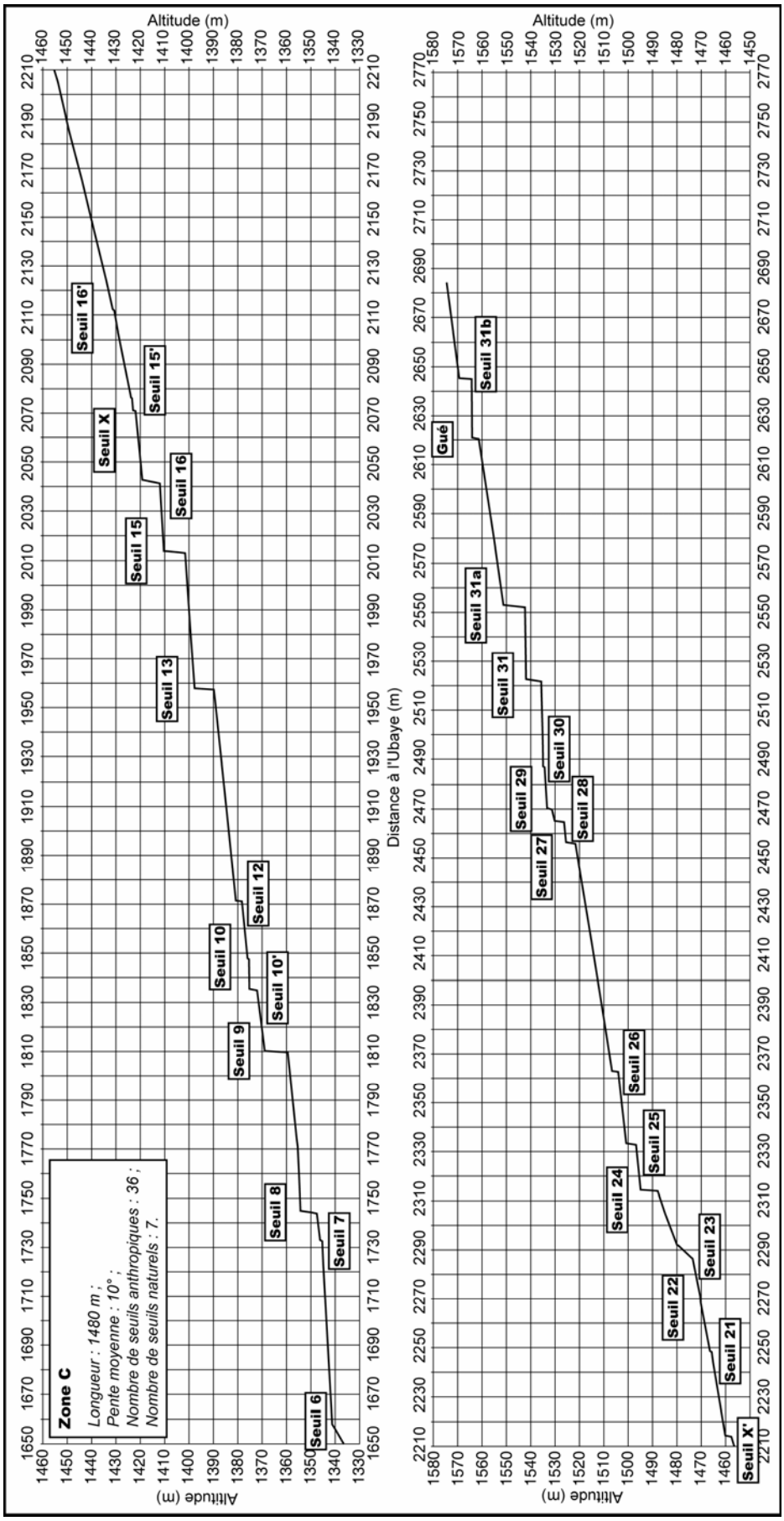


Figure 4.15 *: Profils en long de la zone C du Faucon du seuil 6 au seuil 31b.*

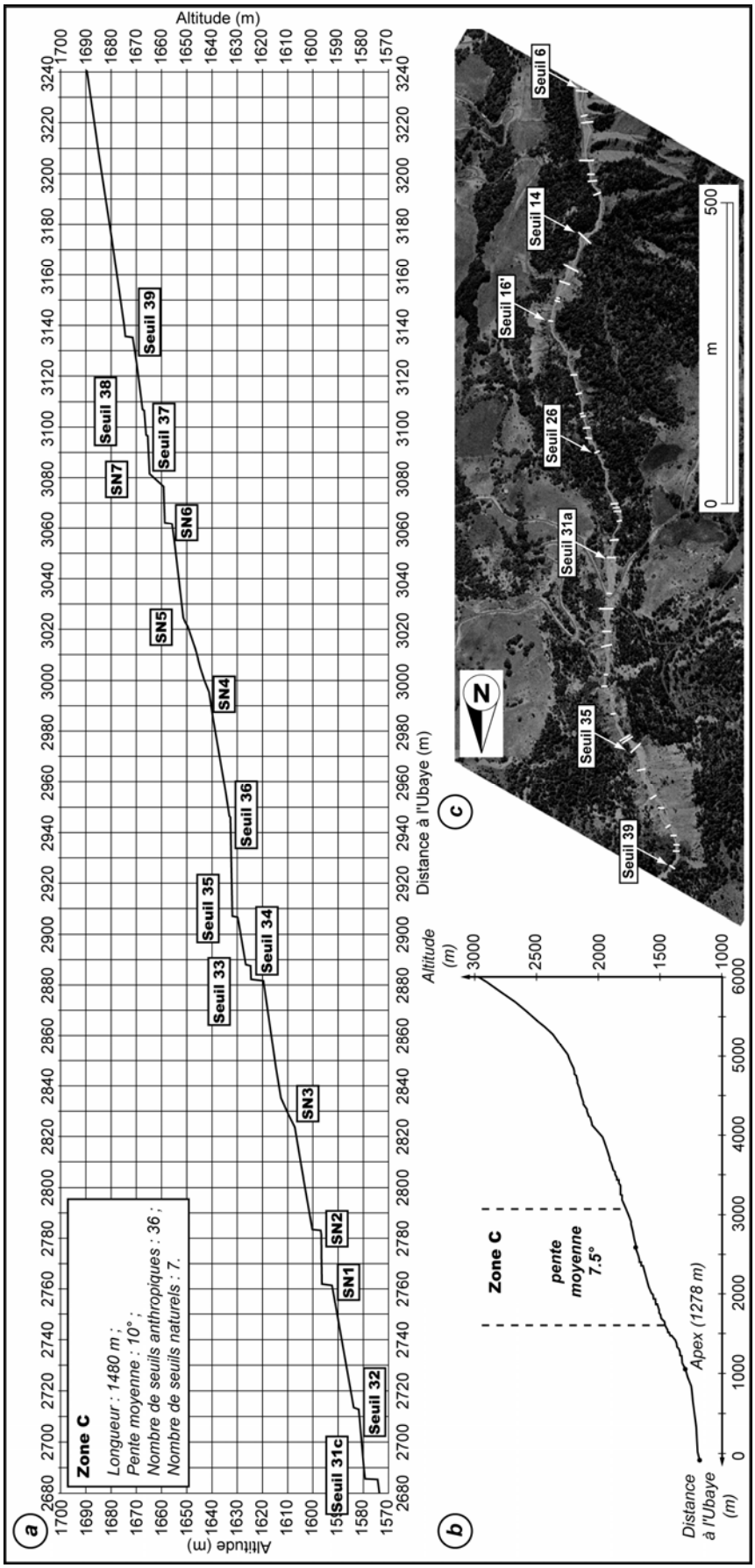


Figure 4.16 *: Profil en long du seuil 31c au seuil 39 (a), localisation (b) et vue aérienne (c) de la zone C du torrent de Faucon.*

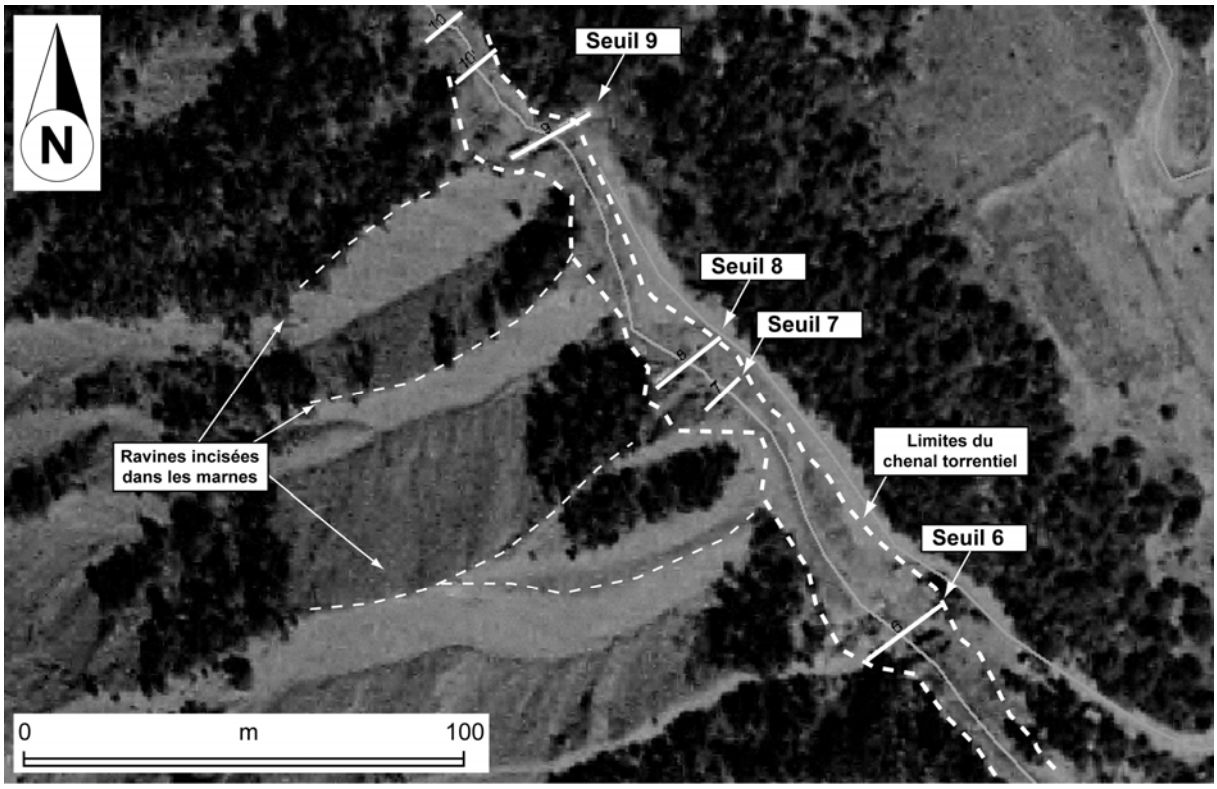


Figure 4.17 *: Morphologie de la partie basse de la zone C (entre les seuils 6 et 10).*

Figure 4.18 *: Vue sur le chenal torrentiel de Faucon en aval du seuil 15b (septembre 1998).*

Le lit torrentiel est encaissé entre 10 et 15 m dans les marnes noires recouvertes en partie haute par des formations morainiques. En trait blanc, les contours de l'aile du seuil 15b en maçonnerie.

36 seuils anthropiques et 7 seuils naturels jalonnent le profil. Sur ces 36 seuils anthropiques, 15 sont en bon état, 9 sont abîmés et 12 sont détruits ou enfouis. Tous les seuils détruits se concentrent dans la partie médiane de la zone : le sommet des vestiges des ailes est parfois perché à près de 10 m au dessus du niveau de base actuel du torrent. (Fig. 4.18).

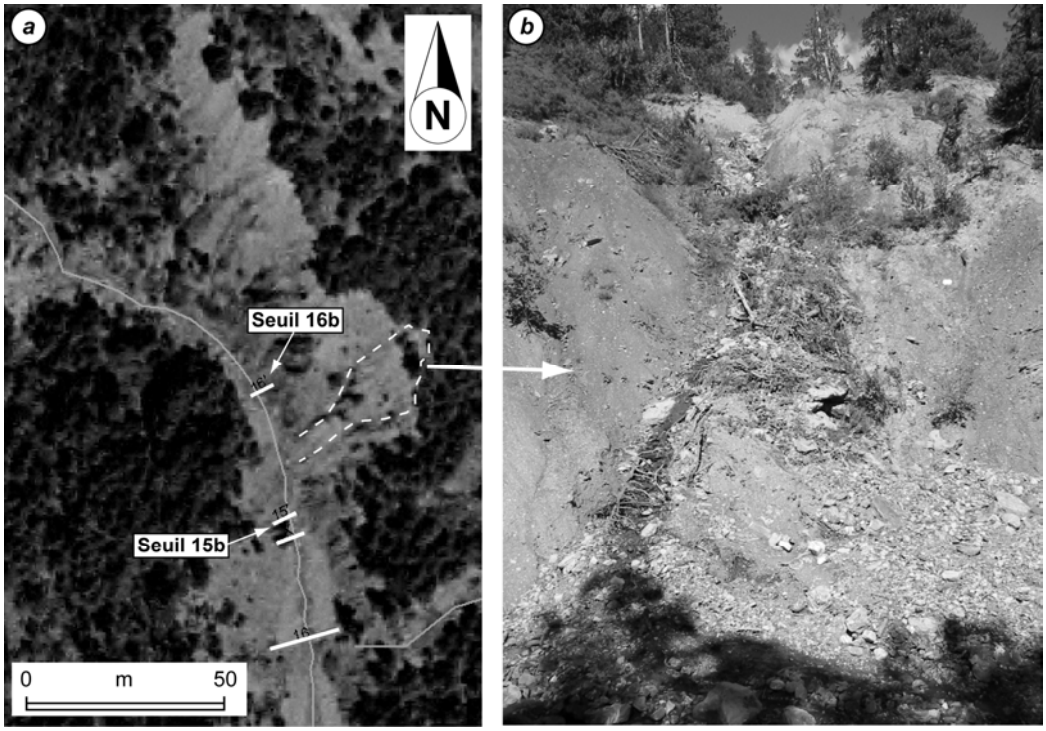


Figure 4.19 *: Localisation (a) et vue sur un glissement de terrain superficiel en rive gauche à l'amont du seuil 15b (septembre 1998).*

Figure 4.20 *: vue sur un embâcle en amont du seuil 22 (septembre 98).*

De nombreuses traces du passage de la lave torrentielle de 1996 peuvent être observées :

- entre les seuils 7 (1347 m) et 16 (1420 m), **des lobes de lave** (Type A), peu épais, longs d'une dizaine de mètres et situés sur les deux rives sont incisés par le lit vif ;
- entre le seuil 16 (1420 m) et le seuil 23 (1480 m), **les traces d'incision** (1 et 2 m de profondeur) sont relativement importantes dans le lit. Certains secteurs sont encombrés par de nombreux embâcles (entre les seuils 21 et 22 notamment, Fig. 4.20). Ce secteur d'incision est caractérisé par le très mauvais état des seuils et par un lit étroit et à pente forte ;

- entre les seuils 29 (1533 m) et le Gué (1565 m), et entre les seuils 34 (1627 m) et 36 (1635 m), **des dépôts de laves** (Type B), peu épais, recouvrent uniformément l'ensemble du chenal torrentiel ; un lit vif étroit (moins d'un mètre) et peu encaissé (de quelques cm) incise les dépôts. Les dépôts sont très indurés. Des traces de sapement sont observées sur les rives extérieures, notamment à l'amont du seuil 34.

*4.2.1.4. Zone D : **dépôt***

La zone D s'étend sur près de 550 m de long pour une pente moyenne de 8.5° (Fig. 4.22). La pente du profil en long est régulière, elle varie entre 6 et 11° en augmentant régulièrement vers l'amont. La morphologie du chenal torrentiel est homogène, elle est caractérisée par des profils transversaux en U. Le chenal est large avec un lit mineur dont la largeur varie entre 2 et 6 m, et un lit majeur dont la largeur varie entre 15 et 25 m. Les versants sont relativement symétriques, avec des pentes variant entre 11 et 31° en rive droite, et entre 15 et 35° en rive gauche. L'encaissement du chenal varie entre 50 et 80 m. Les marnes noires dénudées sont en partie ravinées, et de nombreux petits glissements superficiels affectent les parties basses des versants. En rive gauche, le torrent de Faucon reçoit son affluent principal, le torrent de *Champerousse*. La morphologie du chenal de *Champerousse* sera présentée plus loin.

Sept seuils torrentiels sont dénombrés dont deux seuils naturels. Les seuils 39 et 40 sont en bon état et les autres sont enfouis ou détruits. Le seuil 43 est complètement éventré : les vestiges de ces ailes sont perchées 5 à 6 m au dessus du torrent (Fig. 4.21).

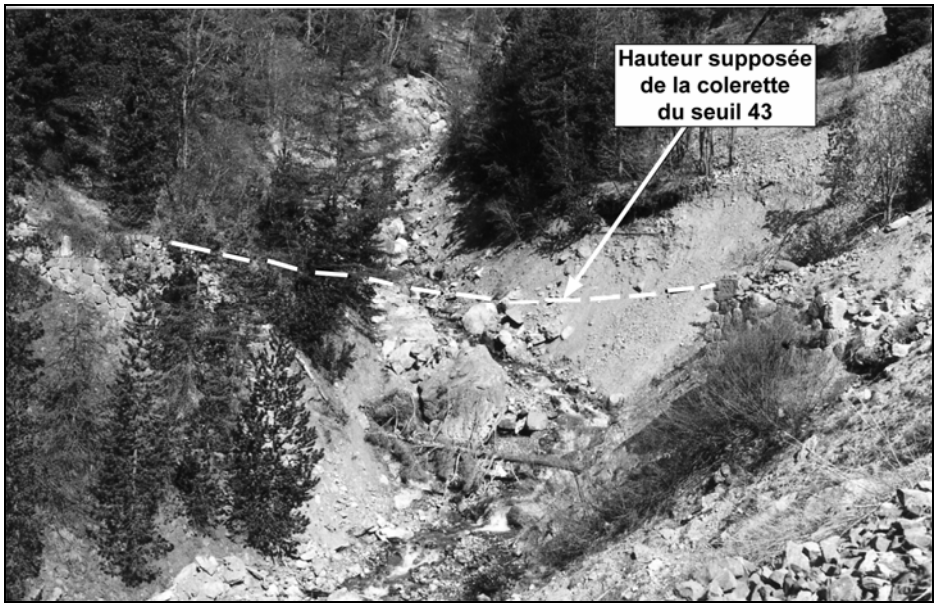


Figure 4.21 *: Vue sur les vestiges du seuil 43 (mai 1997).*

Les deux seuils naturels s'allongent sur plusieurs dizaines de mètres et correspondent à un empilement d'un mélange de blocs de tailles diverses plus ou moins recouverts de débris végétaux et de matériaux fins.

Les traces du passage de lave de 1996 sont particulièrement nettes entre le seuil 39 (1675 m) et le seuil 40 (1710 m). Dans la zone de confluence avec le torrent de *Champerousse*, un important dépôt de lave (Type A) recouvre la rive droite (extérieure) du torrent (Fig. 4.23). Le dépôt (100 m de long, pour une dizaine de m de large au maximum) est induré et prend la forme d'une levée haute de 2 à 3 m. Trois niveaux successifs sont distingués qui correspondent, peut être, à trois vagues de laves successives.

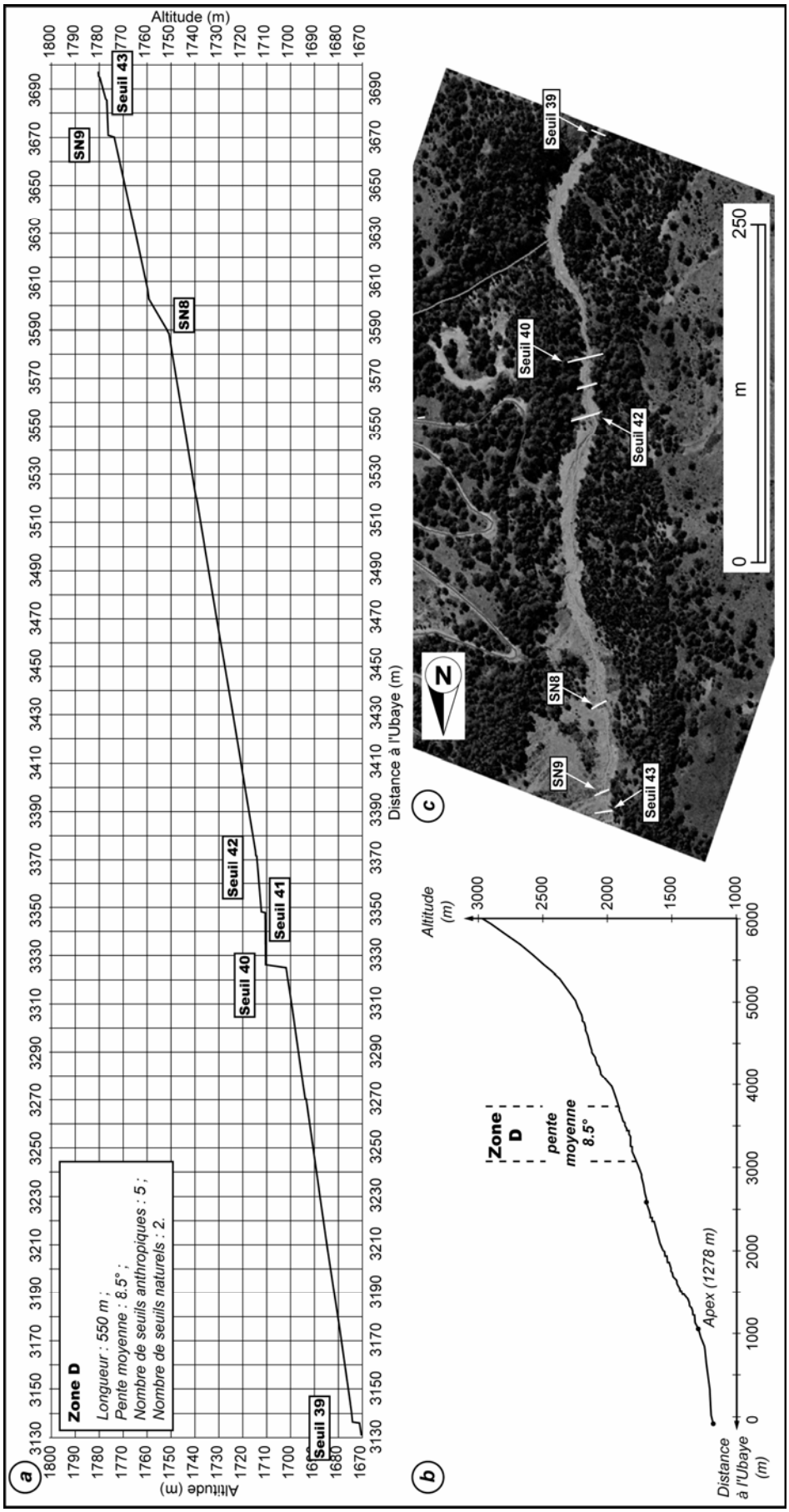


Figure 4.22 *: Profil en long (a), localisation (b) et vue aérienne (c) de la zone D du torrent de Faucon.*

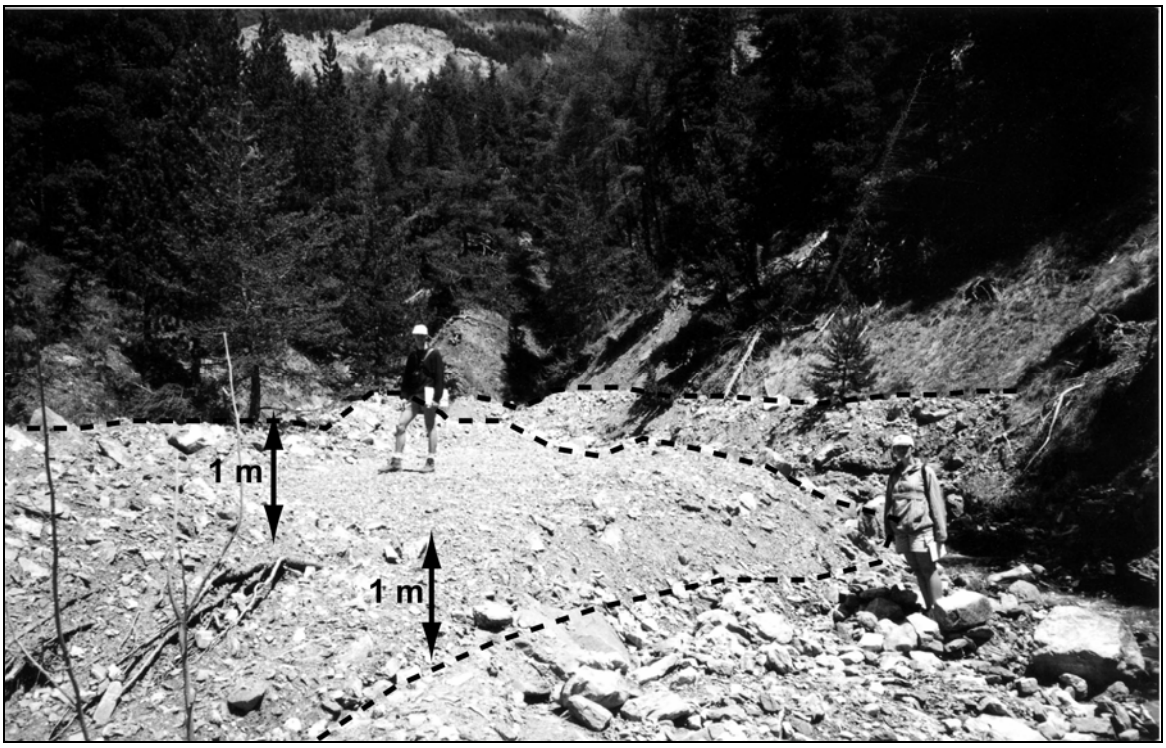


Figure 4.23 *: Vue sur un dépôt de lave torrentielle, en amont du seuil 39 (mai 1997).*

4.2.1.5. Zone E : ***dépôt et incision***

La zone E s'étend sur 1000 m environ pour une pente du lit de 12° en moyenne. Cette pente augmente progressivement, de l'aval vers l'amont, pour atteindre 17° environ aux seuils naturels SN14 à SN16 (barres calcaires et de flyschs). Sur 80 m de longueur pour 25 m de hauteur, cette zone rocheuse fait la transition entre deux types de profils

Le **premier type de profil** s'étend dans **la partie basse** de la zone E, entre les seuils 43 et SN14. C'est un profil en U, où la pente du lit est faible (entre 1 et 7°). Le chenal torrentiel est large ; la largeur du lit mineur varie entre 5 et 12 m, et le lit majeur entre 15 et 25 m environ. Le fond du lit est encombré par de nombreux dépôts, particulièrement à l'aval de SN14 où le chenal est comblé par des dépôts sur près de 4 m d'épaisseur. Les versants sont dissymétriques : la pente en rive droite varie entre 9 et 35° et celle de rive gauche entre 10 et 27°. Dans les 10 premiers biefs, les versants sont entaillés dans les marnes noires dénudées. Des glissements de terrain, affectant indifféremment les formations morainiques et les marnes, déstabilisent les berges dans quelques secteurs. Un glissement de terrain important affecte les versants en rive gauche, entre les seuils SN11 et 47 (Fig. 4.25) : le glissement de terrain de *Champerousse*.

En partie haute, le deuxième type de profil concerne les biefs situés à l'amont de SN14. Le profil transversal est dans la majorité des cas en V. Le lit torrentiel est étroit (4-7 m), et sa pente longitudinale varie entre 11 et 17°. Les versants sont symétriques et fortement inclinés (entre 25 et 35°). Le chenal torrentiel prend parfois la morphologie d'un ravin fortement encaissé, où les berges et les versants présentent une multitude de traces d'érosion ou d'instabilités. Ceci est particulièrement vrai entre les seuils 54 et SN21. De SN14 à SN16, le torrent s'écoule directement sur la roche mère. A l'amont de SN16, le lit est constitué par un mélange de matériaux torrentiels et de paquets glissés provenant des versants contigus. Ces matériaux, très riches en matériaux grossiers, comblent le torrent sur près de 200 m.

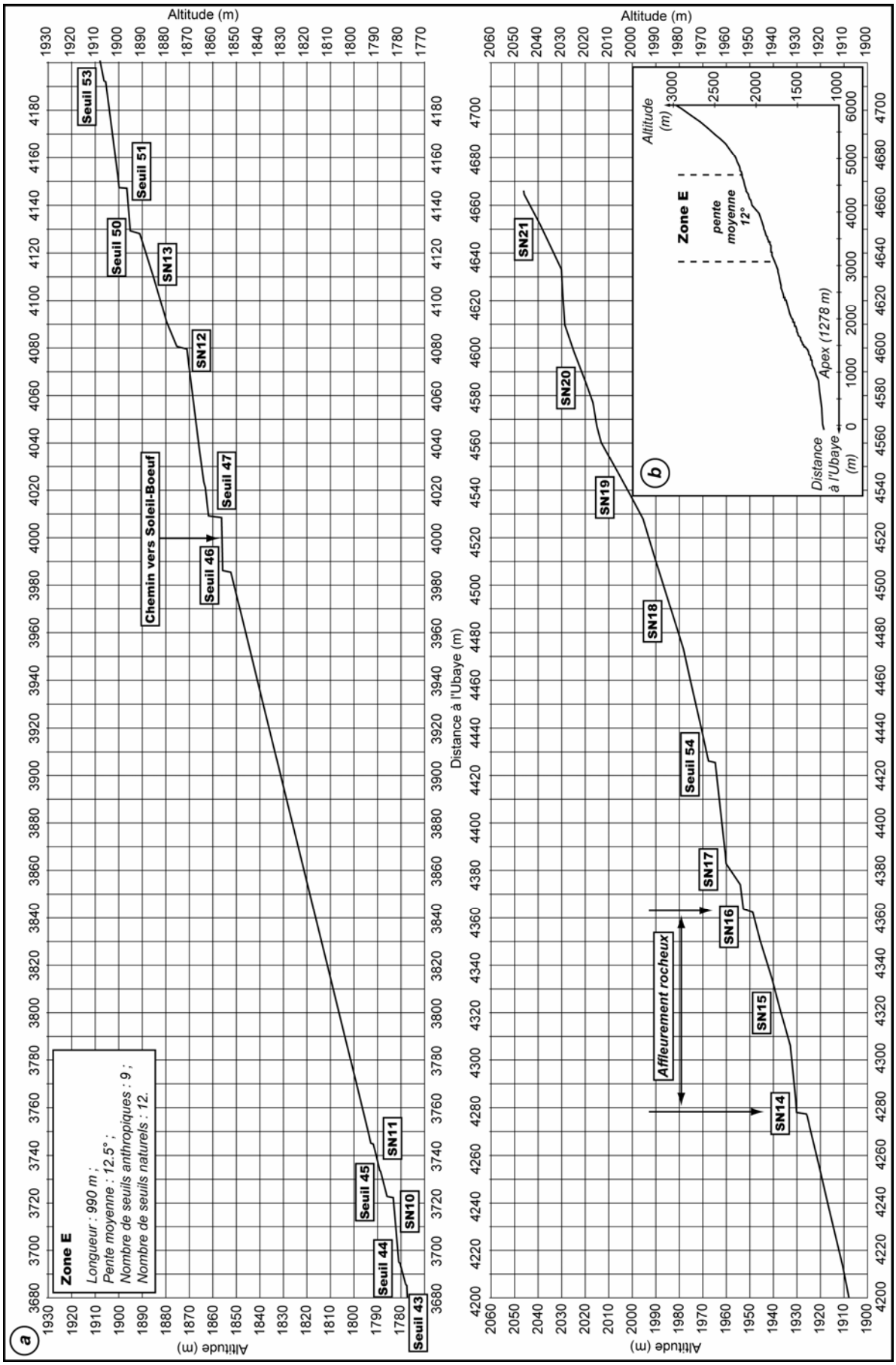


Figure 4.24 *: Profil en long (a) et localisation (b) de la zone E du torrent de Faucon.*

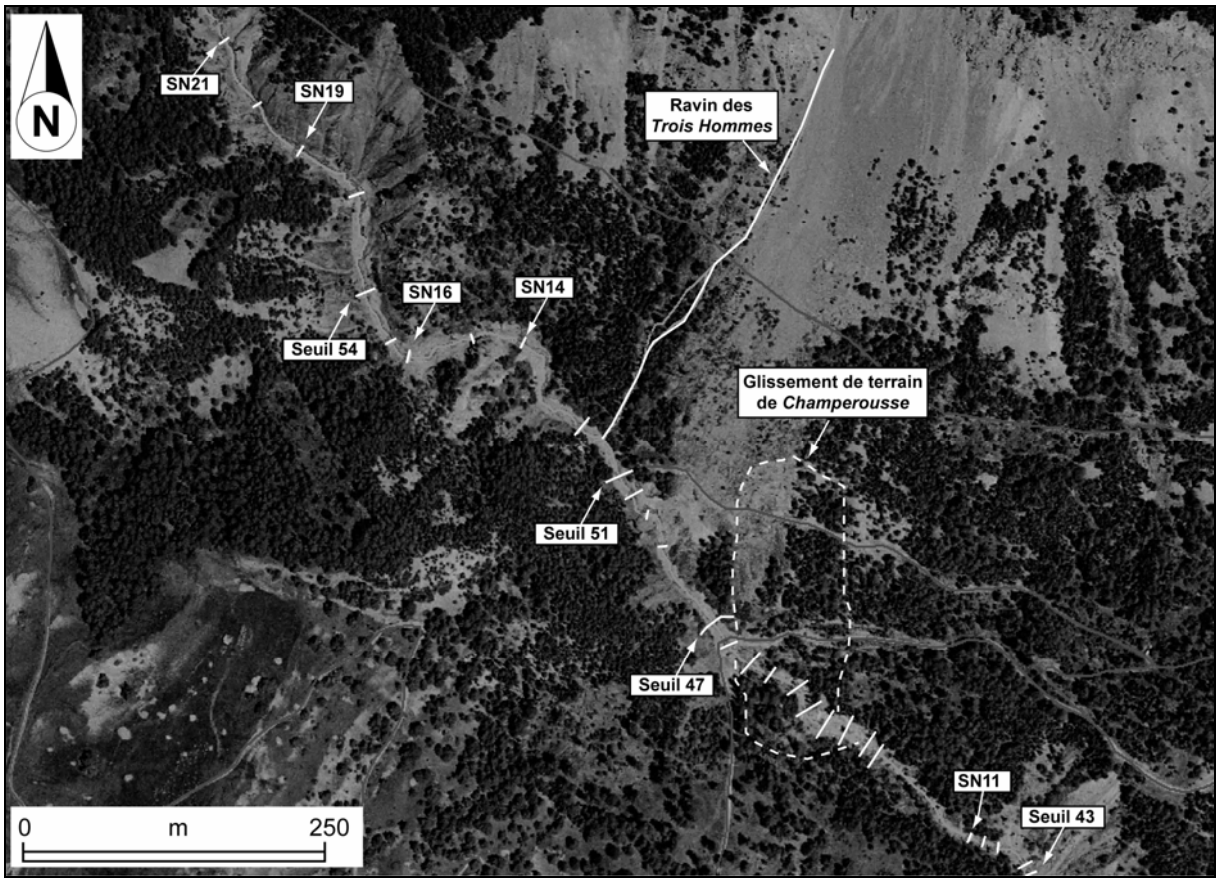


Figure 4.25 *: Vue aérienne de la zone E du torrent de Faucon.*

Entre SN19 et SN21 un important glissement de terrain affecte la rive gauche du torrent de *Faucon*. Il se développe dans les derniers affleurements de marnes et de moraines (Fig. 4.26). Profond de 2 à 4 m, le glissement de terrain s'étend sur un peu moins de 100 m ; la dénivelé entre la zone d'arrachement et la zone d'accumulation au pied du torrent est de 60 m environ. La largeur du glissement à sa base est de 60 m environ. Il prend place dans la partie inférieure d'un couloir d'avalanche qui prend naissance en contrebas de la crête des *Trois Hommes*. **De nombreux couloirs d'avalanche ou ravins intermittents** parcourent les pentes raides armées par les nappes de charriage ; certains de ces couloirs parviennent à rejoindre le chenal torrentiel du torrent de *Faucon*. C'est notamment le cas en rive gauche du torrent à l'aval immédiat de SN14.

Neuf seuils anthropiques, et douze seuils naturels arment le chenal dans la zone E. L'état des seuils anthropiques est satisfaisant dans la partie inférieure de la zone, 7 seuils sur les 9 sont en bon état. Les seuils anthropiques situés plus en amont (54 et 56) de la zone sont eux détruit. Il ne subsiste que les vestiges des ailes qui sont perchées à près de 8 m au dessus du torrent. Les seuils naturels correspondent à des affleurements rocheux des nappes de charriage. Ils sont associés dans la très grande majorité des cas à une morphologie de ravin ou le chenal est particulièrement encaissé.

Les traces de la lave de 1996 sont nombreuses, surtout dans les parties basses et médianes de ce secteur E :

- Entre les seuils 45 (1790 m) et 47 (1860 m), les traces d'incision sont relativement marquées sous la forme d'un sapement important des rives extérieures ;
- du seuil 47 (1860 m) au seuil 54 (1967 m), le lit est faiblement incisé par endroit. Néanmoins il est difficile de savoir si cette incision est due à la lave torrentielle proprement dite ou à l'activité 'normale' du torrent.

- Entre les seuils 51 (1900 m) et SN14 (1927 m), le lit du torrent est encombré par de nombreux dépôts (Type B) sur une épaisseur considérable (entre 2 et 4 m environ). Ces dépôts prennent la forme de trois terrasses successives situées sur les deux rives (Fig. 4.27). Ces dépôts sont séparés entre eux par le lit vif du torrent. La terrasse en rive gauche est beaucoup plus large (12 à 15 m) que celle située en rive droite (1 à 3 m). Ces dépôts sont composés de matériaux torrentiels grossiers (> à 2 mm) emballés dans une matrice.

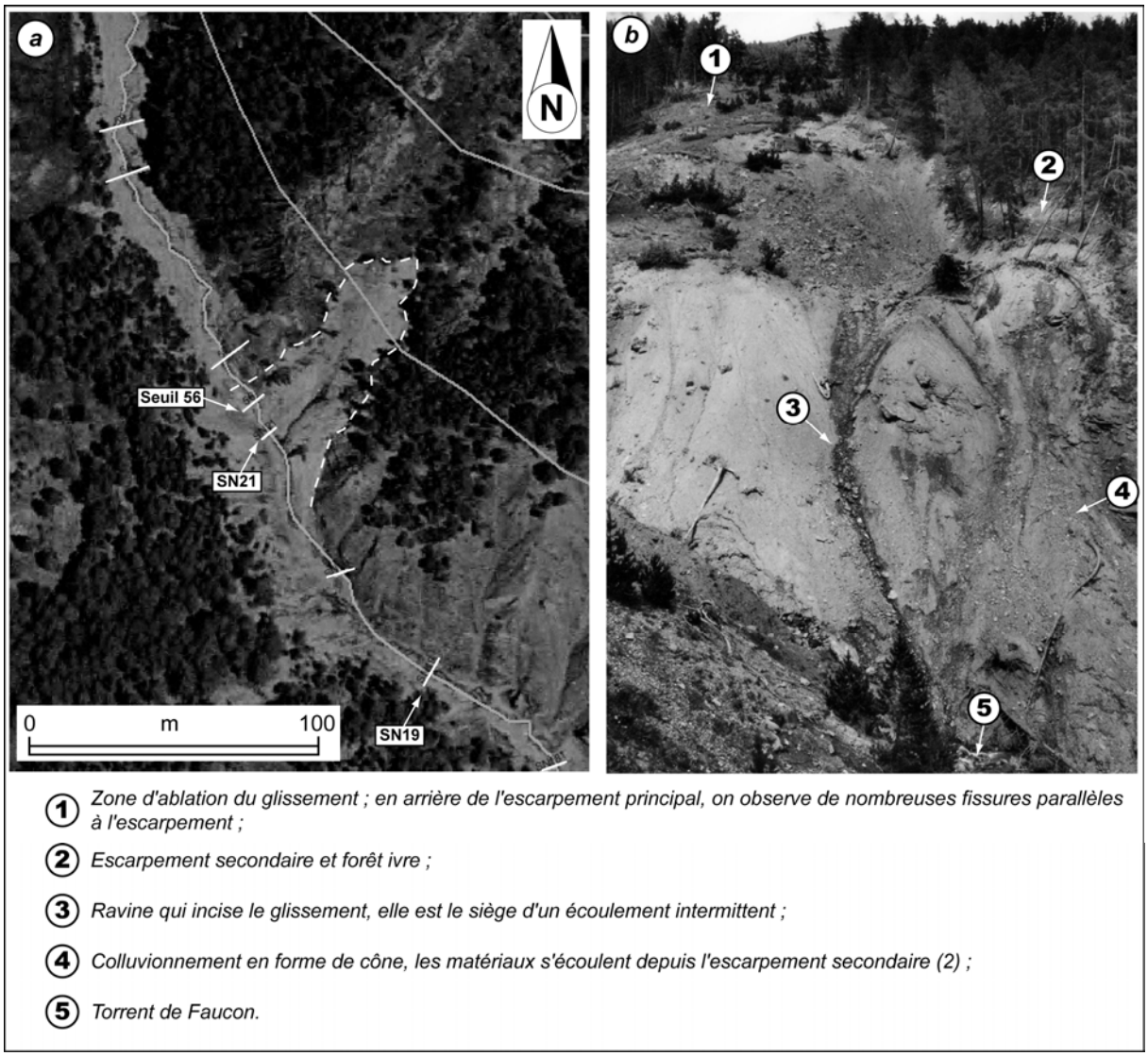


Figure 4.26 *: Le glissement des Trois Hommes.*

a : vue aérienne du glissement ;
b : vue depuis le versant opposé sur le glissement (septembre 1998).

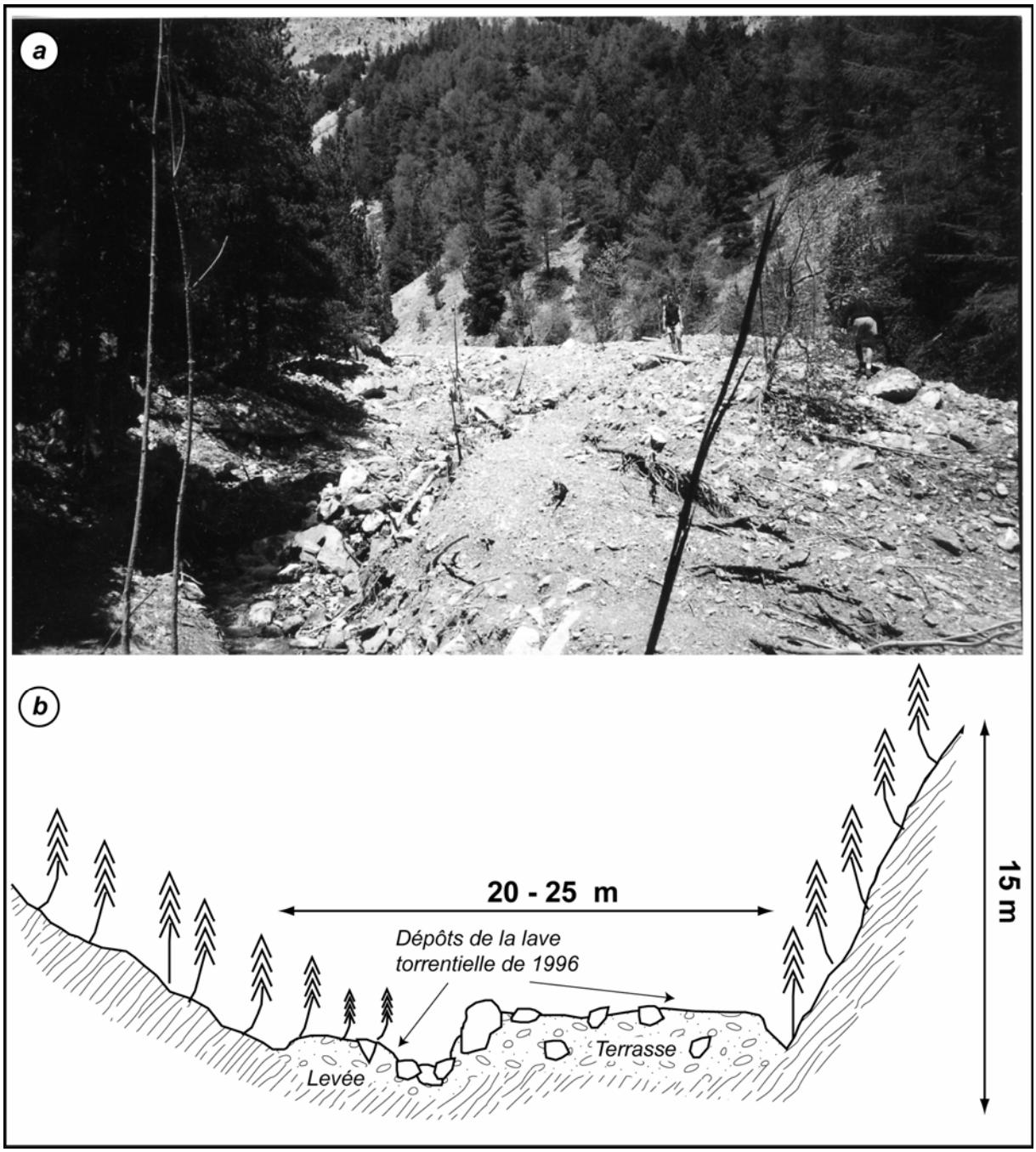


Figure 4.27 *: Vue en mai 1997 (a) et coupe (b) du dépôt de lave torrentielle en amont du seuil 51.*

4.2.1.6. Zone F : ***non fonctionnelle***

La zone F s'étend sur près de 650 m. La pente moyenne du lit est de l'ordre de 10.5°, elle varie entre 7 et 20°. Le torrent évolue dans les matériaux de nappes (les formations superficielles issues de la désagrégation des flyschs). Les marnes noires ont disparues.

La morphologie du chenal évolue de l'aval vers l'amont. En partie basse, entre les seuils SN21 et 60, le lit présente un profil en U dissymétrique. La pente du lit est relativement faible (4 à 8°). La largeur du lit mineur varie entre 7 et 13 m et celle du lit majeur entre 10 et 19 m. Des dépôts torrentiels grossiers encombrent le lit torrentiel, ces dépôts sont incisés par le torrent. Les versants sont dissymétriques, la pente en rive droite varie entre 12 et 35° avec

une augmentation vers l'amont, la pente en rive droite varie entre 27 et 35°. La dissymétrie disparaît progressivement vers l'amont.

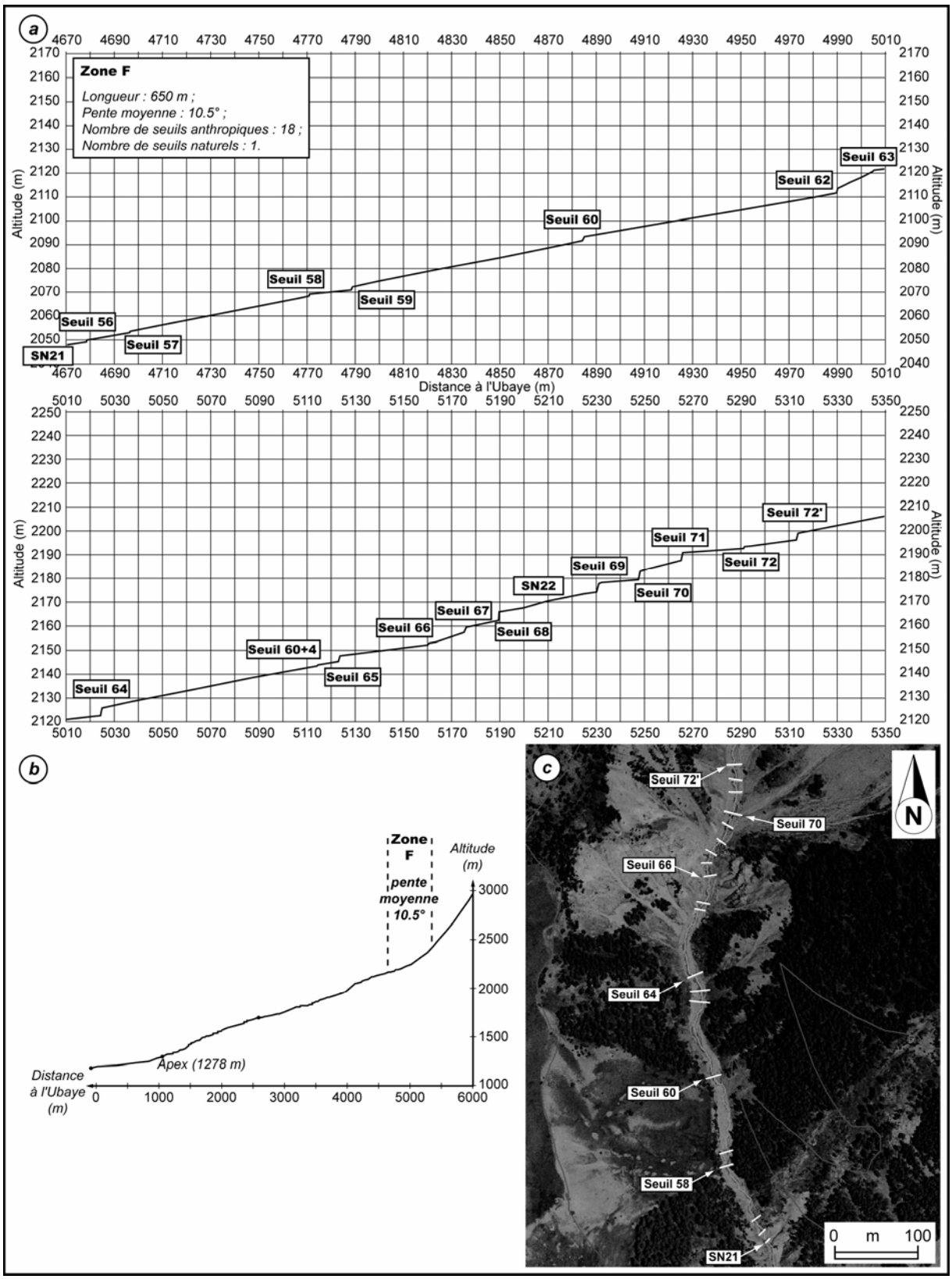


Figure 4.28 *: Profil en long (a), localisation (b) et vue aérienne (c) de la zone F du torrent de Faucon.*

En partie haute, à l'amont du seuil 60, le lit présente un profil plus escarpé, en V. La pente du lit est plus forte, elle varie entre 14 et 22°. Le chenal torrentiel est étroit (4 à 8 m de large), et il est unique. Les versants sont raides, entre 20 et 45° en rive droite, entre 20 et 39° en rive gauche. La pente des versants augmente en progressant vers l'amont.

Dix-neuf seuils torrentiels ont été répertoriés dont un seuil naturel. Tous les seuils sont en mauvais état : 7 sont complètement détruits, 6 sont très abîmés et 5 sont enfouis. Aucun élément relatif au passage de la lave de 1996 n'est observé.

4.2.1.7. Zone G : ***non fonctionnelle***

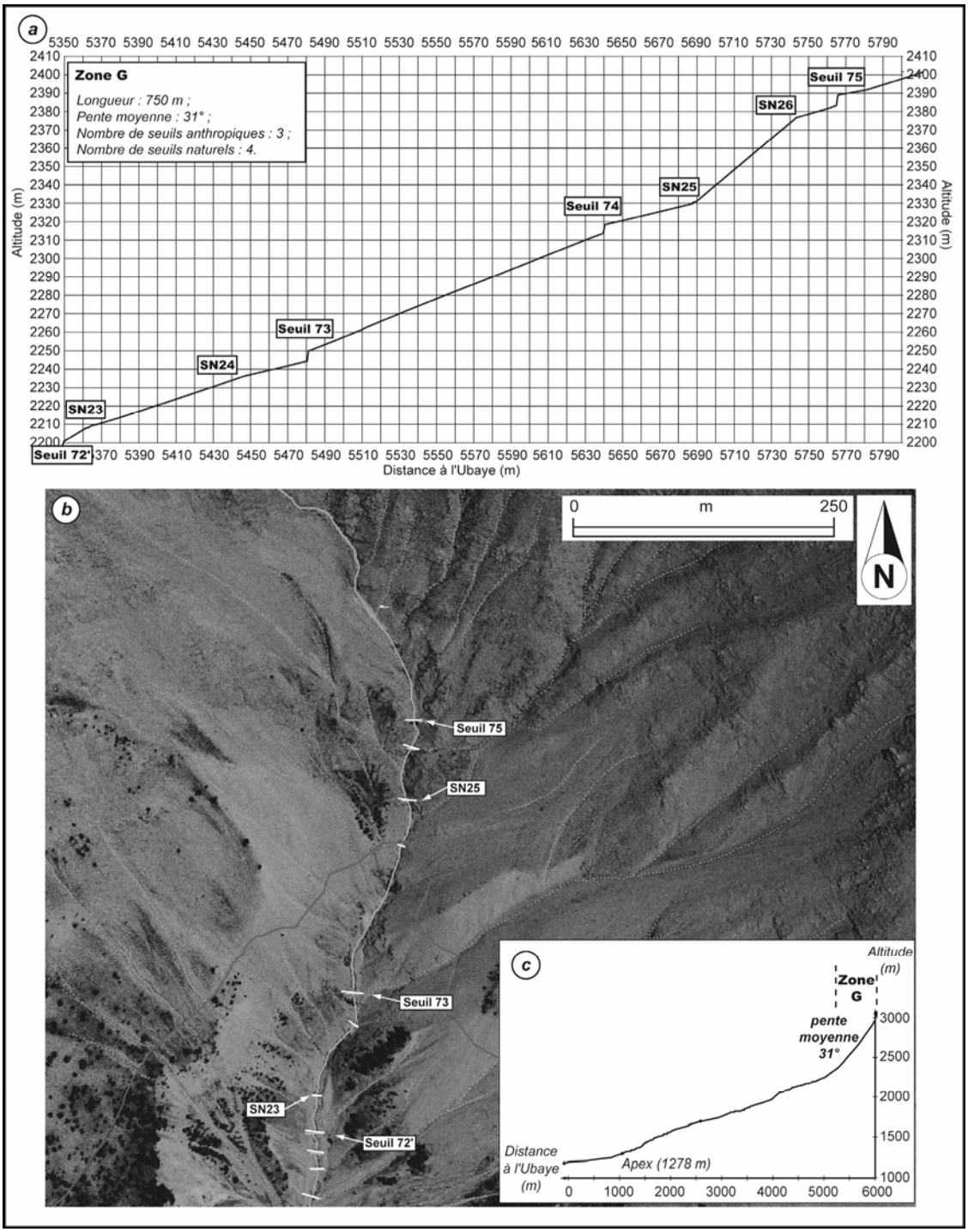


Figure 4.29 *: Profil en long (a), localisation (b) et vue aérienne (c) de la zone F du torrent de Faucon.*

La zone G se localise dans la zone de transition entre le chenal d'écoulement et le bassin de réception. Dans cette zone, le torrent de *Faucon* affouille les formations superficielles issues de la désagrégation des flyschs. La pente moyenne (31°) est très forte, elle augmente progressivement vers l'amont. Les versants sont recouverts par une pelouse alpine, lacérées par de très nombreux talwegs. La majorité des talwegs naissent vers 2600 m d'altitude, en contrebas de la crête de *La Chalanche*. Certains d'entre eux s'étendent sur plusieurs centaines de m ; profond de 0.50 à 2 m les couloirs ont une largeur qui varie entre 1 et 3 m. Ils sont tapissés par des éboulis dont la taille est centimétrique.

En partie haute, la pelouse disparaît progressivement, les formations rocheuses sont à nues. Des névés qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de m de long remplissent le chenal torrentiel. 3 seuils anthropiques et 4 seuils naturels arment le torrent, les seuils anthropiques sont tous en mauvais état. Comme dans la zone F, aucune trace relative à la lave torrentielle de 1996 n'est également observée.

La description de la morphologie fine du chenal torrentiel en 1998 a permis d'identifier sept zones au fonctionnement bien différencié (Fig. 4.30). Les traces de la lave torrentielle de 1996 sont nombreuses, logiquement les zones de dépôt se concentrent dans la partie basse du chenal (secteurs A, B, C et D) et les zones d'incision se concentrent dans les parties médianes (secteurs C, et E). Les zones F et G n'ont pas fonctionné (en écoulement torrentiel).

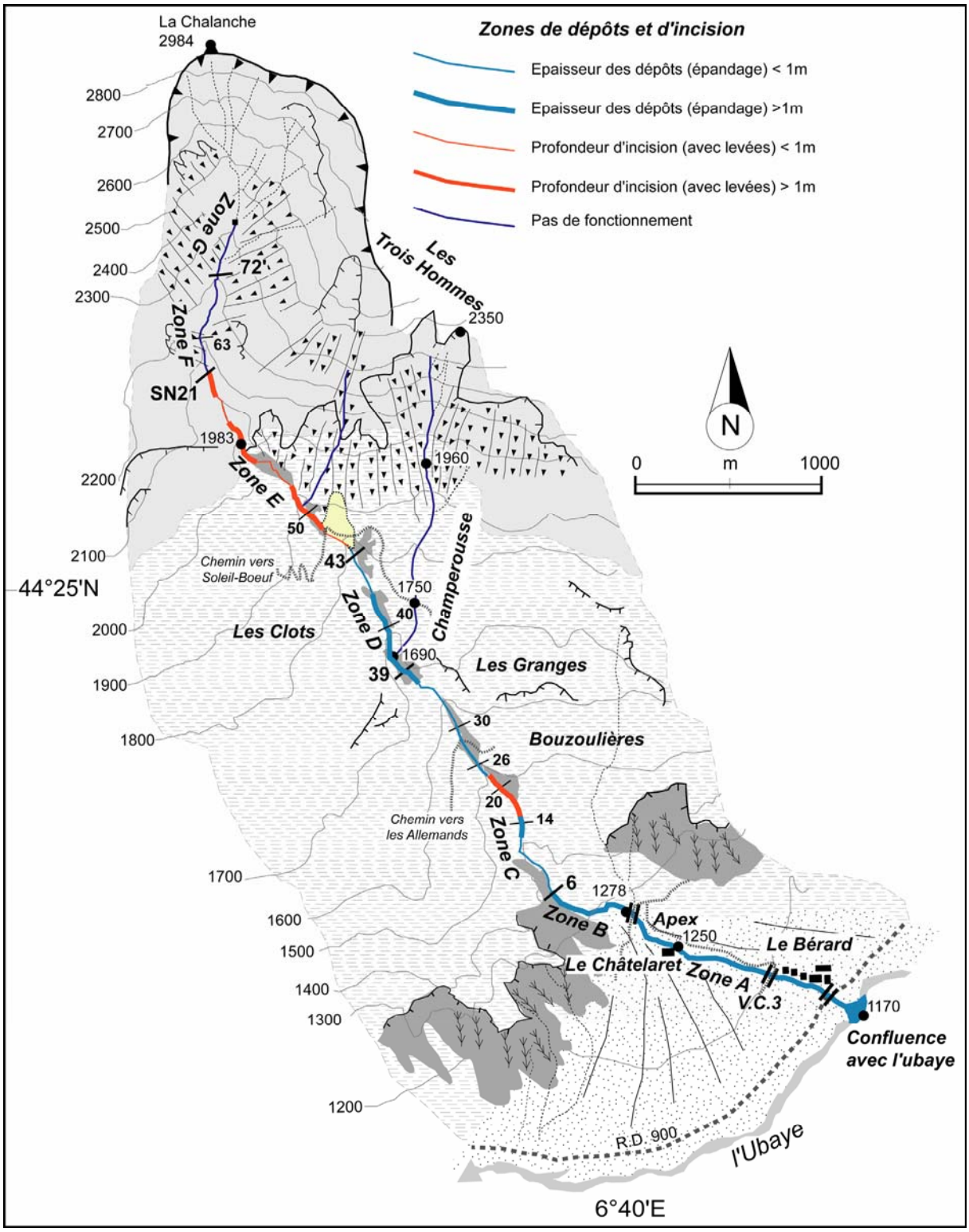


Figure 4.30 *: Morphologie de l'épisode torrentiel du 19 août 1996 sur le torrent de Faucon.*

4.2.2. Observations après l'épisode torrentiel du 5 juin 2002

Les observations relatives à l'événement torrentiel du 5 juin 2002 se sont déroulées du 10 au 14 juin. La morphologie détaillée du chenal ayant été présentée dans la section 4.2.1., seules les modifications majeures liées à cet événement sont données (Fig. 4.31).

Dans **la zone A**, à la confluence avec le torrent de l'*Ubaye*, le torrent de *Faucon* a déversé des dépôts sous la forme d'un petit cône qui a repoussé l'*Ubaye* de quelques dizaines de m. Les matériaux qui composent le cône sont des matériaux grossiers sans aucune cohésion : durant nos 4 jours d'observation le cône a été fortement érodé par l'*Ubaye* sur une dizaine de m. Le lit est comblé par les dépôts torrentiels : leur épaisseur varie entre 1 et 2 m environ. Les traces relatives à la hauteur maximale d'écoulement indiquent que l'écoulement est passé au ras des tabliers des deux ponts (V.C.3 et R.D. 900). Les dépôts ne présentent aucune morphologie particulière (levées, lobes, etc.) et comblent uniformément le fond du lit.

Dans **la zone B**, à l'amont immédiat du pont du *Châtelaret* (Fig. 4.31), le lit est comblé par des dépôts torrentiels (Fig. 32a). Le lit torrentiel a ainsi été rehaussé de près d'1 m par rapport à 1997 (Fig. 32c). Vers l'amont, certains dépôts forment des terrasses : trois niveaux de terrasses différents sont relevés d'une épaisseur comprise entre 10 et 50 cm. Cette morphologie de terrasses se prolonge jusqu'à 200 m en amont du seuil 0. En progressant, les dépôts sont de moins en moins épais. Des traces de sapements de berge modérés sont relevées régulièrement sur les deux rives du chenal. Le lit est légèrement incisé au droit des demoiselles coiffées (Fig. 4.14a), mais cette incision n'excède pas 0.50 m.

Dans la zone C, les traces du passage de l'événement torrentiel deviennent de plus en plus imperceptibles au fur et à mesure de la progression vers l'amont. Des traces de dépôts 'frais' sont toutes localisées à l'arrière des ailes de certains seuils torrentiels (seuils 1, 8 et 10'), mais leur épaisseur n'excède pas 0.50 m. Les dépôts disparaissent complètement à partir du seuil 14. Toute **la zone D** est exempte de traces significatives. Le torrent de *Champerousse* n'a pas fonctionné durant cet épisode.

Plus aucune trace de dépôt ou d'incision n'est ensuite relevée jusqu'aux seuils situés en contrebas du chemin vers *Soleil-Bœuf* (Fig. 4.31). A l'époque des faits, dans ce secteur, des nouveaux seuils (85 à 88 et 42 à 44) ont été construits (Fig. 4.32), 4 d'entre eux étaient en construction (la série 85 à 88).

Des traces du passage de l'événement torrentiel sont perceptibles dans **la zone E** :

- le lit est par endroit incisé (de 0.50 m environ), la largeur de la bande d'incision varie entre 2 et 4m. L'incision reste extrêmement localisée, elle ne concerne que les deux biefs compris entre les seuils 44 et 45 ;

- les déblais relatifs aux travaux des services RTM ont été emportés par endroit et re-déposés quelques mètres plus loin. Ces déblais remaniés comblent une partie des seuils en voie de construction. Ils sont mélangés avec les dépôts torrentiels de l'événement ; ce mélange forme des dépôts qui peuvent être épais d'un mètre environ ;

- un dépôt est venu s'étaler sur le chemin menant vers *Soleil-Bœuf* ; cette nappe de matériaux est épaisse d'1 m environ à l'aval immédiat du seuil 47 (Fig. 4.33b et 4.33d). Ce dépôt occupe toute la largeur de la route et gêne le passage à gué du torrent.

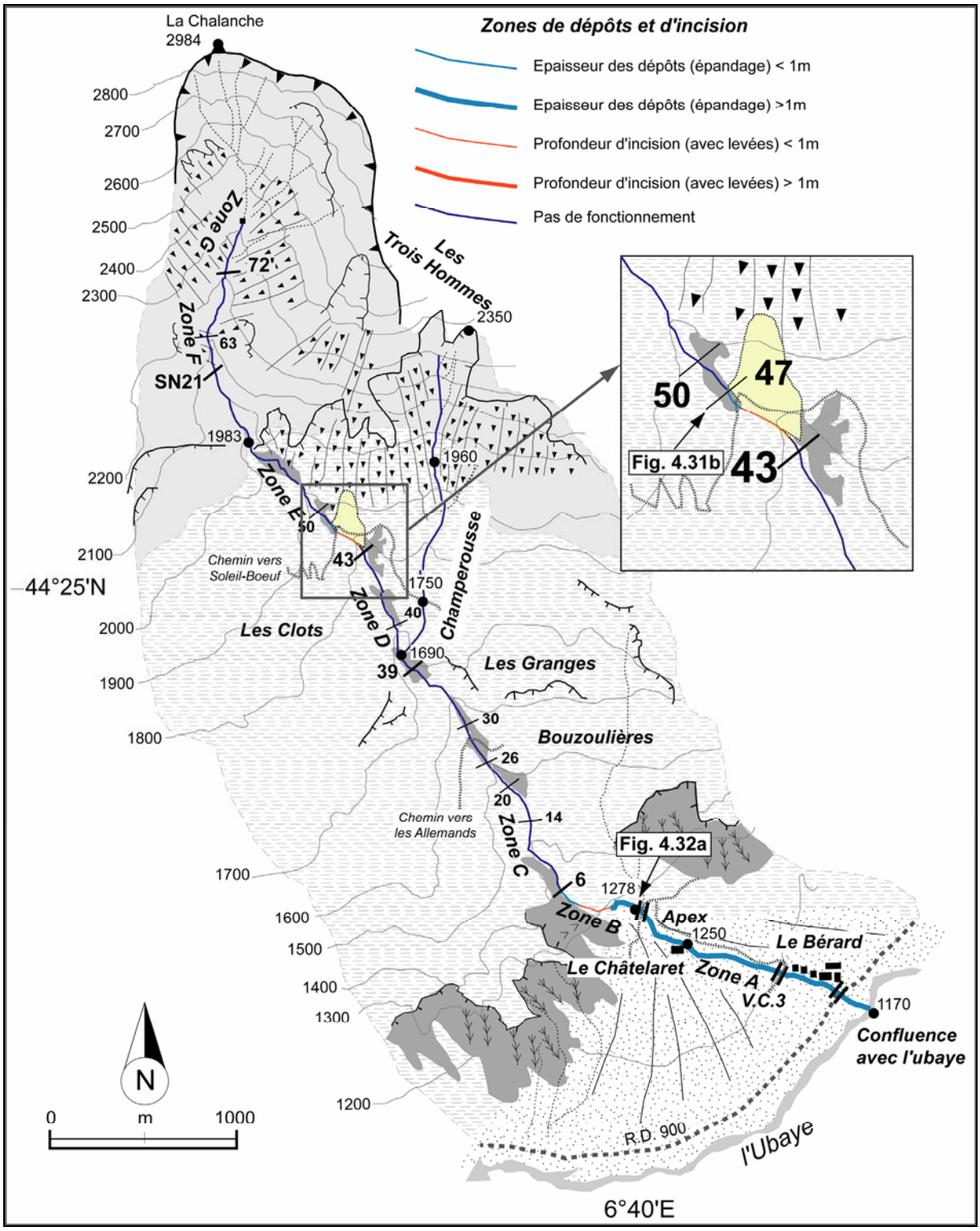


Figure 4.31 *: Morphologie de l'épisode torrentiel du 4 juin 2002 sur le torrent de Faucon.*

A l'amont du seuil 47, aucune trace significative du passage d'un écoulement torrentiel ne peut être relevée. La morphologie du lit et l'état des seuils ne semblent pas avoir significativement évolué depuis la dernière visite de terrain.

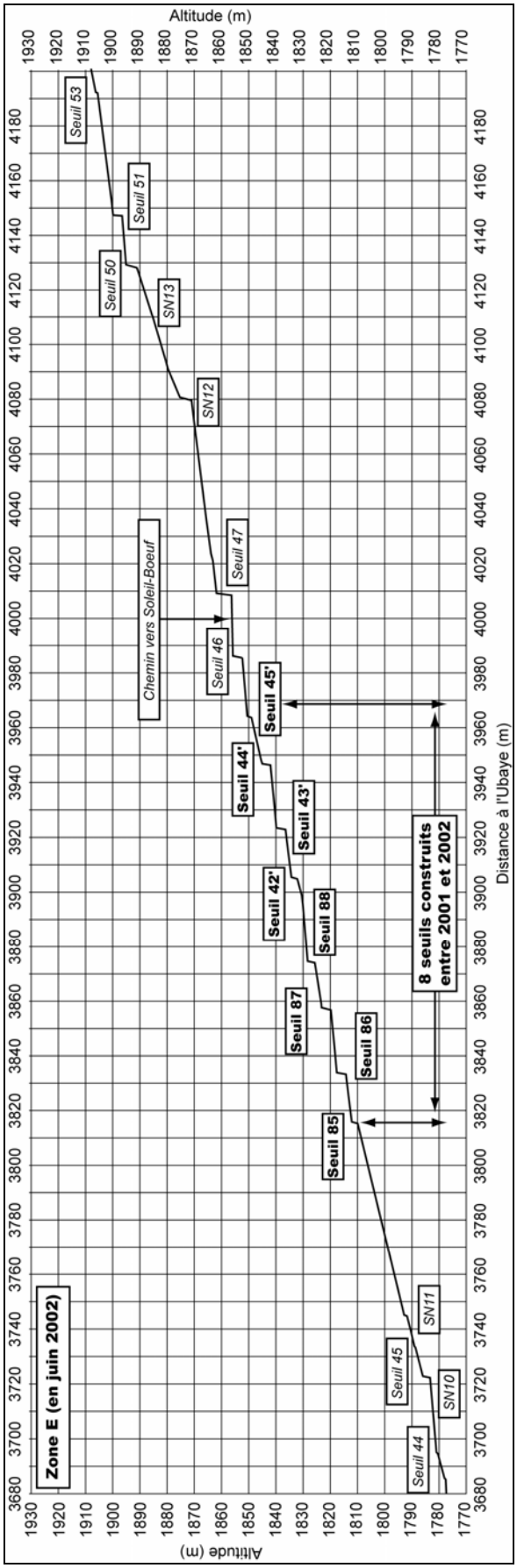


Figure 4.32 *: Profil en long du secteur E du torrent de Faucon en juin 2002.*

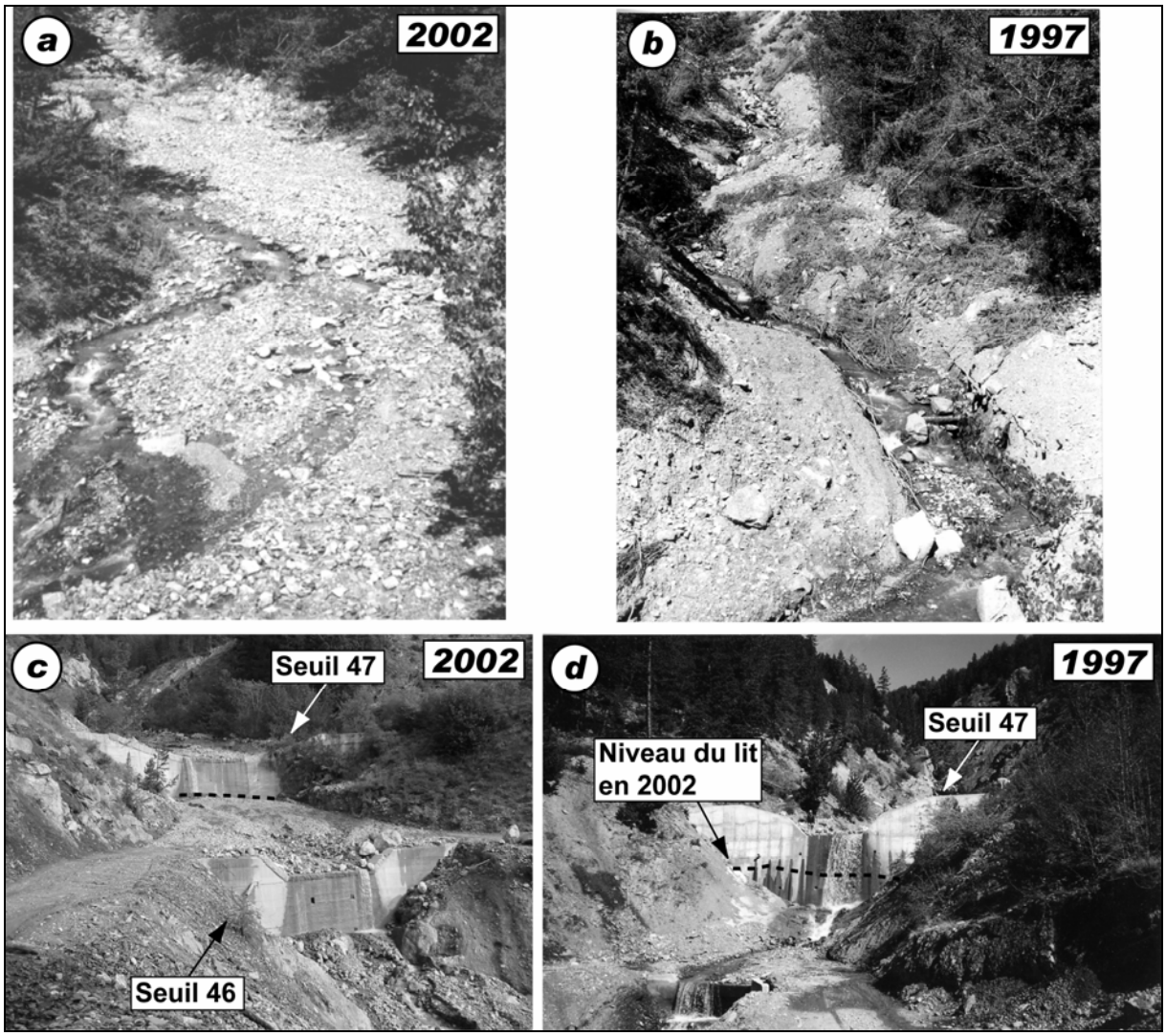


Figure 4.33 *: Evolution de deux secteurs du torrent de 1997 à 2002.*

a : vue sur le torrent depuis le pont de l'apex (pont 3) en juin 2002 ;
b : vue sur le seuil 47 en juin 2002 ;
c : vue sur le torrent depuis le pont de l'apex (pont 3) en mai 1997 ;
d : vue sur le seuil 47 en mai 1997.

4.2.3. Observations après la lave torrentielle du 5 août 2003

Les témoignages ont été recueillis et les observations réalisées entre le 12 et le 15 août 2003, le 1er et 3 septembre 2003, en mai et juillet 2004. Les zones non accessibles en août, ont été étudiées lors de notre deuxième visite. Les observations des trois secteurs ayant fonctionnés (torrents de *Faucon* et de *Champerousse* et versant des *Trois Hommes)* sont reportées sur la carte morphologique (Fig. 4.34).

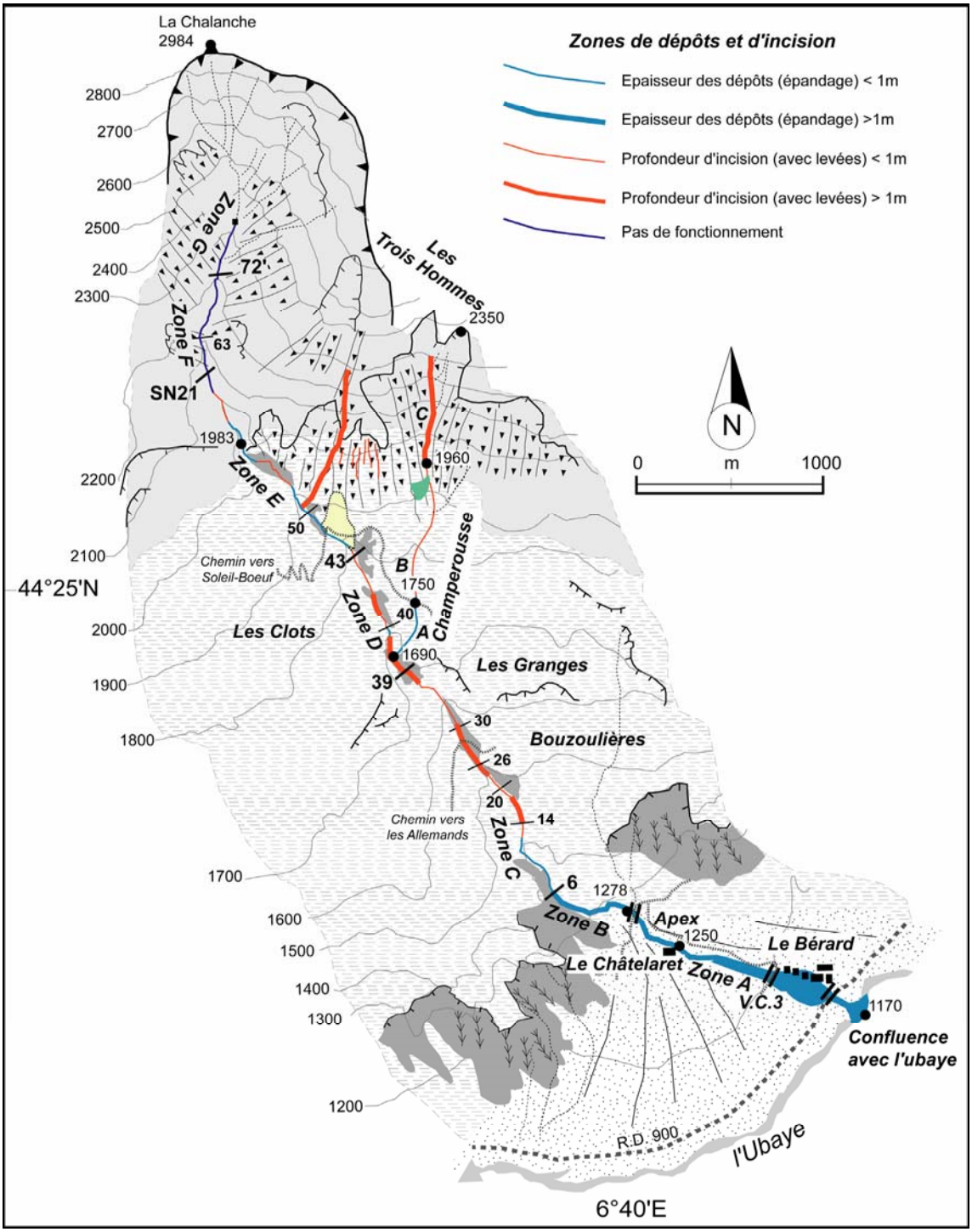


Figure 4.34 *: Morphologie de la lave torrentielle du 5 août 2003 sur le torrent de Faucon.*

4.2.3.1. Les observations sur le torrent de Faucon

a) Zone A : ***dépôt***

A la confluence avec l'*Ubaye*, un cône-delta a été formé par la lave du 6 août. Il a été progressivement érodé par l'*Ubaye*. Le 12 août 2003, ses dimensions atteignent près de 50 m de long pour une centaine de large et une épaisseur de 1 à 2,50 m. A la confluence, les dépôts ont repoussé l'*Ubaye* vers la rive opposée de son lit large de 200 m environ.

D'imposants dépôts recouvrent l'ensemble du chenal torrentiel. Caractérisés par une matrice d'éléments fins (texture limono-sableuse à sablo-argileuse) renfermant des éléments plus grossiers, ils forment des **levées perchées à 2 à 3 m au dessus du chenal pour une largeur de 2 à 10 m. Les dépôts sont indurés quelques jours après l'événement.**

De multiples traces de débordement sont observées sur les deux rives du torrent dans les zones forestières contiguës et principalement en rive gauche le long du lotissement du *Bérard* et au droit du *Châtelaret* :

- **Au pont sur la R.D. 900**, les traces de boue sont encore visibles sur le tablier ainsi que sur les abords du chenal avec des traces de boue retrouvées à une hauteur de 1,50 à 2 m sur les troncs des arbres environnants. Les dépôts se retrouvent de part et d'autre du chenal jusqu'à 50 m à l'intérieur de la forêt par endroit ;

- **Au lotissement du *Bérard***, au droit du pont V.C.3 dont le tablier en bois a été complètement arraché (Fig. 4.35b), le mélange boueux s'est étalé le long des deux rives (Fig. 4.35a), avec un dépôt plus épais en rive gauche (0.50 m environ) ;

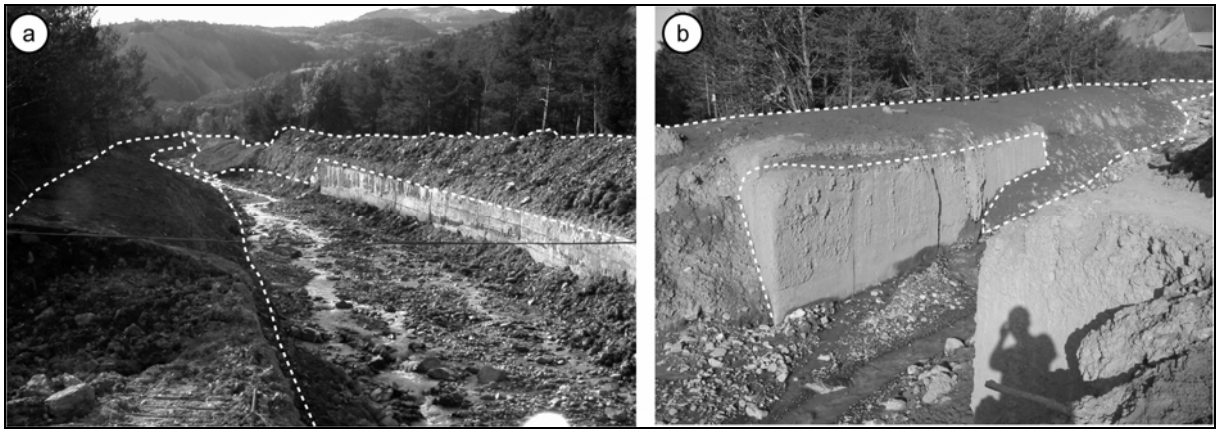


Figure 4.35 *: Morphologie du chenal torrentiel huit jours après la lave torrentielle du 5 août 2003.*

a : vue sur le bief en amont du pont V.C.3 ;
b : vue sur les vestiges du pont V.C.3 : culées en place et tablier emporté.

- **Au droit du *Châtelaret*,** à la faveur d'un changement de direction marqué du chenal vers le sud, et d'une berge d'une faible hauteur (environ 1,50 m), des débordements sont observés sur la rive gauche. Les dépôts se sont propagés le long du chemin contiguë. Les deux berges ont été submergées mais l'essentiel des dépôts s'est déversé en rive gauche du torrent.

b) Zone B : ***dépôt et incision***

A l'amont de l'apex, les écoulements torrentiels ont été contenus dans le chenal en raison de la hauteur des berges (4 à 5 m) et du relatif confinement du chenal torrentiel à l'exception du

pont du *Châtelaret* (chemin d'accès vers *Bouzoulières*) où des débordements sont observés (Fig. 4.36) :

- sur le tablier du pont recouvert de boue ;
- en rive gauche provoquant un affouillement de la culée du pont ;
- sur la partie amont gauche de la rambarde du pont qui a été arrachée.

Figure 4.36 *: Vue vers l'amont sur le pont du Châtelaret (1278 m).*

Une partie de la rambarde du pont a été emportée par la lave torrentielle. A cet endroit le pont est perché à 4.5 m au dessus du chenal torrentiel. A noter un important glissement de berge en rive gauche.

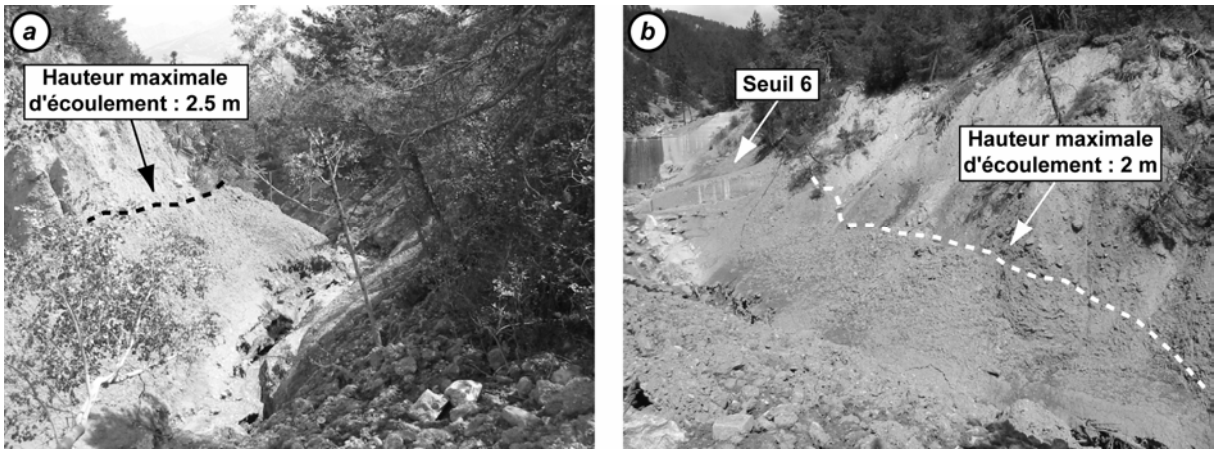


Figure 4.37 *: Morphologie du chenal torrentiel quelques jours après la lave torrentielle du 5 août 2003.*

a : vue sur le bief en aval du seuil 1 ;
b : vue sur le seuil 6.

Des dépôts de laves sont observés sur toute la longueur de cette zone B (Fig. 4.37). Les anciennes berges torrentielles et les bas de versants ont été partiellement ou entièrement recouverts par **des dépôts indurés (dépôts Type A et B)**. Ces dépôts se retrouvent jusqu'à une hauteur de 4 m au-dessus du chenal torrentiel, comme par exemple au droit du virage du *Châtelaret*. Les berges torrentielles et les versants laissent apparaître dans les parties les plus pentues du chenal des cicatrices d'arrachement et/ou des traces de sapement de berge. Le torrent est incisé (incision Type A) par endroit, entre les levées torrentielles des dépôts. La profondeur des zones d'incision varie entre 0.25 et 0.50 m, et elles correspondent en largeur grossièrement au lit mineur du torrent.

*c) Zone C : **incision***

Des traces d'incision sont observables sur la quasi totalité du secteur C. Cette incision diffère d'un bief à l'autre, de l'aval vers l'amont (Fig. 4.38) :

- **du seuil 6 au seuil 14**, l'incision est accompagnée de dépôts (Type B) sous forme de levées de part et autre du lit torrentiel (Fig. 4.39a). L'épaisseur des dépôts varie entre 0.25 et 0.75 m. A la faveur d'un élargissement du chenal torrentiel, les dépôts peuvent prendre la forme de lobes ;

- **du seuil 14 au seuil 31b**, le chenal présente de nombreuses traces d'érosion des berges et d'incision du lit. Cette incision laisse apparaître par endroit de vieux seuils ensevelis. L'incision **linéaire** provoque un abaissement du lit de **plus de 2 m**, comme par exemple au pied du seuil 15 qui se trouve sous-cavé (Fig. 4.39b). Les berges sont marquées par le passage de la lave : sapements de berge avec une incision basale pouvant atteindre plusieurs dizaines de centimètres, glissements superficiels sur plusieurs dizaines de mètres ;

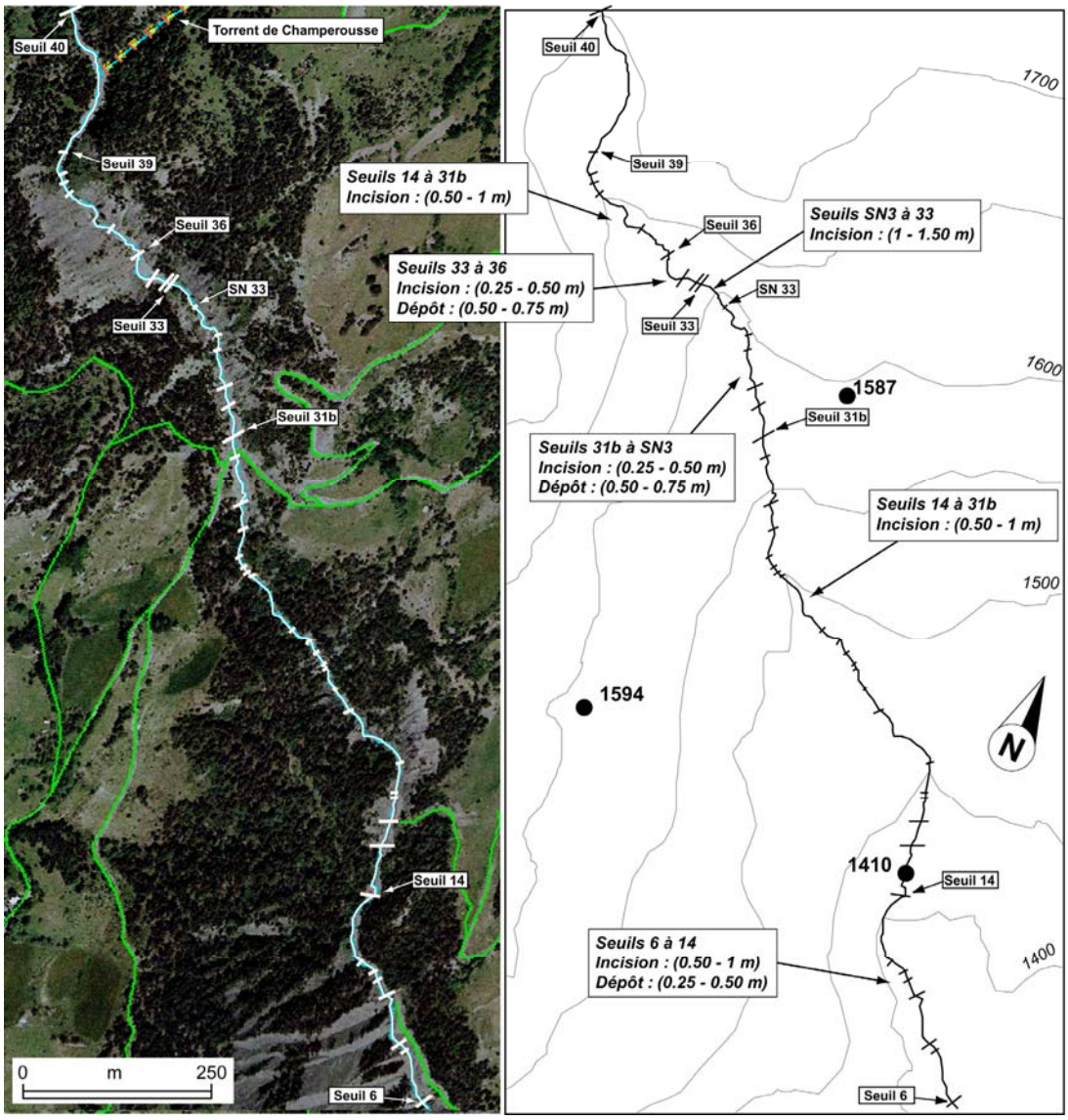


***Figure 4.38** : Morphologie de la lave torrentielle du 5 août 2003 au torrent de Faucon dans la zone C.*

a : vue aérienne de la zone C ;
b : plan de la zone C et morphologie de la lave.

Figure 4.39 *: Morphologie de la lave torrentielle du 5 août 2003 au torrent de Faucon au droit des seuils 6 et 15.*

a : vue sur le tablier du seuil 6 : lobe de lave en rive gauche ;
b : vue sur le seuil 15 : abaissement du lit de 2 m.

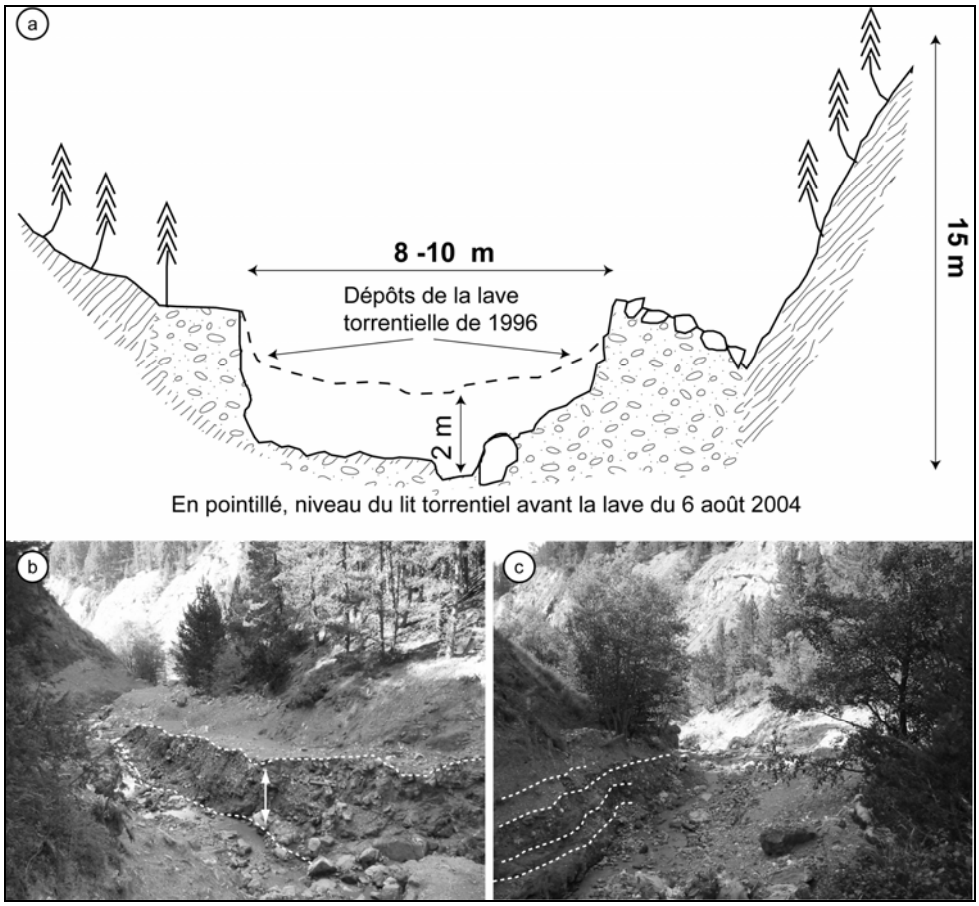


Figure 4.40 *: Morphologie du chenal torrentiel après la lave torrentielle du 5 août 2003 à l'aval de la confluence avec le torrent de Champerousse.*

a : coupe transversale du chenal torrentiel du Faucon ;
b et c : vues sur le torrent de Faucon (amont seuil 39), en pointillé blanc la profondeur d'incision par la lave ;

▪ **du seuil 31b à SN3**, le lit est incisé sur une cinquantaine de centimètres environ. Latéralement, d'anciens dépôts de laves torrentielles sont sapés sur plusieurs dizaines de centimètres. Un dépôt de lave torrentielle 'frais' comble une partie des ailes du seuil 31b ;

▪ **de SN3 au seuil 33**, le lit est fortement incisé sur près d'1 mètre. Cette incision augmente de l'aval vers l'amont, pour atteindre près d'1.50 m au pied du seuil 33. La largeur de la zone d'incision varie entre 2 et 5 m ;

▪ **du seuil 34 au seuil 35**, l'incision est très faible (0.25 m), et des dépôts de laves (Type B) remplissent les seuils 33 et 34 sur une épaisseur comprise entre 0.50 et 0.75 m ;

▪ **du seuil 36 au seuil 39**, l'incision reprend activement. Elle est particulièrement profonde, entre 1 et 2 m. Les dépôts d'une précédente lave torrentielle sont incisés, les anciennes levées ou terrasses sont sapées (Fig. 4.40a et b). A la confluence avec le torrent de *Champerousse*, le sapement en rive gauche a été particulièrement important. De ce fait, l'embouchure du lit torrentiel du *Champerousse* domine le lit torrentiel du *Faucon* de près de 2 m ;

*d) Zone D :°**incision***

Des traces du passage de la lave de 2003 dans la zone D sont similaires à celles observées dans la zone C : l'incision prédomine dans l'ensemble de cette zone :

▪ du seuil 40 au seuil 41, le lit est incisé sur 0.50 m environ, sur les marges des dépôts de laves torrentielles dont l'épaisseur varie entre 0.25 et 0.75 m sont observés. Certains de ces dépôts ont recouvert d'anciennes levées torrentielles, et sont ainsi perchés à plus de 2 m au dessus du lit torrentiel (Fig. 4.40a) ;

▪ du seuil 41 au seuil 43, le lit torrentiel est incisé sur un peu plus de 0.50 m d'épaisseur. Dans les sections moins pentues, les levées, situées de part et d'autre de la zone d'incision, sont sapées sur plusieurs dizaines de cm.

*e) Zone E : **dépôt***

Jusqu'à l'intersection avec le chemin menant vers *Soleil-Boeuf*, de nombreux dépôts (Type A) sont encore présents, **le lit a été comblé** par endroit. Ces dépôts **non indurés,** composés de galets et de blocs de toutes tailles sans matrice fine apparente, comblent certains seuils torrentiels, recouvrant les bas de versants. Les berges et les bas de versants sont affectés par de nombreux petits mouvements de terrain (sapement de berge, glissement superficiel) qui menacent la stabilité de nombreux seuils.

A l'amont du seuil 51, d'importants dépôts de laves recouvrent la rive gauche. Ils proviennent d'un ravin parcourant le versant de *Champerousse* et qui rejoint le torrent de *Faucon*. Sa description fera l'objet d'un point spécifique (§ 4.2.3.3.). A l'amont de la cascade de SN14 (1983 m), des traces d'incision sont observables : elles atteignent quelques dizaines de centimètres au seuil 55.

*f) Zones F et G : **non fonctionnelles***

En progressant vers l'amont vers la crête de *Soleil-Bœuf*, la morphologie du lit et l'état des seuils n'a pas significativement évolué. Les seuils sont en mauvais état et certains sont partiellement ou complètement détruits. Malgré la présence de dépôts torrentiels peu épais et une incision linéaire peu marquée, il est difficile d'y voir un fonctionnement réel durant cet épisode torrentiel. Les dépôts, assez grossiers, sont non cimentés, on note toutefois la présence de petits lits indurés dans les anciens dépôts.

Zone	Altitude limite (m)		Longueur (m)	Pente (°)	Nombre de biefs	Seuils RTM
	Faucon	1685				
A			225	4.7	14	14
	11	1752				
B			625	11.5	25	25
	33	1907				
C			850	30.0	1	0
	Source	2430				

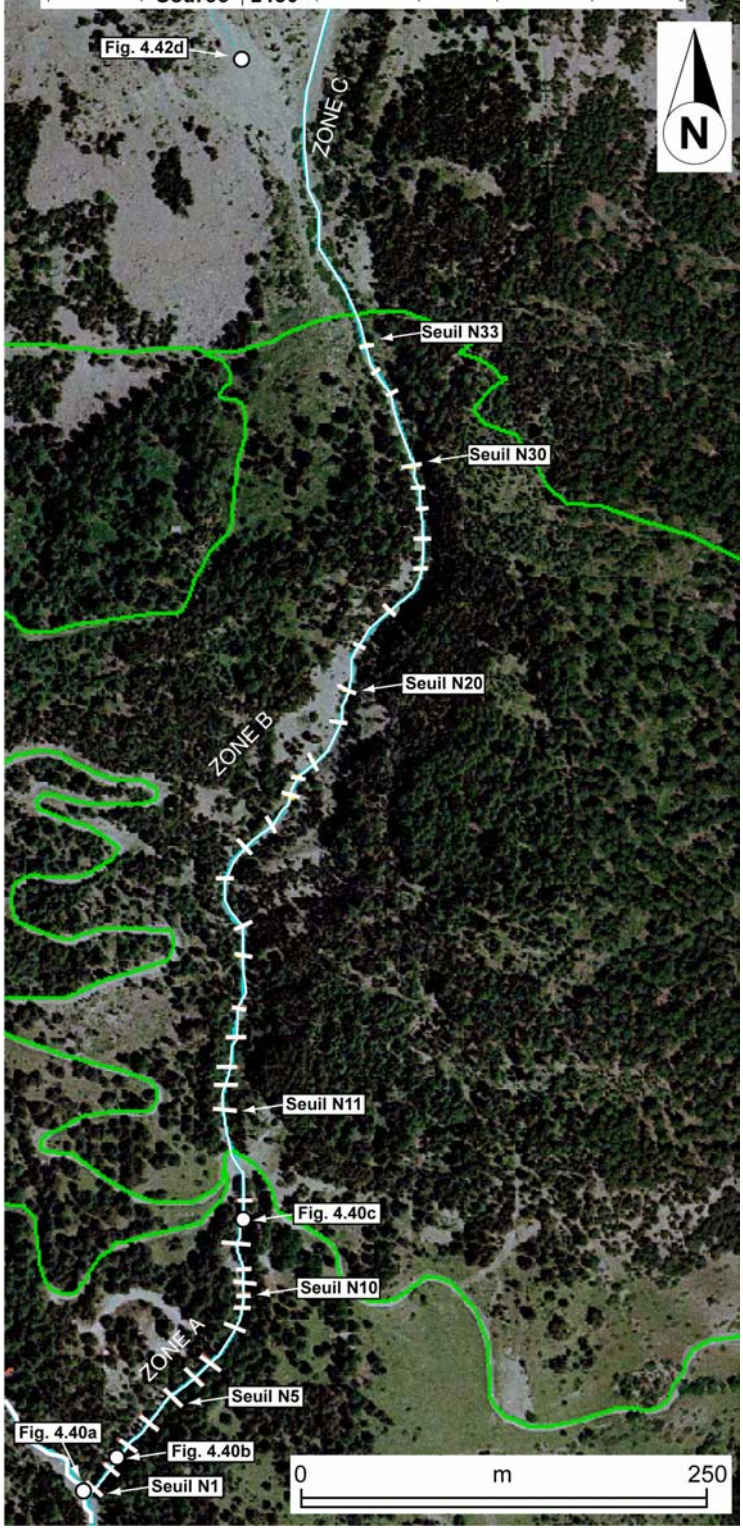


Figure 4.41 *: Localisation des trois zones 'homogènes' et des seuils torrentiels sur le torrent de Champerousse.*

4.2.3.2. Les observations sur le torrent de Champerousse

Comme pour le torrent de *Faucon*, le torrent de *Champerousse* a été découpé en zones 'homogènes' de l'aval vers l'amont. Ces zones se distinguent essentiellement de par leur profil en long (Fig. 4.41). Les observations après l'événement de 2003 sont aussi présentées pour chaque zone.

*a) Zone A : **dépôt***

Dans cette zone, la morphologie du lit torrentiel et des versants est régulière ; la pente, assez faible, est de 7°. Le torrent s'incise dans les formations morainiques et les marnes noires. Il est encaissé d'un peu plus de 10 m par rapport à la topographie environnante. Il est important de noter que plusieurs nouveaux seuils en maçonnerie (hauteur des seuils comprise entre 2.50 et 3 m) ont été construits dans cette zone en 2002 et au début du printemps 2003.

A la confluence avec le torrent de *Faucon*, le torrent de *Champerousse* forme une petite cascade de 2 m (Fig. 4.42a) suite au sapement de la rive gauche du torrent de *Faucon* par la lave de 2003. Quelques mètres à l'arrière de la cascade, le seuil 2 est particulièrement affouillé à sa base (Fig. 4.42b).

Les plages à l'amont des 14 seuils de la zone A sont toutes remplies de dépôts torrentiels « frais » de texture sablo-limoneuse avec peu d'éléments grossiers. Des dépôts de matériaux fins et épais de 50 cm environ, encadrent un lit torrentiel étroit (2 m) où les matériaux grossiers sont plus abondants. Les berges ne sont pas érodées, et aucune trace de débordements latéraux n'est visible.

A l'aval immédiat du passage à gué, la morphologie du lit est un peu différente. Le lit est rempli par un matériau grossier très hétérogène composé de sables grossiers, de cailloux et de blocs (Fig. 4.42c).

*b) Zone B : **incision***

A l'amont du passage à gué la pente est plus forte, passant de 7° à plus de 12°. Avant le 5 août 2003, le torrent de *Champerousse* n'avait pas fonctionné depuis de nombreuses années. Ainsi, le fond du lit et les berges étaient tapissés par une végétation arbustive et arborée assez bien développée à l'abri de plusieurs seuils en maçonnerie en plus ou moins bon état.

Des traces d'érosion, essentiellement des sapements de berges apparaissent progressivement vers l'amont. Quelques petits glissements superficiels sont visibles par endroits mais ils n'excèdent pas 1 à 2 m de hauteur. Les matériaux du lit sont grossiers, composés de cailloux, de galets et de blocs de toutes tailles emballés dans une matrice sableuse.

Une rupture de pente (1 960 m) marque la transition avec le bassin de réception (zone C). Cette rupture de pente marque également la transition entre les marnes noires autochtones et les nappes de charriage. Au droit de cette rupture de pente, des dépôts de débordement (Type C) récents sont observés sur la rive droite du chenal. Ils couvrent une surface de plusieurs dizaines de m^2 sur une épaisseur variant entre 0.25 et 1 m. A l'aval de cette zone d'épandage, des levées hautes de 1 m environ sont observées de part et d'autre du chenal sur une centaine de mètres de longueur.

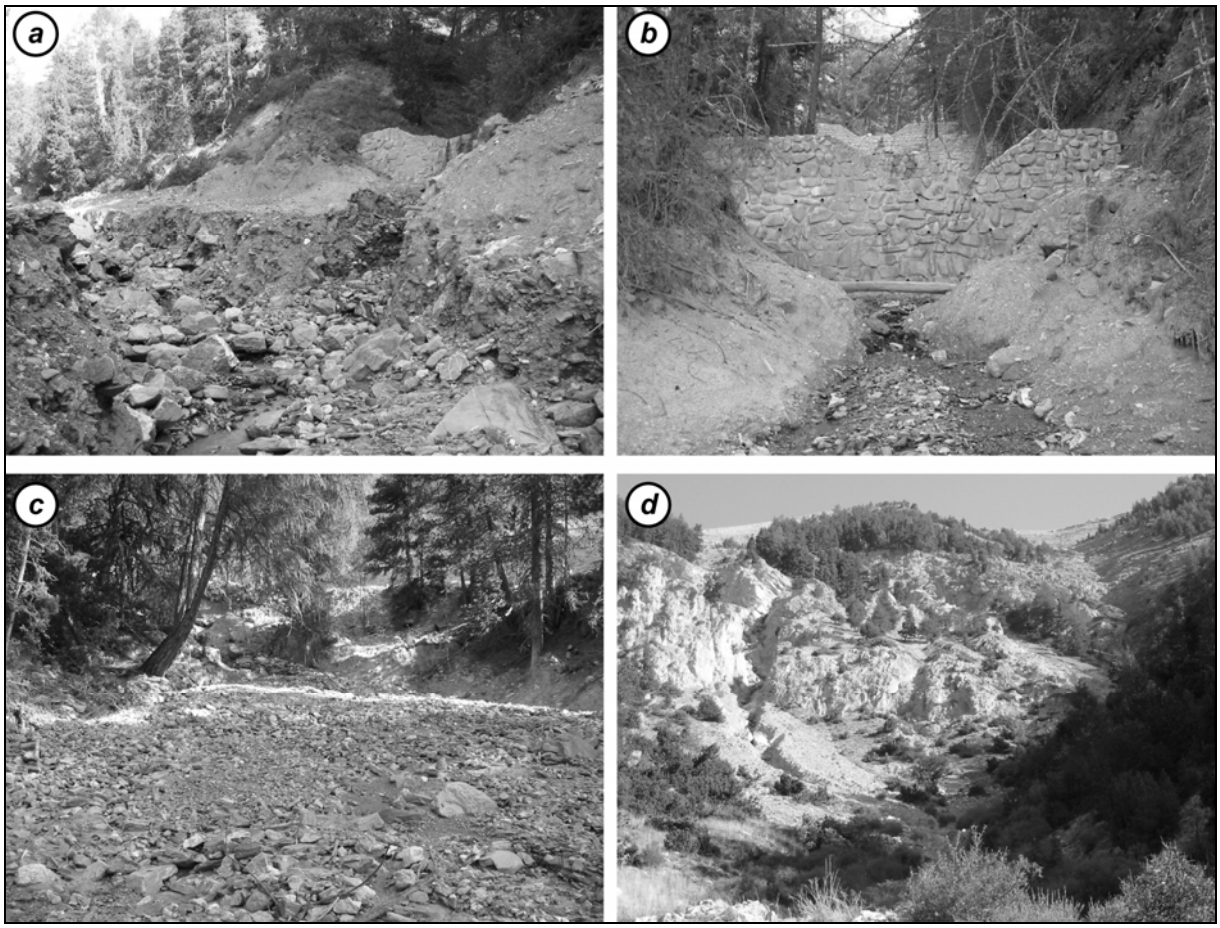


Figure 4.42 *: Morphologie du chenal torrentiel de Champerousse après la lave torrentielle de 2003.*

a : vue sur la confluence avec le torrent de Faucon ;
b : vue sur le seuil 2 du torrent de Champerousse ;
c : vue sur le torrent à l'aval du passage à gué ;
d : vue sur le bassin de réception du torrent de Champerousse.

c) Zone C : ***incision***

Le bassin de réception *stricto sensu* (pente moyenne 90%) est localisé dans un escarpement rocheux armé par les flyschs (Fig. 4.42d). Cet escarpement surplombe un tablier d'éboulis. Le bassin est drainé par plusieurs talwegs bien individualisés qui incisent plus ou moins profondément l'escarpement rocheux. Seul le talweg ouest présente une incision très marquée avec des **levées latérales qui atteignent au moins 50 cm de hauteur**. Par contre, dans le talweg aucun dépôt ou incision caractéristique n'est observable.

Les observations sur les trois zones montrent que le fonctionnement du torrent lors de cet événement est fortement lié à la pente de son profil en long.

4.2.3.3. Les observations sur le ravin des Trois Hommes

Le ravin affluent du torrent de *Faucon* à l'amont du seuil 51 (Fig. 4.43) est incisé dans les formations superficielles et les éboulis issus de la désagrégation des nappes de charriage. D'une longueur de 700 m environ, le ravin est très pentu ; sa pente moyenne est de 29°, elle varie entre 20 et 40°. Deux types de profils peuvent être distingués de l'aval vers l'amont.

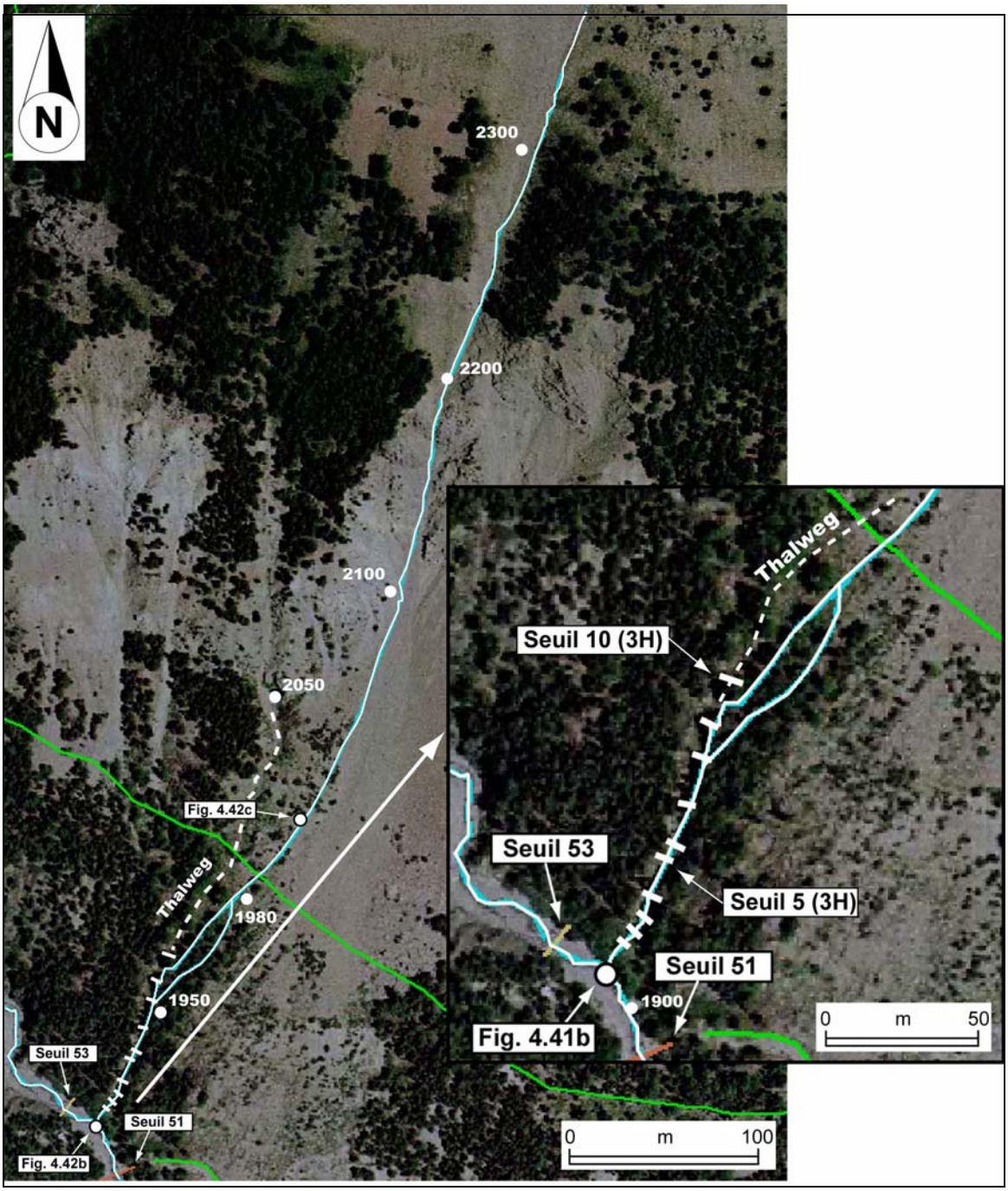


Figure 4.43 *: Vue aérienne sur talweg des Trois Hommes.*

Le premier est un profil en V, il concerne la partie basse du ravin, entre 1905 et 1930 m d'altitude. Le talweg est étroit et encaissé. Il est encombré par de nombreux blocs et de troncs d'arbres. Ce talweg a fait l'objet d'une correction torrentielle par la mise en place de petits seuils en maçonnerie en pierres sèches : ces seuils ont été repérés et cartographiés. Entre 1910 et 1960 m d'altitude, dix petits seuils en pierres sèches ont été observés ou

déduits dans la partie basse du ravin. Deux sont notés comme « supposés » compte tenu de la morphologie en escarpement marqué. Certains sont soulignés par un tapis de mousse verte indiquant une zone de source ou de suintement.

Le deuxième profil est en U resserré, et le lit est large de 5 à 6 m. Au dessus de 2200 m, le ravin en pente très forte (33-40°) est développé dans un escarpement rocheux bien marqué et plus ou moins incisé. D'autres talwegs à écoulement intermittent parcourent le versant parallèlement au ravin des *Trois Hommes*. Si dans la partie basse du profil, le torrent s'écoule dans une zone où le couvert forestier est bien étendu, il s'écoule sur des sols nus dans la partie médiane et haute.

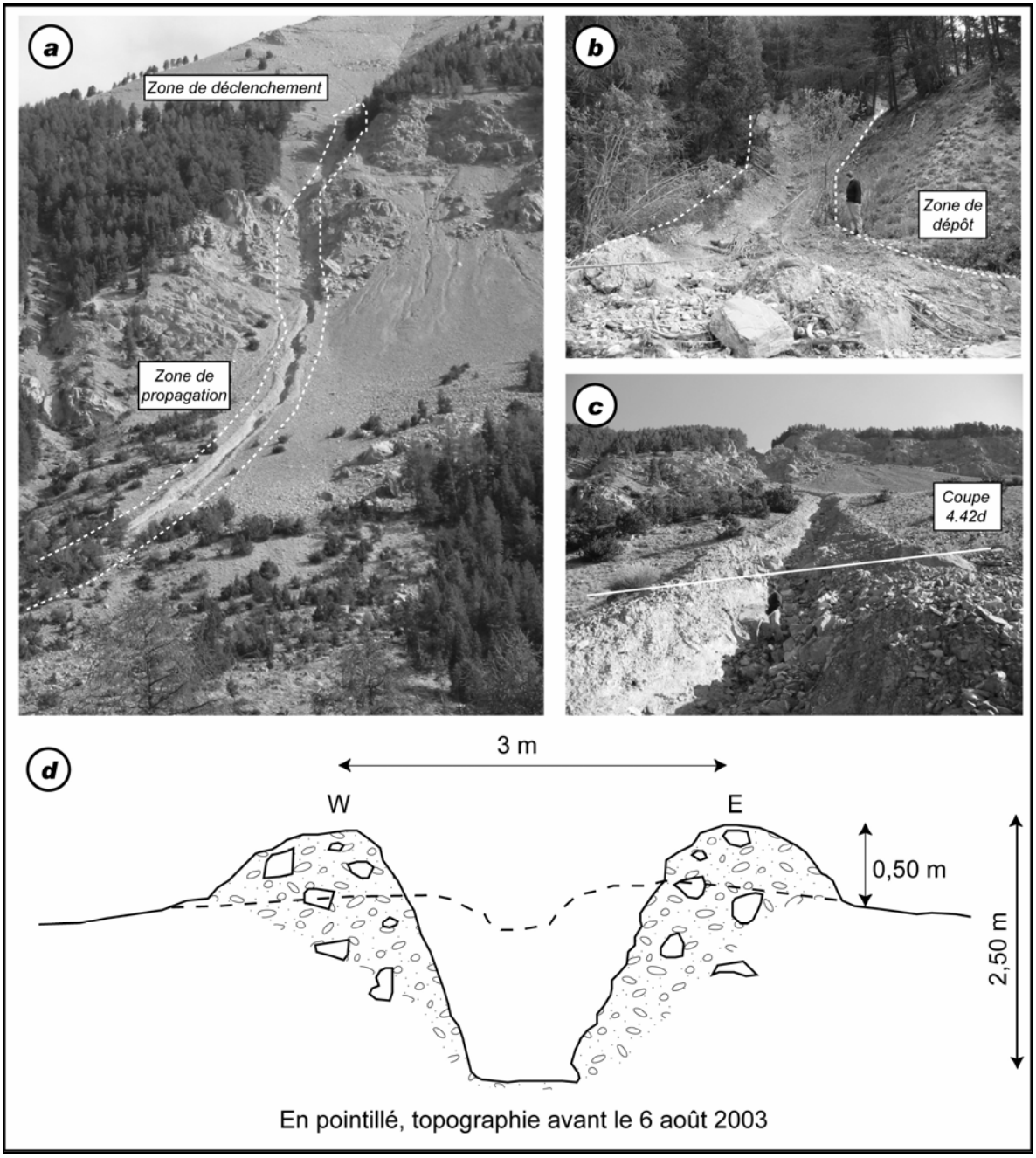


Figure 4.44 *: Morphologie du talweg des Trois Hommes après la lave torrentielle du 5 août 2003.*

a : vue générale sur la partie haute et médiane du versant ;
b : vue sur la confluence entre le talweg des Trois Hommes et le torrent de Faucon ;
c : vue sur le talweg incisé dans le tablier d'éboulis ;
d : coupe transversale du talweg en partie médiane.

Les traces du passage d'une lave torrentielle sont visibles sur l'ensemble du profil du ravin des *Trois Hommes* (Fig. 4.44a) :

- a la confluence avec le torrent de *Faucon*, les dépôts encombrent toute la partie basse du ravin des *Trois Hommes*. Ils prennent la forme d'un éventail, épais de 0.50 à 1.50 m. Le ravin est comblé par des dépôts très grossiers et cimentés en surface (Fig. 4.44b) ;

- a l'amont du seuil 6, les dépôts semblent indiquer que la lave s'est déportée sur le flanc gauche ; elle a ainsi quitté le ravin en incisant un petit chenal en V profond d'environ 0.50 m plus ou moins parallèle au ravin. Le petit chenal est souligné par deux levées latérales ;

- a l'amont du seuil 9, à l'altitude 1950 m, les traces d'incisions décrivent un brusque coude en s'éloignant du talweg principal et en s'écoulant et s'encaissant sur le versant boisé adjacent ;

- a l'altitude 1975 m, une diffluence permet l'étalement en plusieurs petits chenaux de laves sur une largeur maximale de 15-20 m ; ces chenaux rejoignent le ravin principal des *Trois Hommes* vers 1950 m d'altitude ;

- a l'amont la lave s'est incisée, en un chenal unique, dans le tablier d'éboulis avec des levées parfois hautes de plus de 2 mètres (Fig. 4.44c et d).

4.2.4. Conclusion

L'observation morphologique fine du torrent de *Faucon* et de deux de ses affluents (le torrent de *Champerousse* et le ravin des *Trois Hommes*) en 1998, 2002 et 2003 a permis de découper le torrent en zones homogènes (sept zones pour le torrent *Faucon*, trois zones pour le torrent de Champerousse). Pour les deux laves de 1996 et de 2003, les différentes zones ont eu des fonctionnements parfois différents : zones de dépôt, d'incision ou les deux (Tab. 4.7). L'interprétation de ces événements et l'analyse du fonctionnement de ces zones seront évoquées dans le chapitre 6.

Tableau 4.7 *: Fonctionnement des zones homogènes lors des deux laves torrentielles de 1996 et 2003 sur le torrent de Faucon.*

Zone	***Lave de 1996***	***Lave de 2003***
A	Dépôt	Dépôt
B	Dépôt	Dépôt et incision
C	Dépôt et incision	Incision
D	Dépôt	Incision
E	Dépôt et incision	Dépôt
F	Pas de fonctionnement	Pas de fonctionnement
G	Pas de fonctionnement	Pas de fonctionnement

Les observations ont été précautionneusement cartographiées avec le logiciel SIG en associant chaque formation 'source' à des caractéristiques géomécaniques et rhéologiques et à des épaisseurs pour permettre faciliter les calculs de volume (Chapitre 6). De nombreuses instabilités ont été observées le long du chenal du *Faucon* ; certaines d'entre elles pouvant potentiellement déclencher ou alimenter une lave torrentielle. Dans la section suivante, une de ces zones d'instabilité, le glissement de *Champerousse*, a fait l'objet d'une étude détaillée.

4.3. Etude détaillée du glissement de terrain de Champerousse : zone source potentielle de laves torrentielles

Le versant de rive gauche du torrent de *Faucon* connaît une instabilité dans la zone de *Champerousse*. Un glissement de terrain, repéré pour la première fois en 1995, s'est réactivé en 1999 (informations Service RTM). Plusieurs escarpements et fractures ouvertes sont bien visibles, notamment sur les chemins d'accès. Dans la partie sous forêt, les traces d'instabilités sont moins facilement perceptibles (escarpements, arbres penchés dans toutes les directions - forêt ivre -, …). La zone d'instabilité déclarée s'étend approximativement entre les altitudes 1935 m et 1800 m pour une pente moyenne proche de 25°, avec un minima de 20° et un maxima de 35°. Après avoir décrit les principaux désordres et donné une interprétation à partir des observations, les différentes investigations sont présentées. Les différentes observations morphologiques ont été réalisées en 1998, 2000 et 2001. Pour suivre l'évolution des désordres, un réseau de repères topographiques a été implanté sur un chemin pédestre. Les principales limites ont été définies au topofil, à la boussole et au GPS. Elles sont reportées sur la figure 4.45.

4.3.1. Les principaux désordres observés

La zone instable est en grande partie sous forêt mais concerne également une zone correspondant à un ancien couloir d'avalanches. Les quelques arbres et la végétation pionnière facilitent les observations dans cette zone. L'autre particularité de cette zone est d'être traversée par trois chemins d'accès étagés depuis la couronne jusqu'en partie inférieure : plusieurs observations ont été faites le long de ces chemins. La zone d'instabilité déclarée est décrite de l'amont vers l'aval (Fig. 4.45).

4.3.1.1. Les escarpements en aval du chemin pédestre vers Soleil-Bœuf (E1, E2 et E3).

L'escarpement E1 est situé à 20 m en contrebas du chemin pédestre menant à la crête de Soleil-Bœuf, et à une altitude de l'ordre de 1960 m. Dans cette zone déprimée, un escarpement affecte en partie une dalle de flyschs qui apparaît distinctement en contrebas (Fig. 4.46a). Pour 2 à 3 m de large et 1.50 à 2.50 m de dénivellation, cet escarpement s'étend sur plusieurs dizaines de mètres selon un tracé en arc de cercle plus ou moins régulier. A l'aval, un chaos de blocs s'étend sur près de 80 m ; les arbres présentent un port très anarchique caractéristique d'une zone instable (forêt ivre).

L'escarpement E2 est situé en limite forêt-couloir d'avalanche, sur quelques mètres de longueur selon une direction N 55°-60° ; la hauteur de l'escarpement varie entre 20 et 30 cm. Il semble se prolonger vers l'Ouest, sans que des traces soient clairement perceptibles.

Un second escarpement est situé à la limite forêt-couloir d'avalanche. **L'escarpement E3** suit grossièrement la courbe de niveau 1935 m sur une quarantaine de mètres de longueur. Sa dénivellation varie entre 0.75 m et 1.50 m, elle s'accentue vers l'Est. Les terrains affectés sont constitués par une formation superficielle issue de la désagrégation des flyschs (FS03). Michel Peyron (RTM Barcelonnette) suit depuis Août 1998 l'évolution de cet escarpement en relevant l'écartement entre six couples de points répartis de part et d'autre de la fracture. Entre 1998 et 2004, certains points se sont écartés sur plus de 1.50 m (Fig. 4.46b). Par contre, il est impossible de dire si les points se sont affaissés, en raison d'une part de la nature de la mesure et d'autre part de l'incertitude concernant la stabilité des points à l'amont.

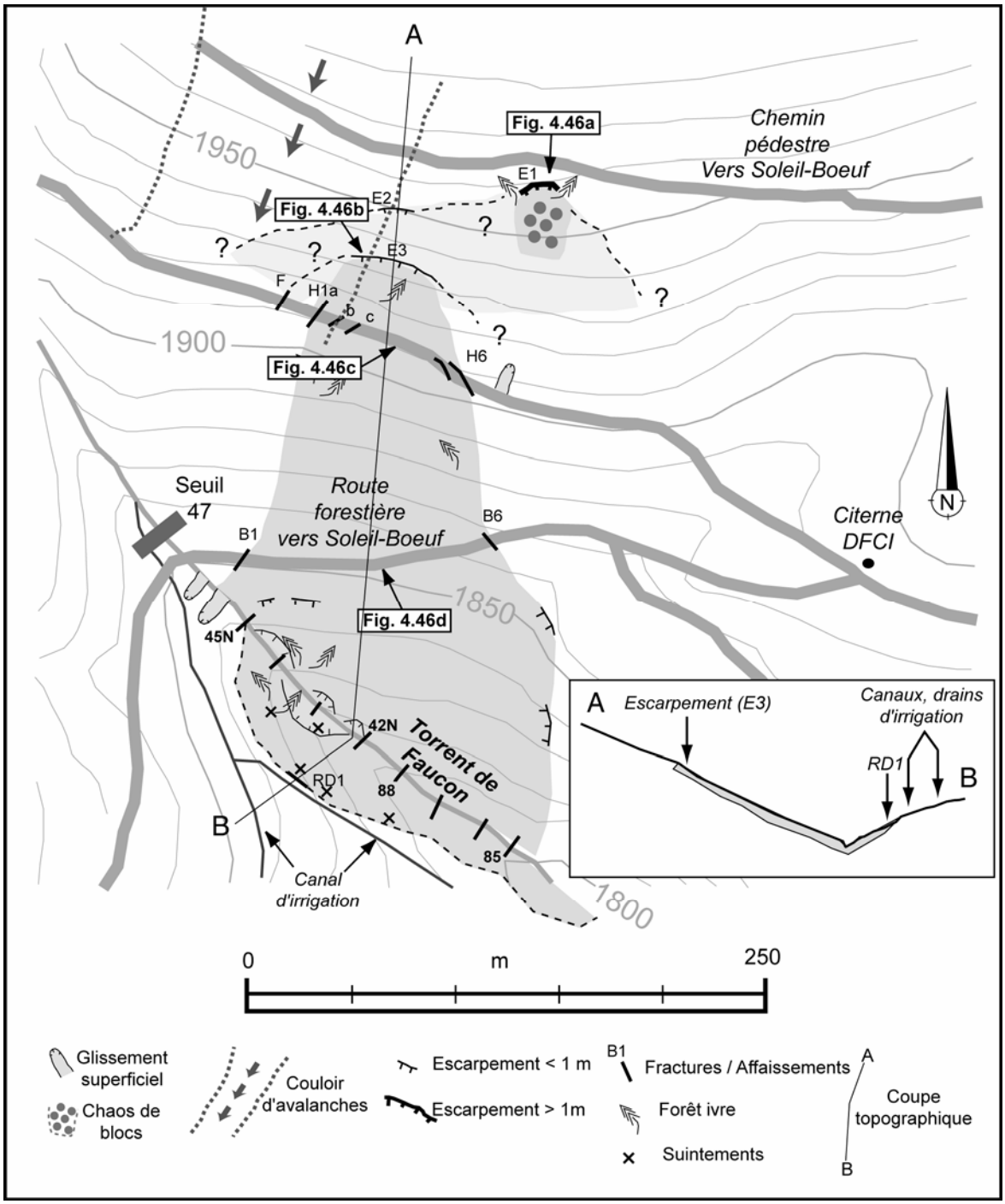


Figure 4.45 *: Morphologie de la zone instable de Champerousse*

4.3.1.2. Les désordres observés sur les chemins

a) Chemin pédestre reliant la citerne DFCI au torrent de Faucon

Ce chemin relie la citerne DFCI au torrent de Faucon ; il traverse la zone en mouvement. De nombreux indices d'instabilités sont visibles : fractures ouvertes, affaissement diffus, coulée boueuse, etc. Deux zones de fractures ouvertes, larges de quelques millimètres à plusieurs centimètres (5 à 20 cm environ) et avec dénivellation variant de 5 à 50 cm, limitent la zone d'instabilité déclarée du flanc ouest (H1a) au flanc est (H6). Cette zone est affaissée sur 0.50 m, elle est parcourue par deux réseaux de fractures discontinues et peu profondes (H1b et H1c).

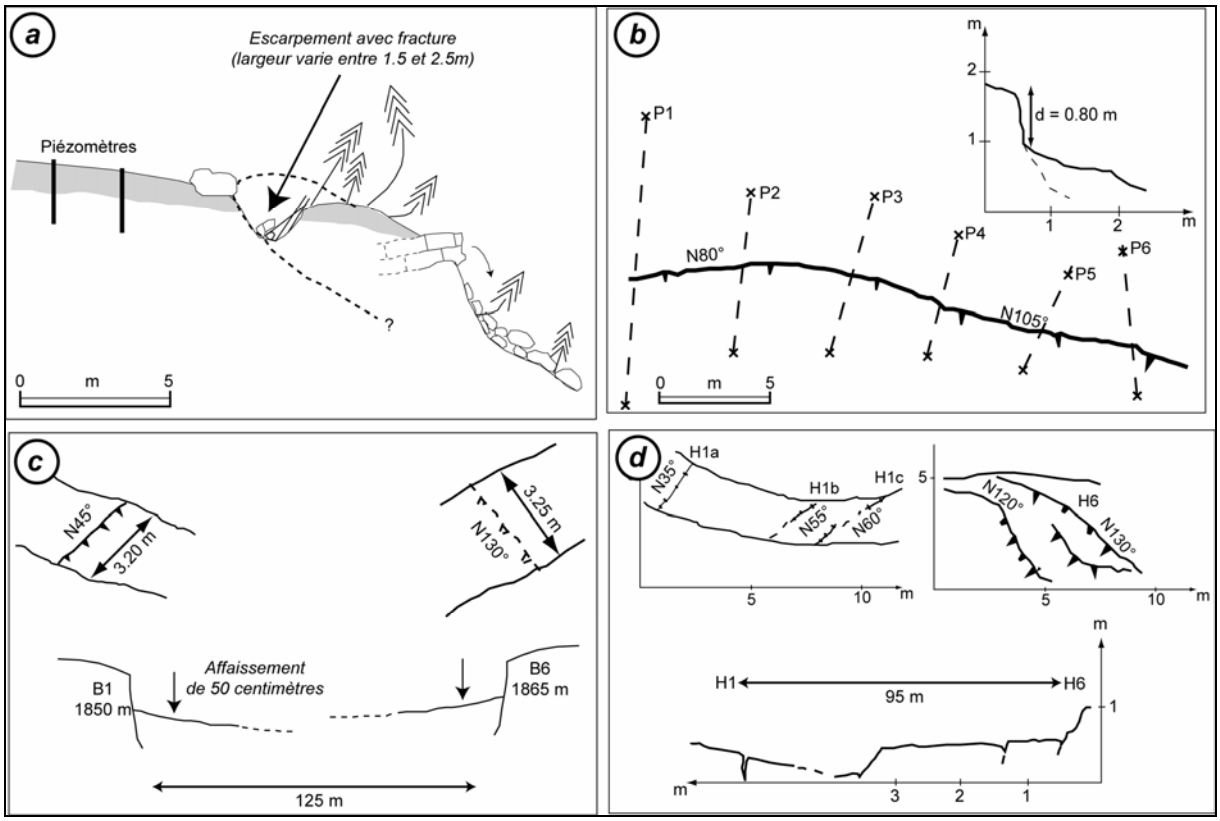


Figure 4.46 *: Morphologie et traces d'instabilités dans le secteur de Champerousse.*

a : coupe de l'escarpement E1 ;
b : vue en plan des six repères topographiques et coupe de l'escarpement E3 ;
c : les fissures du chemin du bas (B1 et B6) ;
d : les fissures du chemin du hau.

En dehors de cette zone affaissée bien repérable, deux secteurs instables peuvent être repérés (Fig. 4.46c). A l'Ouest, à environ 20 m de H1a, un léger affaissement sans rupture est observé (noté F) ; à l'Est, à une vingtaine de mètres de H6, le chemin est coupé par une coulée boueuse avec de nombreuses blocailles. Sa niche d'arrachement, située à 30 m au dessus du chemin, a un tracé en arc de cercle et s'étend sur 15 m de large.

En juillet 2002, un forage de reconnaissance a été réalisé sur le chemin (Fig. 4.47), à quelques mètres de la fissure H6 (Fig. 4.45). Le forage a été équipé d'un tube piézométrique. Le forage montre deux couches distinctes : une formation de pente sableuse développée dans les flyschs (épaisseur de la formation, 6 m environ) et les marnes noires. Une couche de marnes noires altérée fait office de transition entre les deux couches.

b) Route forestière vers Soleil-Bœuf (B1 et B6)

En Juillet 2001, deux zones de fractures ont été observées sur la route forestière menant à la crête de Soleil-Bœuf. Ces deux zones de fractures délimitent un secteur affaissé sur une longueur de 125 m (Fig. 4.46d).

A l'Ouest, un escarpement (B1) coupe la route forestière sur un dénivelé de 0.50 m ; à l'Est, un léger affaissement (B6) d'une dizaine de centimètres sans rupture nette et orienté N 130° coupe la route forestière. La fréquente utilisation de cette route par des véhicules a sensiblement atténué les escarpements rendant (1) difficile des observations précises et (2) impossible la mise en place d'un réseau de surveillance.

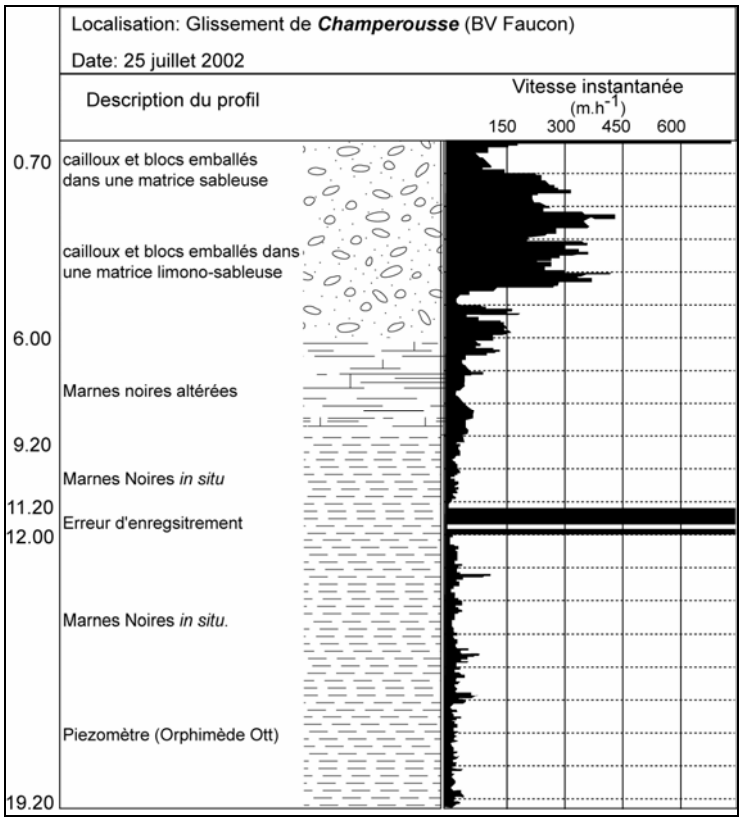


Figure 4.47 *: Sondage de reconnaissance géologique et géotechnique sur le site de Champerousse.*

4.3.1.3. La base du versant et les berges du Faucon

En aval de la route forestière vers Soleil-Bœuf, et jusqu'au chenal torrentiel de Faucon (entre 1850 et 1800 m d'altitude environ), de nombreuses traces d'instabilités sont observables :

- des fractures, nombreuses et orientées perpendiculaire à la plus grande pente, affectent le versant juste en contrebas de la route forestière. A cet endroit, les pentes sont plus fortes, dans la continuité de l'affaissement observé en B6 ;

- des fissures, orientées parallèlement aux courbes de niveaux. Dans ce secteur, la majorité de la forêt est ivre, de plus de nombreux chablis ont été observés. Les paquets glissés sont venus s'accumuler le long de la berge du torrent de Faucon. La base du versant est entaillée ; les berges sont escarpées et instables, elles sont fortement sapées par le torrent.

4.3.1.4. Le versant de rive droite

Le secteur situé en face du glissement de *Champerousse*, en rive droite, est également instable, et menace plusieurs seuils torrentiels. Les limites du glissement ont été cartographiées (Fig. 4.45) sur la base de nos observations et d'un relevé GPS. Le glissement a une longueur de 30 m environ, sa largeur varie entre 20 m en partie haute et 150 m en partie basse. Le pied du glissement s'étend entre les seuils 45N (1840 m) et 85 (1813 m). Les terrains affectés sont des formations périglaciaires (FS01) et des marnes noires (FS03). Au pied du glissement, la morphologie est caractérisée par un important sapement. Plusieurs petits glissements de berge sont observés dans ce secteur. En partie haute, à l'exception d'une fracture (RD1, Fig. 4.45), longue d'une dizaine de mètres et large de quelques cm, aucune trace nette d'escarpement n'a été observée. La profondeur du

glissement est de 2 à 3 m, elle correspond grossièrement à l'épaisseur des moraines qui glissent sur les marnes noires.

De nombreuses zones de suintement et d'écoulement ont été observées en partie supérieure. Ces zones 'humides' sont à mettre en relation avec des fuites du canal d'irrigation et/ou avec une dégradation d'anciens drains situés à l'amont du secteur *des Clots*, juste au dessus de cette zone instable (ce drainage est indiqué sur un plan ancien datant de la fin du 19ème siècle). A la suite des premiers désordres (au courant des années 1990 ?), l'ONF a procédé à la coupe des arbres à haut jet pour en exploiter le bois. Au moment de la construction des nouveaux seuils en 2000, cette zone instable a été drainée par une série de fossés en épi.

4.3.2. Activité du glissement

Afin d'estimer la cinématique du glissement de *Champerousse*, un réseau de nivellement a été mis en place sur le chemin du haut (Fig. 4.48). Ce réseau composé de 63 repères a fait l'objet de cinq campagnes de nivellement entre 2001 et 2003 :

- 52 piquets ;
- 8 clous d'arpentage ;
- 3 repères 'naturels' : blocs scellés dans le sol.

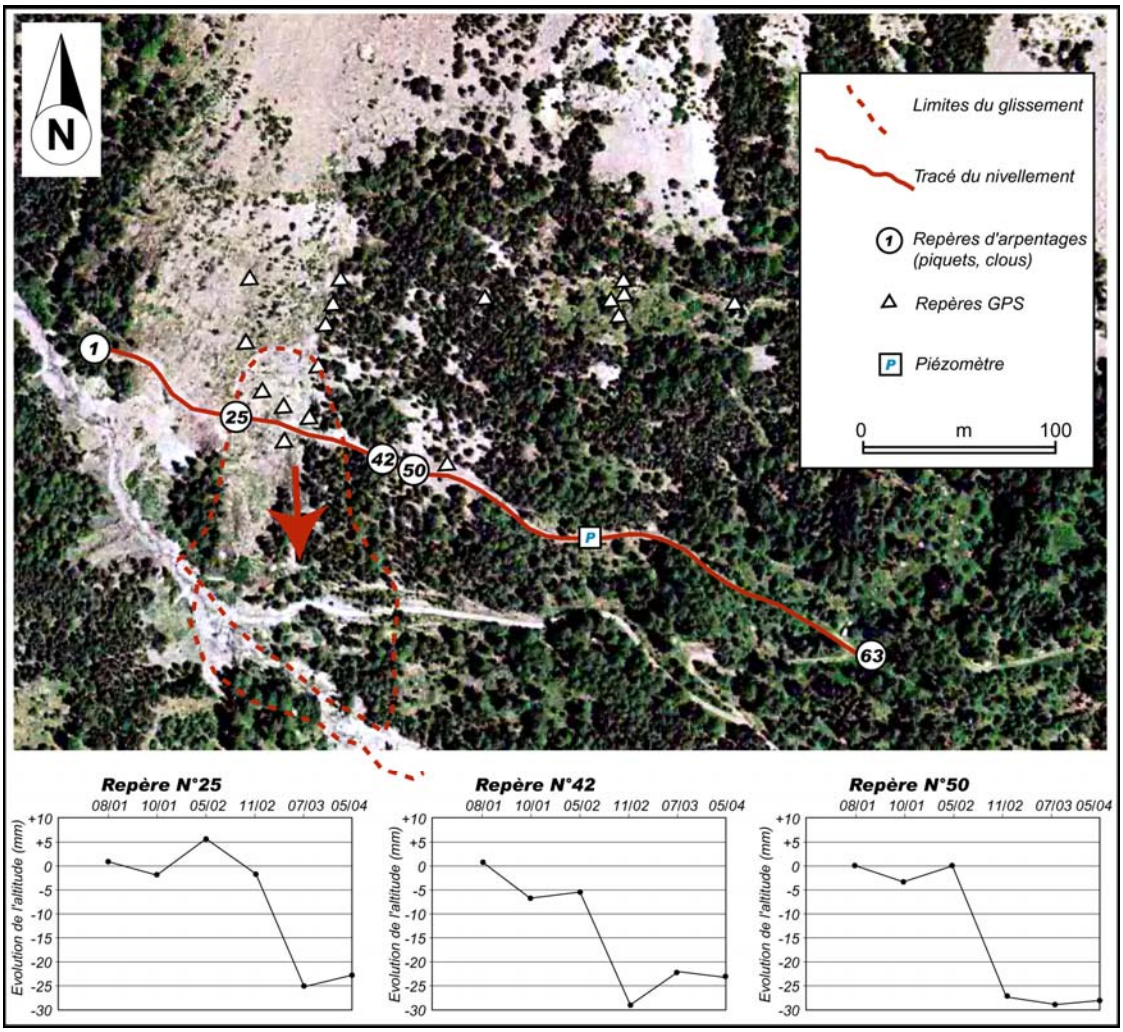


***Figure 4.48** : Localisation du tracé du nivellement et des repères GPS et dynamique de trois repères de 2001 à 2003.*

Sur les 63 repères, seuls une dizaine ont connu une activité, et trois d'entre eux (repères 25, 42 et 50) se sont affaissés de 2 à 4 cm entre mai 2002 et juillet 2003. Ces trois repères sont situés à proximité immédiate des fissures H1 et H6, le repère 25 au niveau de H1, les repères 42 et 50 de part et d'autre de H6.

Néanmoins, l'activité du glissement de *Champerousse* n'a pas été très significative. Ceci a été confirmé par des observations morphologiques et deux relevés GPS sur 17 repères (Fig. 4.48). Entre les deux relevés, les 17 points sont restés stables.

4.4. Conclusion du chapitre 4

L'étude morphologique 'fine' en 1996, 2002 et 2003 du chenal torrentiel du Faucon a permis

- de découper le torrent en zones 'homogènes' ;
- d'identifier des zones fonctionnelles durant les événements : des zones où le dépôt prédomine et des zones où l'incision prédomine.

Sur la base des observations, les événements de 1996 et 2003 s'apparentent à des laves torrentielles et l'événement de 2002 à une crue torrentielle. Pour valider ces observations, et pour proposer des hypothèses sur les mécanismes et les conditions de déclenchement, de contribution et de dépôts de ces événements, il est nécessaire de définir les caractéristiques **'physiques'** des matériaux (Bonnet-Staub, 1998 ; Sorgi-de-Gennaro, 1999 ; Bardou, 2002). Cette caractérisation physique (granulométrie, pétrographie, comportement hydrodynamique et rhéologique) concerne :

- les dépôts torrentiels associés aux trois événements ;
- les formations superficielles sources.

Cette étude des matériaux est présentée dans le Chapitre 5. La synthèse entre les observations morphologiques (Chapitre 4) et l'étude des dépôts et des matériaux sources (Chapitre 5) sera présentée dans le Chapitre 6.

Chapitre 5 : CARACTERISATION PHYSIQUE, HYDRODYNAMIQUE, GEOMECANIQUE ET RHEOLOGIQUE DES LAVES TORRENTIELLES ET DES FORMATIONS SUPERFICIELLES SOURCES

Dans ce travail, l'étude des laves torrentielles est appréhendée selon leur cinématique. Ainsi, les propriétés **physiques**, **hydrodynamiques**, **géomécaniques** et **rhéologiques** des formations superficielles 'sources' et des dépôts de laves torrentielles sont déterminées pour les trois phases selon le protocole présenté dans le chapitre 1 (Tab. 5.1, 5.2 et 5.3).

Pour la **phase de déclenchement**, l'étude détaillée des formations sources constitue une étape nécessaire pour, par exemple, évaluer les conditions de stabilité de zones sources potentielles en termes notamment de **volumes mobilisables** (Hungr *et al.*, 1984 ; Rickenmann, 1997 ; Jakob *et al.*, 2000). En complément, l'étude détaillée des dépôts de laves torrentielles est essentielle pour la compréhension des mécanismes de déclenchement. En effet, les dépôts d'une lave torrentielle dérivent assez directement des matériaux des zones de déclenchement (Bonnet-Staub, 1998 ; Berti *et al.*, 1999 ; Sorgi-de-Gennaro, 1999 ; Remaître *et al.*, 2005a) ; leur étude permet ainsi de mieux délimiter les zones réelles de déclenchement après un événement dans un bassin versant donné.

Pour **les phases de propagation et de dépôt**, l'intérêt de l'étude des formations superficielles 'sources' et des dépôts de laves torrentielles est tout autre. Il s'agit, dans ce cas précis, de définir par analogie les conditions d'écoulement et de dépôt d'une 'future' lave torrentielle sur la base d'une étude fine du comportement 'fluide' des matériaux d'une lave torrentielle déjà produite (Iverson, 1997a ; Ancey, 2001a ; Malet, 2003).

Les propriétés physiques, hydrodynamiques, géomécaniques et rhéologiques des formations 'sources' et des dépôts de laves torrentielles sont définies en croisant des essais *in-situ* et des essais de laboratoire. Compte tenu de la **nature fragile des '*Terres Noires*'** qui composent une bonne partie des dépôts étudiés, certains essais doivent être adaptés comme l'ont préconisé de nombreux auteurs (Artru, 1972 ; Awongo, 1984 ; Bufalo, 1989 ; Caris et van Asch, 1991 ; Phan, 1993 ; Hermann, 1997 ; Klotz, 1999 ; Maquaire *et al.*, 2003).

En général, l'une des particularités des essais de laboratoire tient au fait qu'ils sont entrepris sur de faibles volumes de matériaux (quelques centaines de cm^3). Mais ce **petit volume** doit être **représentatif** de l'ensemble de la formation échantillonnée (Lambe et Whitman, 1979 ; Leroueil et Hight, 2003, Maquaire *et al.*, 2003). Pour les essais de cisaillement, cela exclut les fractions supérieures à 5 mm environ qui perturbent les résultats ; pour les essais de rhéométrie, cela exclut les fractions supérieures à 0.4 mm. Pour ces raisons, des protocoles d'analyse et des modes opératoires spécifiques sont utilisés (Malet *et al.*, 2002, 2003b ; Maquaire *et al.*, 2003 ; Remaître *et al.*, 2003a) et plus particulièrement pour la détermination de la texture des matériaux (Hey et Thorne, 1981 ; Meunier et Carion, 1987 ; Tacnet *et al.*, 2000) et de leur comportement fluide (Malet *et al.*, 2002 ; Remaître *et al.*, 2003a).

Tableau 5.1 *: Définition des zones sources de déclenchement (II) : analyse des formations sources potentielles in situ et en laboratoire (II.2).*

Etapes	Objectifs	Moyens	Chapitre
II.1 : Cartographie morphodynamique du bassin versant	…	…	**Chapitres 3 et 4**
II.2 : Analyse des formations sources potentielles in situ et en laboratoire	Définir les caractéristiques des formations sources pour : - reconstituer les événements de lave torrentielle ; - la modélisation numérique..	Analyse sédimentologique (granulométrie, pétrographie, etc.) ; Analyse hydrodynamique (infiltrométrie, Ksat, etc.) ; Analyse géomécanique (cisaillement rectiligne, essai Triaxial, etc.).	**Chapitre 5**
II.3. Définition de scénarios de déclenchement	…	…	**Chapitre 7**
II.4 : Analyse des conditions de stabilité …	…	…	**Chapitre 8**

Tableau 5.2 : *Analyse de la phase de propagation (III) : analyse du comportement des laves torrentielles (III.3).*

Etapes	Objectifs	Moyens	Chapitre
III.1 : Morphologie du chenal torrentiel…	…	…	**Chapitre 4**
III.2 : Morphologie des versants contigus…	...	...	**Chapitre 4**
III.3 : Analyse du comportement des laves torrentielles	Définir les lois de comportement des laves torrentielles et de mélanges artificiels de formations sources pour : - reconstituer les événements de lave torrentielle ; - la modélisation numérique.	Analyse rhéologique croisée (rhéométrie, plan incliné, slump tests, etc.) sur : 1) des dépôts de laves torrentielles ; 2) sur des mélanges artificiels de formations sources.	**Chapitre 5**
III.4 : Cartographie et analyse statistique des facteurs…	…	…	**Chapitre 6**
III.5 : Définition de scénarios de propagation	…	…	**Chapitre 7**
III.6 : Analyse numérique de la propagation des laves…	…	...	**Chapitre 8**

Tableau 5.3 : *Analyse de la phase de dépôt (IV) : analyse du comportement des laves torrentielles au cours de la phase de dépôt (IV.4).*

Etapes	Objectifs	Moyens	Chapitre
IV.1 : Morphologie du chenal torrentiel …	…	…	**Chapitre 4**
IV.2 : Topographie du cône de déjection.	…	...	**Chapitre 4**
IV.3 : Inventaire et description des éléments…	…	...	**Chapitre 4**
IV.4 : Analyse du comportement des laves torrentielles au cours de la phase de dépôt	cf étape III.3, Tab. 5.2	cf étape III.3, Tab. 5.2	**Chapitre 5**
IV.5 : Analyse numérique de l'étalement des laves	…	…	**Chapitres 7 et 8**

Les caractérisations présentées dans ce chapitre répondent aux objectifs principaux donnés dans les tableaux ci-dessus. Il est ainsi nécessaire de :

- **localiser** et **décrire** des dépôts de laves torrentielles ;
- identifier **le type** de laves torrentielles par **l'analyse sédimentologique** des dépôts ;
- identifier **les matériaux sources** des laves torrentielles en comparant leurs caractéristiques **sédimentologiques** (granulométrie et pétrographie) à celles des formations superficielles 'sources' ;
- définir **le comportement géomécanique** des matériaux sources par des analyses en laboratoire et des essais *in-situ* ;
- définir **les lois de comportement rhéologique** des dépôts de laves torrentielles par l'utilisation de plusieurs méthodes rhéologiques (rhéométrie, slump tests, essais au plan incliné) ;
- identifier **le comportement de laves torrentielles** déclenchées à partir de **plusieurs matériaux sources** à l'aide d'essais rhéologiques sur des **mélanges artificiels** de formations superficielles 'sources'.

La section 5.1. est consacrée à la présentation de la stratégie de caractérisation et des critères de description des matériaux (rappels des objectifs, modes opératoires et matériaux testés). Les échantillons et les dépôts associés sont décrits en termes de morphologie et de géométrie. Pour chaque dépôt, l'environnement et la localisation des échantillons prélevés sont évoqués. La section 5.2 est consacrée à l'analyse des caractéristiques physiques (granulométriques et pétrographiques). La section 5.3. présente les caractéristiques hydrodynamiques des formations superficielles sources. Puis, les sections 5.4 et 5.5 présentent les caractéristiques de résistance respectivement à gradient de cisaillement faible et élevé. Enfin, une synthèse de ces analyses est présentée dans la section 5.6.

5.1. Stratégie de caractérisation des matériaux et description des dépôts

5.1.1. Stratégie de caractérisation des matériaux

Les propriétés physiques des différents matériaux ont été définies en croisant des essais *in-situ* et des essais de laboratoire. Les objectifs peuvent être scindés en deux groupes avec : (1) les objectifs concernant la caractérisation 'initiale' des matériaux, et (2) les objectifs visant à analyser et croiser les caractérisations 'initiales' pour classer les matériaux entre eux et définir des seuils d'écoulement pour les différents matériaux, etc.

Pour la caractérisation 'initiale' des matériaux, les objectifs consistent à définir :

- les plages de variation de paramètres à introduire dans les modèles, en multipliant le nombre d'essais et en croisant les techniques d'investigation (Malet *et al.*, 2003a) ;
- les caractéristiques sédimentologiques (texture, pétrographie, etc.) des dépôts de laves torrentielles et des matériaux sources ;
- les caractéristiques hydrodynamiques des matériaux sources par des essais in-situ complémentaires ;
- les caractéristiques de résistance des matériaux sources en fonction des variations du gradient de cisaillement (de la mécanique des sols à la mécanique des fluides) et de la teneur en eau.

Pour l'analyse et le croisement des caractéristiques 'initiales' pour permettre le classement des matériaux entre eux et la définition de seuils d'écoulement pour les différents matériaux, les objectifs consistent à identifier :

- le type de laves torrentielles par l'analyse granulométrique des dépôts ;
- les matériaux sources des laves torrentielles en comparant leurs caractéristiques sédimentologiques (granulométrie et pétrographie) à celles des formations superficielles 'sources' ;
- le comportement de laves torrentielles déclenchées à partir de plusieurs matériaux sources à l'aide d'essais rhéologiques sur des mélanges artificiels de formations superficielles 'sources'.

Ainsi, plusieurs modes opératoires ont été mis en oeuvre. Les essais ont été réalisés selon les protocoles standards décrits par *ASTM* (*American Society for Testing and Materials*), *AFNOR* (*Association Française de Normalisation*) et *SNV* (*Association Suisse de Normalisation*). Rappelons que certains de ces protocoles ont été adaptés pour tenir compte de la nature fragile des '*Terres Noires*' (Maquaire *et al.*, 2003). Les caractéristiques suivantes ont été définies :

- *physiques* (granulométrie des éléments constituants, limites d'Atterberg, % de $CaCO_3$, densité humide et sèche, pétrographie des éléments constituants) ;
- *hydrodynamiques* (conductivité hydraulique à saturation, conductivité hydraulique non saturée, courbe de rétention hydrique) ;
- *mécaniques* (cisaillement rectiligne et triaxial) ;
- *rhéologiques* (rhéomètre plan/plan et coaxial, slump tests, plan incliné).

5.1.2. Localisation, description et nomenclature des échantillons testés

Les propriétés physiques, hydrodynamiques, géomécaniques et rhéologiques sont déterminées sur différents échantillons. Ces échantillons ont été prélevés à la fois dans des dépôts de laves torrentielles et dans des formations superficielles susceptibles de participer au déclenchement d'une lave torrentielle. Les échantillons de laves torrentielles ont été prélevés quelques jours, quelques mois ou quelques années après l'événement, il faut donc rester prudent quant à l'interprétation des résultats. Néanmoins, les dépôts de laves sont recouverts par une carapace indurée qui préserve l'essentiel de leur structure et de leur texture et garantie une assez bonne conservation des dépôts.

Les échantillons prélevés dans des dépôts de laves torrentielles proviennent de plusieurs torrents du Bassin de *Barcelonnette* avec la codification suivante entre parenthèses (les trois premières lettres ou les initiales du nom du torrent, et l'année de déclenchement de l'événement torrentiel):

- torrent de *l'**Abe**ous* en 20**03** (**ABE03**) ;
- torrent du *Bourget* en 2003 (BOU03) ;
- torrent de *Faucon* en 1996, 2002 et 2003 (FAU96, FAU02 et FAU03) ;
- torrent du *Riou Bourdoux* (RBX) ;
- torrent du *Riou Chanal* (RC) ;
- torrent des *Sanières* en 2002 (SAN02) ;
- torrent de *Sauze* en 1999 (SAU99 et SAU00).

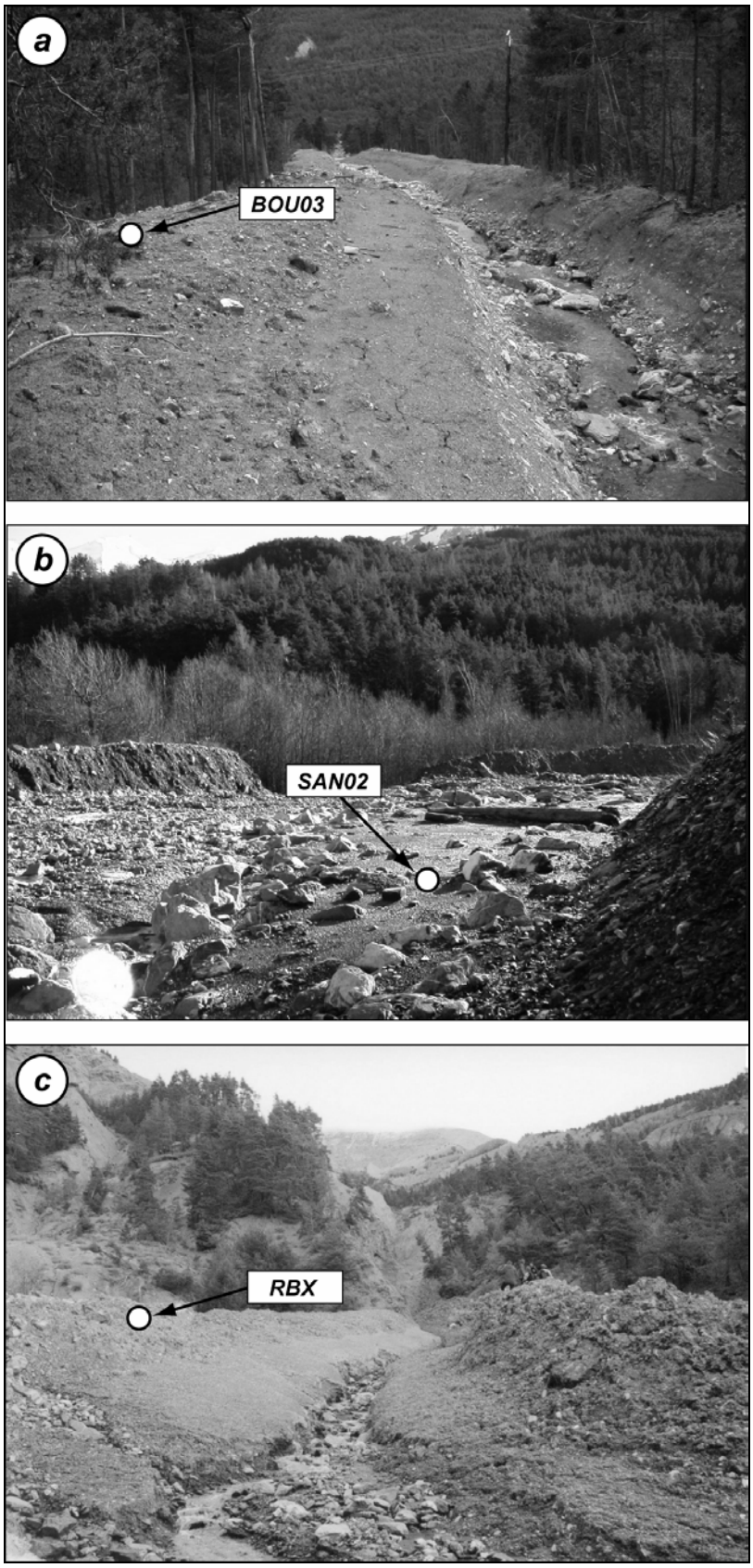


Figure 5.1 *: Situation morphologique des zones de prélèvement des échantillons de dépôts de laves torrentielles, (a) dépôts de débordements sur le torrent du Bourget (BOU03), (b) dépôts de fond de chenal sur le torrent des Sanières (SAN02), et (c) dépôts de levées torrentielles sur le torrent du Riou-Bourdoux (RBX).*

Les dépôts de crue ou de lave torrentielle échantillonnés concernent plusieurs situations morphologiques (Tab. 5.4) ; ils peuvent correspondre à des dépôts **de débordements** (Fig. 5.1a), des dépôts **de fond de chenal** (Fig. 5.1b) ou des dépôts **de levées torrentielles** (Fig. 5.1c).

Leur localisation dans l'appareil torrentiel varie d'un échantillon à l'autre (Fig. 5.2). Ils ont été prélevés indifféremment sur le cône de déjection, dans le chenal torrentiel ou dans le bassin de réception. Les échantillons prélevés dans les torrents de *l'Abeous*, du *Bourget*, du *Riou-Bourdoux*, du *Riou-Chanal*, des *Sanières* et de *Sauze* ont été localisés grossièrement sur la figure 5.2. Les échantillons prélevés dans le torrent de *Faucon* et de *Champerousse* ont été localisés sur la figure 5.3.

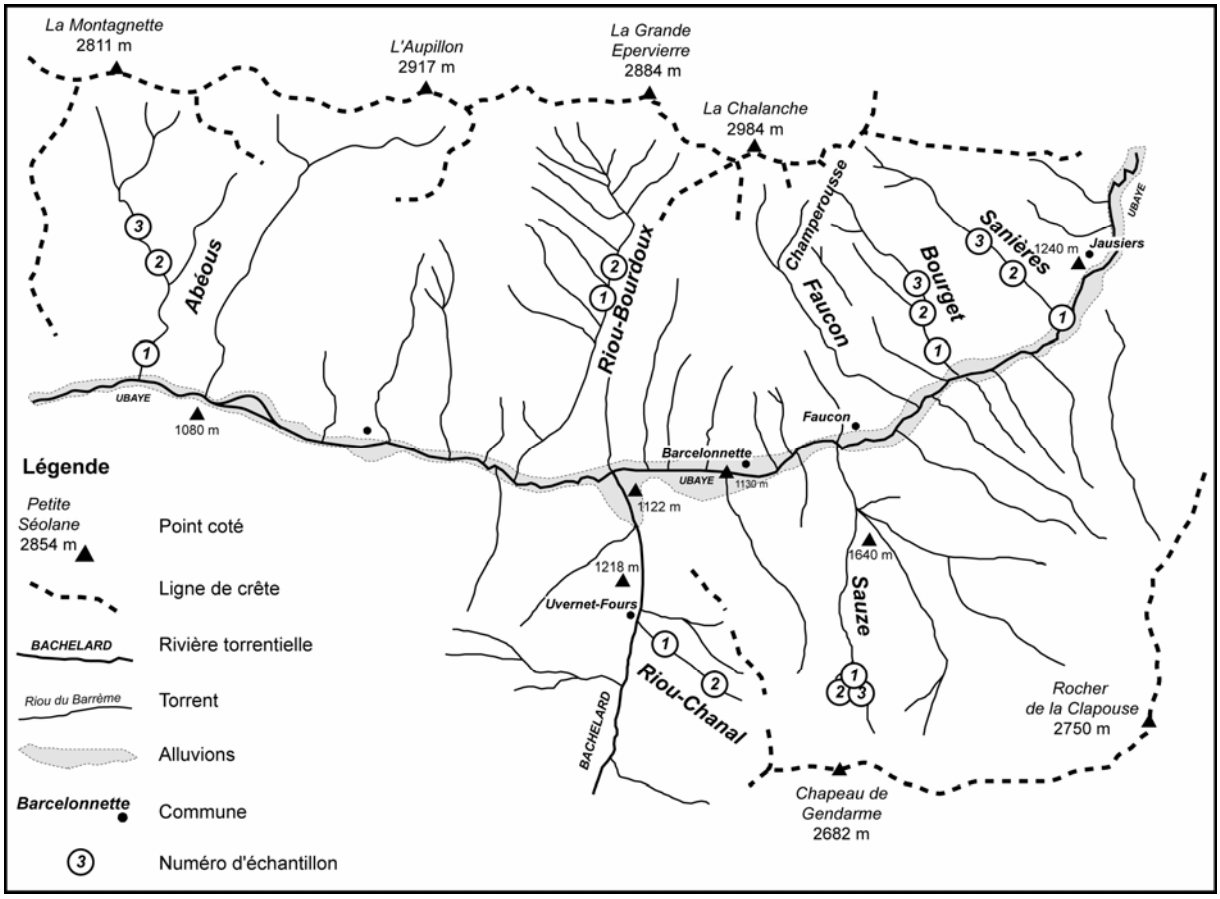


Figure 5.2 *: Localisation des échantillons de dépôts de laves dans les torrents du bassin de Barcelonnette.*

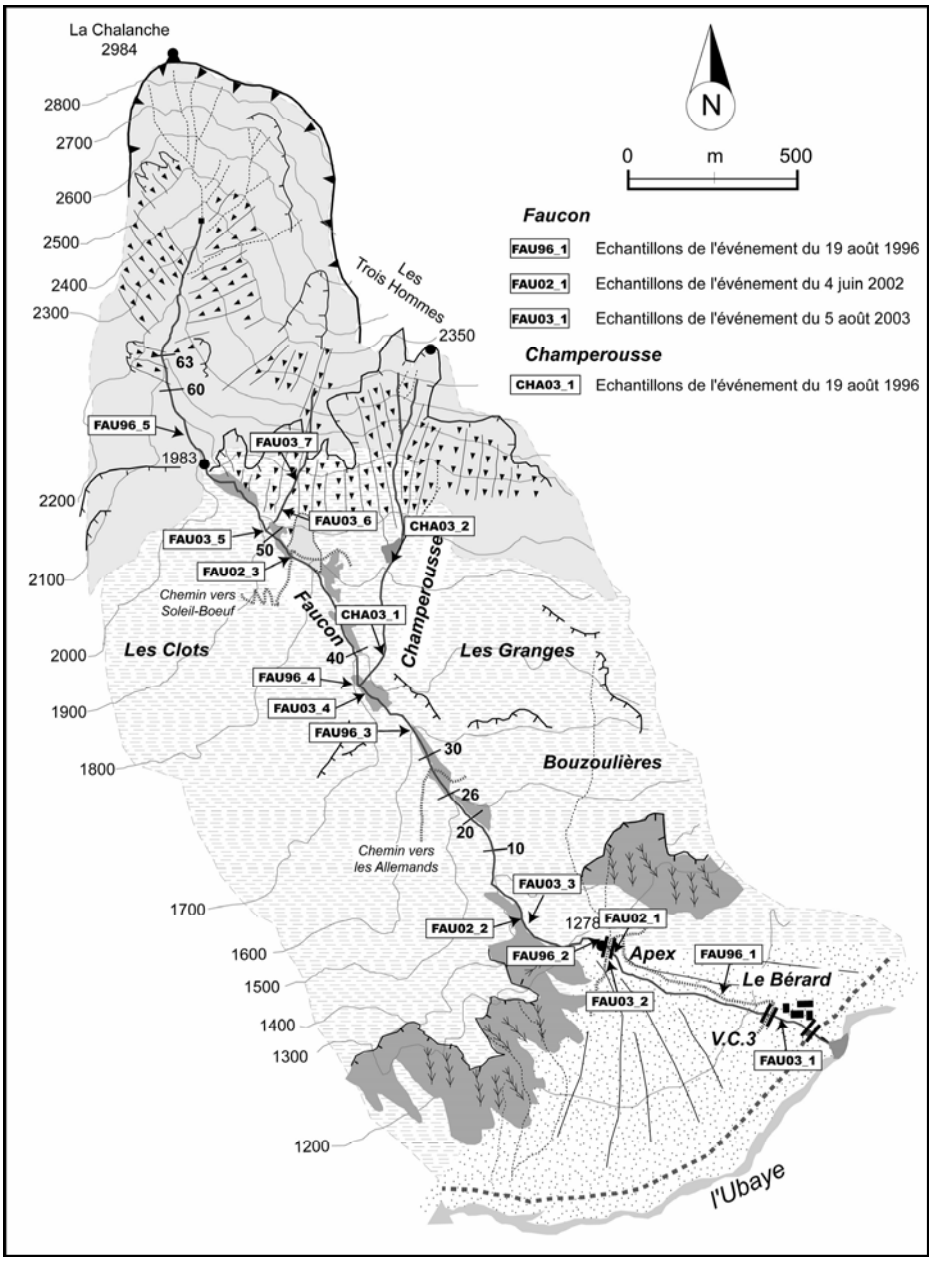


Figure 5.3 *: Localisation des échantillons de lave sur le torrent de Faucon.*

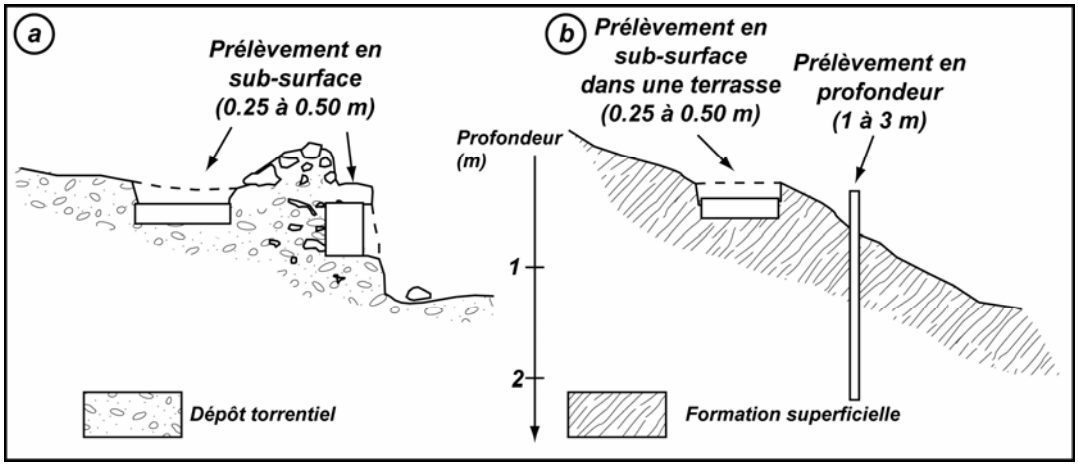


Figure 5.4 *: Mode de prélèvement des échantillons dans un dépôt de lave (a) et dans une formation superficielle (b).*

Tableau 5.4 : *Attributs morphologiques des échantillons de dépôts torrentiels.*

Nom	Bassin versant	N° d'échantillon	Situation géomorphologique	Type
ABE03	*Abeous*	1	Cône de déjection	Dépôt de fond de chenal
		2	Chenal torrentiel	Dépôt de fond de chenal
		3	Chenal torrentiel	Dépôt de fond de chenal
BOU03	*Bourget*	1	Chenal torrentiel	Dépôt de débordement
		2	Chenal torrentiel	Dépôt de débordement
		3	Chenal torrentiel	Dépôts de levée latérale
CHA03	*Champerousse*	1	Chenal torrentiel	Dépôt de fond de chenal
		2	Chenal torrentiel	Dépôt de fond de chenal
FAU96	*Faucon*	1	Cône de déjection	Dépôt de débordement
		2	Chenal torrentiel	Dépôt de fond de chenal
		3	Chenal torrentiel	Dépôts de levée latérale
		4	Chenal torrentiel	Dépôts de levée latérale
		5	Chenal torrentiel	Dépôt de fond de chenal
FAU02	*Faucon*	1	Chenal torrentiel	Dépôt de fond de chenal
		2	Chenal torrentiel	Dépôt de fond de chenal
		3	Chenal torrentiel	Dépôt de fond de chenal
FAU03	*Faucon*	1	Cône de déjection	Dépôt de débordement
		2	Cône de déjection	Dépôt de débordement
		3	Chenal torrentiel	Dépôt de fond de chenal
		4	Chenal torrentiel	Dépôts de levée latérale
		5	Chenal torrentiel	Dépôt de fond de chenal
		6	Bassin de réception	Dépôts de levée latérale
		7	Bassin de réception	Dépôt de fond de chenal
RBX	*Riou-Bourdoux*	1	Chenal torrentiel	Dépôts de levée latérale
		2	Chenal torrentiel	Dépôts de levée latérale
RC	*Riou-Chanal*	1	Chenal torrentiel	Dépôt de fond de chenal
		2	Chenal torrentiel	Dépôt de fond de chenal
SAN02	*Sanières*	1	Cône de déjection	Dépôt de débordement
		2	Chenal torrentiel	Dépôt de fond de chenal
		3	Chenal torrentiel	Dépôts de levée latérale
SS99	*Sauze*	1	Chenal torrentiel	Dépôt de débordement
		2	Chenal torrentiel	Dépôts de levée latérale
		3	Chenal torrentiel	Dépôts de levée latérale

Les formations superficielles sources ont une origine plus variée (Fig. 5.5, Tab. 5.5), néanmoins, elles ont été prélevées en majorité à proximité de l'appareil torrentiel (zones de déclenchement, zones de contribution).

Pour les dépôts de laves torrentielles et les formations superficielles, le prélèvement des échantillons a été réalisé en prenant certaines précautions :

- l'échantillon est prélevé en sub-surface de la formation ou du dépôt (Fig. 5.4). La couche superficielle au contact de l'air a été retirée. En effet, les couches au contact de l'air subissent un lessivage régulier entraînant une migration progressive des éléments fins. Cette migration peut conduire à une sous-estimation de ces éléments fins (argiles, limons et sables fins). Certains échantillons de formations superficielles ont été prélevés à quelques mètres en dessous de la surface, à l'aide d'une tarière ou d'un vibro-percuteur à gouge ;

- des échantillons ont été prélevés à l'état remanié dans des sacs hermétiques et à l'état non remanié dans des trousses de différentes tailles adaptées aux différents essais. ;

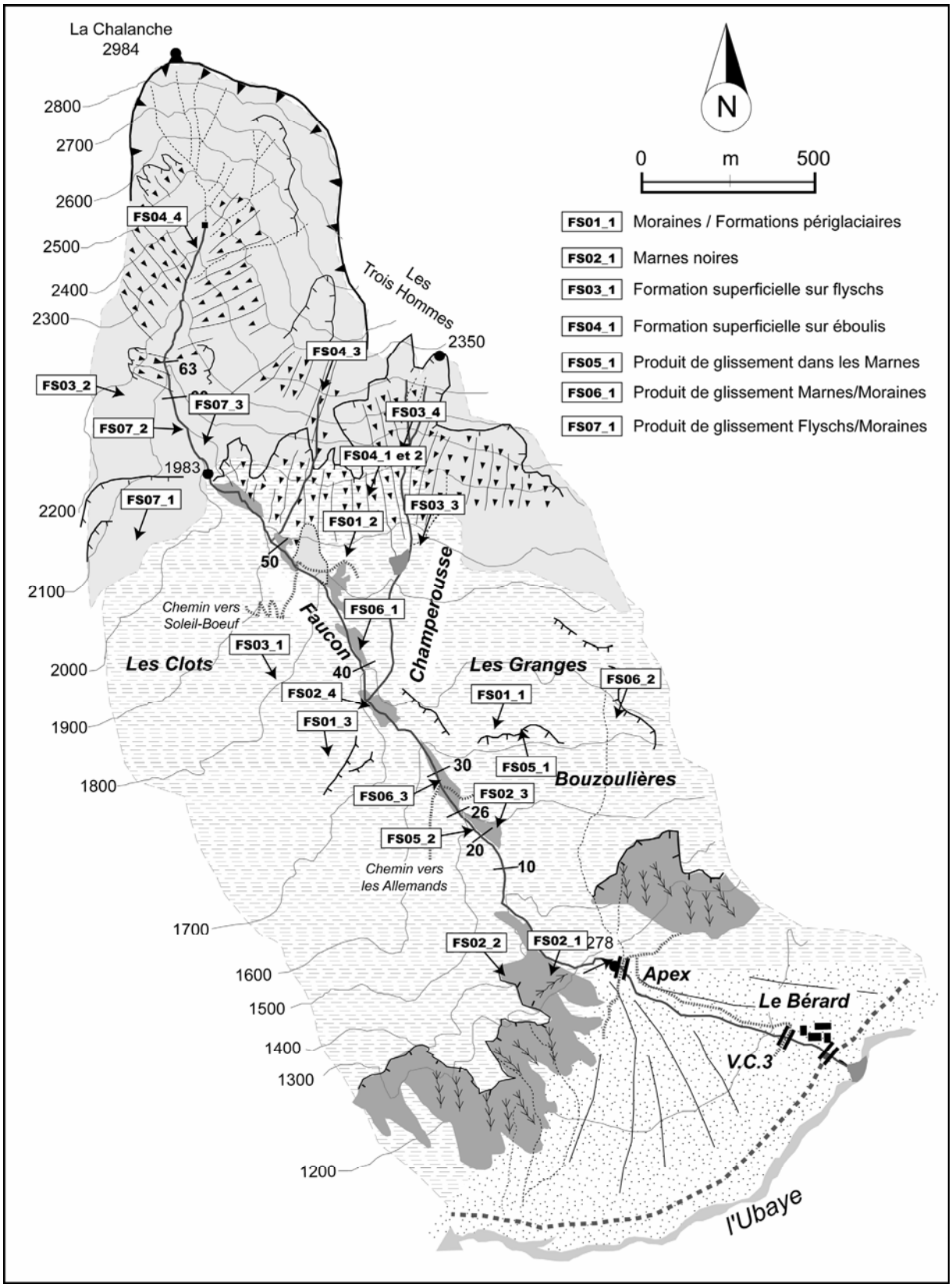


Figure 5.5 *: Localisation des échantillons de formations superficielles 'sources' sur le torrent de Faucon.*

Tableau 5.5 : *Attributs morphologiques des échantillons de formations superficielles 'sources'.*

Nom	Bassin versant	N° d'échantillon	Profondeur de Prélèvement (m)	Situation géomorphologique	Type
FS01	*Faucon (Bouzoulières)*	1	1.0-2.0	Banquette glaciaire	Moraine
	Faucon (Champerousse)	2	0.5-1.0	Colluvion	Moraine/formation périglaciaire
	Faucon (St Flavi)	3	1.0-2.0	Colluvion	Moraine/formation périglaciaire
FS02	*Faucon*	1	0.25-1.0	Colluvion	Marnes noires
		2	0.25-0.50	Altérite/ravinement	Marnes noires
		3	0.25-1.0	Altérite/ravinement	Marnes noires
		4	0.25-0.75	Colluvion	Marnes noires
FS03	*Faucon (Les Clots)*	1	0.5-2.0	Colluvion	Formation de pente sur flyschs
	Faucon (Soleil-Bœuf)	2	0.25-0.75	Colluvion	Formation de pente sur flyschs
	Faucon (Champerousse)	3	0.5-3.0	Colluvion	Formation de pente sur flyschs
	Faucon (Trois Hommes)	4	0.25-0.75	Colluvion	Formation de pente sur flyschs
FS04	*Faucon (Champerousse)*	1	0.25-1.0	Tablier d'éboulis	Formation de pente sur éboulis
	Faucon (Champerousse)	2	0.25-0.75	Couloir d'éboulis	Formation de pente sur éboulis
	Faucon (Trois Hommes)	3	0.25-1.0	Couloir d'éboulis	Formation de pente sur éboulis
	Faucon (La Chalanche)	4	0.25-0.75	Couloir d'éboulis/avalanches	Formation de pente sur éboulis
FS05	*Faucon (Bouzoulières)*	1	0.5-3.5	Glissement de terrain actif	Produit de glissement dans les marnes noires
	Faucon (chenal)	2	0.25-0.75	Glissement de terrain superficiel	Produit de glissement dans les marnes noires
FS06	*Faucon*	1	0.5-1.0	Glissement de terrain superficiel	Produit de glissement marnes noires/moraines
	Faucon (Bouzoulières)	2	0.25-1.0	Glissement de terrain superficiel	Produit de glissement marnes noires/moraines
	Faucon (chenal)	3	0.25-0.75	Glissement de terrain actif	Produit de glissement marnes noires/moraines
FS07	*Faucon (Soleil-Bœuf)*	1	0.5-2.0	Glissement de terrain fossilisé	Produit de glissement flyschs/formations périglaciaires
	Faucon (chenal)	2	0.25-1.0	Glissement de terrain actif	Produit de glissement flyschs/moraines
	Faucon (Trois Hommes)	3	0.5-1.0	Glissement de terrain actif	Produit de glissement flyschs/formations périglaciaires

5.2. Propriétés physiques des matériaux

5.2.1. Caractéristiques sédimentologiques

Les analyses sont réalisées sur des échantillons prélevés dans des dépôts de laves torrentielles ou dans des formations superficielles sources. Les caractéristiques sédimentologiques sont déterminées à partir des résultats des analyses granulométriques et pétrographiques.

5.2.1.1. Caractéristiques granulométriques

Les analyses granulométriques ont d'abord été réalisées **sur le spectre total** de l'échantillon pour ne pas contraindre l'analyse par l'artefact d'une limite d'écrêtage. Puis, les résultats ont été exprimés sur **des échantillons écrêtés à 20 mm** afin de faciliter les comparaisons entre nos résultats et les nomenclatures (§ 1.3.). On rappellera ici que cette limite de 20 mm, qui ne prend donc pas en compte la fraction grossière, a été définie à partir de plusieurs études menées sur la granulométrie (Bonnet-Staub, 1998 ; Sorgi-de-Gennaro, 1999) et la rhéologie (Coussot, 1997 ; Iverson *et al.*, 1997b ; Ancey, 1999, 2001b ; Zhou *et al.*, 1999 ; Hungr *et al.*, 2001, Bardou, 2002) des laves torrentielles. Ces études montrent que pour les laves torrentielles cohésives le comportement de l'écoulement est contrôlé par la matrice et non par les blocs ou les débris qu'elle transporte (§ 1.3.). Pour garder à l'esprit le spectre granulométrique total, les caractéristiques granulométriques de la fraction inférieure ou égale à 20 mm (Tab. 4.6) sont accompagnées du pourcentage de cette fraction sur la fraction [0 - D_{max}]. Dans ce travail, D_{max} varie entre 125 et 330 mm.

Les sols hétérogènes à forte granulométrie comme les moraines, les éboulis, les alluvions ou bien encore l'ensemble des matériaux torrentiels restent paradoxalement relativement peu étudiés du fait principalement des difficultés rencontrés par l'utilisation des méthodes granulométriques classiques (Tacnet *et al.*, 2000). Pour tenir compte de **l'hétérogénéité des matériaux**, Maquaire *et al.* (2003) ont montré que les analyses devaient être effectuées sur un poids de matériau échantillonné compris entre **70 et 110 kg** (Fig. 5.6).

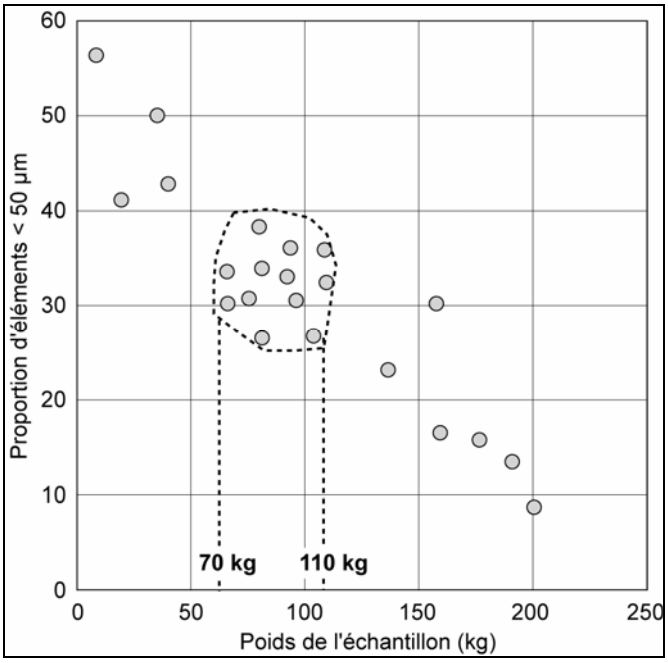


Figure 5.6 *: Relation entre la masse totale sèche de l'échantillon et le pourcentage d'argiles et de limons.*

Un protocole adapté à la fragilité des clastes de marnes noires et qui évite la formation artificielle de particules fines a été adopté (Klotz, 1998 ; Guillon, 2001, Maquaire *et al.*, 2003). Ce protocole implique un processus de tamisage doux qui limite au maximum les frottements et les chocs entre les particules. Ce protocole doit permettre de désolidariser les différents clastes scellés par la matrice silto-argileuse sans provoquer leur fragmentation. Le protocole est le suivant :

- **sur le terrain** : (1) prélever 80 - 100 kg de matériaux ; (2) faire sécher le matériau sur une bâche pour désolidariser les agrégats argileux ; (3) séparer, tamiser et peser chaque fraction (0 - 20 mm ; 20 – 40 mm ; 40 – 80 mm ; etc. entre [0 - D_{max}] ; (4) effectuer un quartage de la fraction inférieure à 20 mm pour en garder entre 30 et 40 kg destinés au laboratoire.

- **au laboratoire** : après un deuxième quartage, lors d'un unique cycle humectation-dessiccation, les différents éléments sont séparés manuellement sous un filet d'eau, puis séchés et tamisés ; les fractions < 0.4 mm sont tamisées par voie humide, la fraction < 0.05 mm est analysée au granulomètre-laser (Coulter LS-230) sans ajout de défloculant ; le refus à 0.4 mm est tamisé manuellement par voie sèche.

a) Les dépôts de laves torrentielles

La distribution granulométrique totale (Tab. 5.6) des **dépôts de laves torrentielles** sur la fraction [0 - D_{max}] montre une grande variabilité. D'importantes variations granulométriques sont observables entre les dépôts provenant de torrents et/ou d'événements différents. Néanmoins, **le trait commun à l'ensemble des dépôts est l'absence d'une classe granulométrique prédominante** (Coussot, 1993 ; Bonnet-Staub, 1998). L'étroitesse du fuseau granulométrique de certains dépôts torrentiels (Fig. 5.7) ou de certaines formations sources (Fig. 5.8) est à mettre en relation avec le faible nombre d'échantillons étudiés et avec les difficultés d'échantillonnage rencontrées principalement sur le terrain. Le lecteur doit ainsi garder à l'esprit que ces fuseaux ne reflètent que partiellement toute la gamme granulométrique de ces échantillons. Ceci avait déjà été souligné par Bonnet-Staub (1998) et Sorgi-de-Gennaro (1999).

Les valeurs moyennes du quartile D_{50} dans les dépôts torrentiels montrent la forte proportion des éléments de taille inférieure à 2 mm dans le mélange. Pour tous les dépôts de laves, le coefficient de mauvais triage S_0 (coefficient de *Trask*, Rivière, 1977), défini par le rapport D_{75}/D_{25}, est très variable ; il peut être exceptionnellement élevé, pouvant atteindre des valeurs de 5000 (Tab. 5.7). **Cette variabilité exprime bien l'hétérogénéité et le faible tri des matériaux de laves torrentielles** (Takahashi, 1991 ; Bonnet-Staub, 1998). D'une manière générale, les matériaux sont caractérisés par l'importance des fractions sableuses et graveleuses ; **l'importance des fractions argileuses et limoneuses dans le mélange est beaucoup plus variable** d'un échantillon à un autre.

Tableau 5.6 : *Distribution granulométrique de la fraction grossière pour les dépôts de laves torrentielles.*

	0 – 20 (%)	20 – 40 (%)	40 – 80 (%)	80 – 160 (%)	160 – D_{max} (%)	D_{max} (mm)
ABE03	33 - 42	13 – 31	22 - 25	17 – 35	0 – 14	210
BOU03	37 - 45	12 – 19	7 - 13	14 – 21	6 – 21	275
FAU96	35 – 53	9 – 18	14 - 27	9 – 21	7 – 25	330
FAU02	28 - 33	22 – 36	18 - 31	14 – 27	0 – 7	180
FAU03	21 - 56	14 – 21	18 - 32	15 – 23	11 – 18	250
RBX	57 - 65	9 – 16	7 - 15	3 – 12	0	145
RC	45 - 58	14 – 19	8 - 23	19 – 24	0 – 9	190
SAN02	23 - 38	19 – 31	16 - 24	18 – 26	13 - 16	295
SS99	37 - 44	10 – 22	4 - 16	6 – 13	4 – 19	315

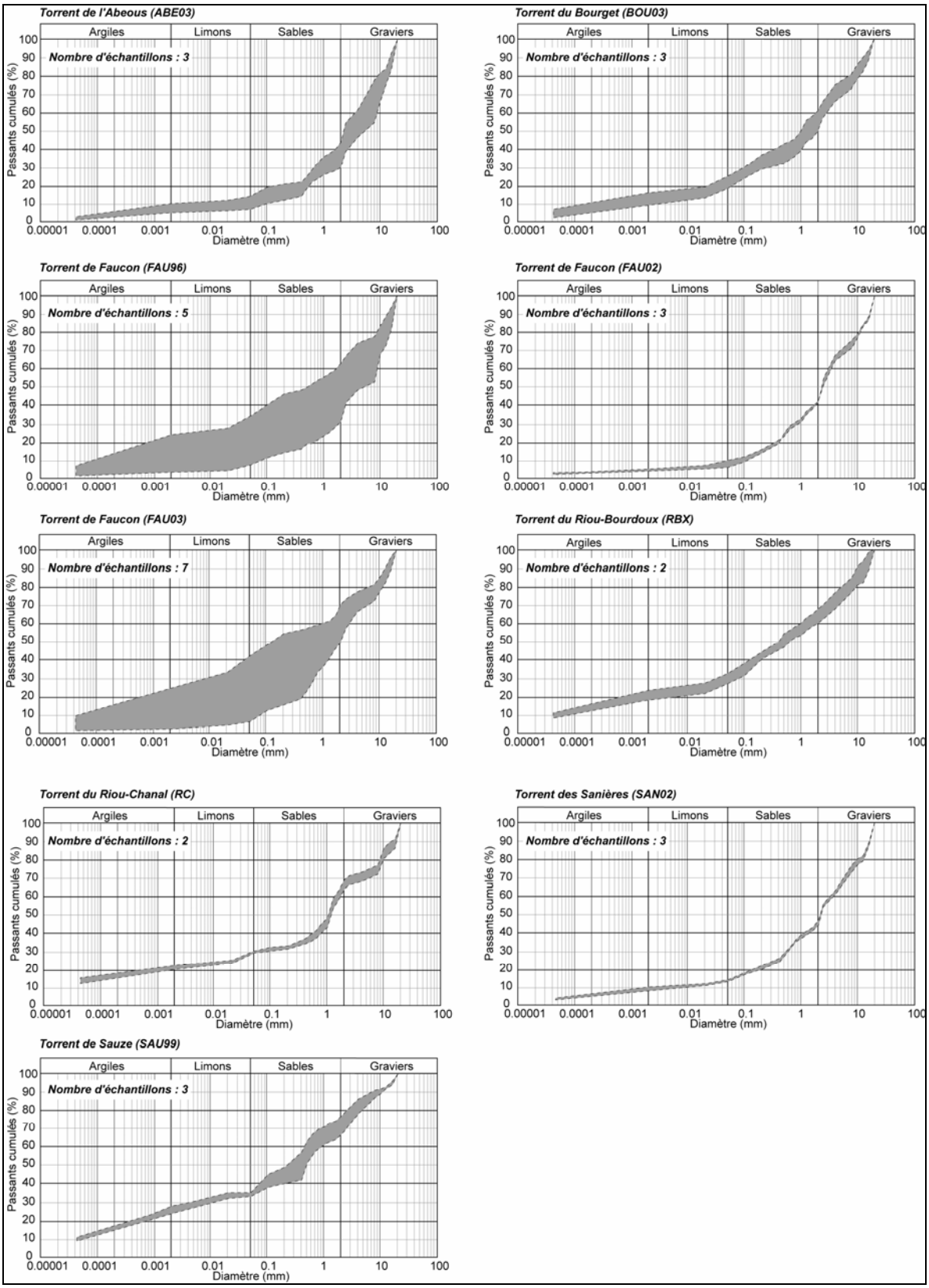


Figure 5.7 *: Fuseaux granulométriques [0 – 20 mm] des dépôts de laves torrentielles.*

Selon la classification de Jamagne (Fig. 5.8a), les dépôts de laves torrentielles étudiés correspondent à **des textures s'étendant des argiles sableuses (AS) aux sables (S)**. Ces dépôts recouvrent ainsi quatre classes texturales : AS, LSA, SA et S. Ils ne comprennent jamais plus de 30% de limons et/ou plus de 45% d'argiles.

Tableau 5.7 : *indices granulométriques pour les dépôts de laves torrentielles.*

	D_{50} (mm)	Indice de Trask (S_0)
ABE03	2.1 – 4.3	14 – 20
BOU03	1 - 2	75 – 105
FAU_96	0.5 - 4	11 – 500
FAU_02	2 – 2.5	16 – 20
FAU_03	0.1 - 2	20 – 5000
RBX	0.4 – 0.7	100 – 2000
RC	1 – 1.25	300 – 500
SAN_02	2.2 – 3.1	20 – 25
SS_99	0.2 – 0.5	800 – 1000

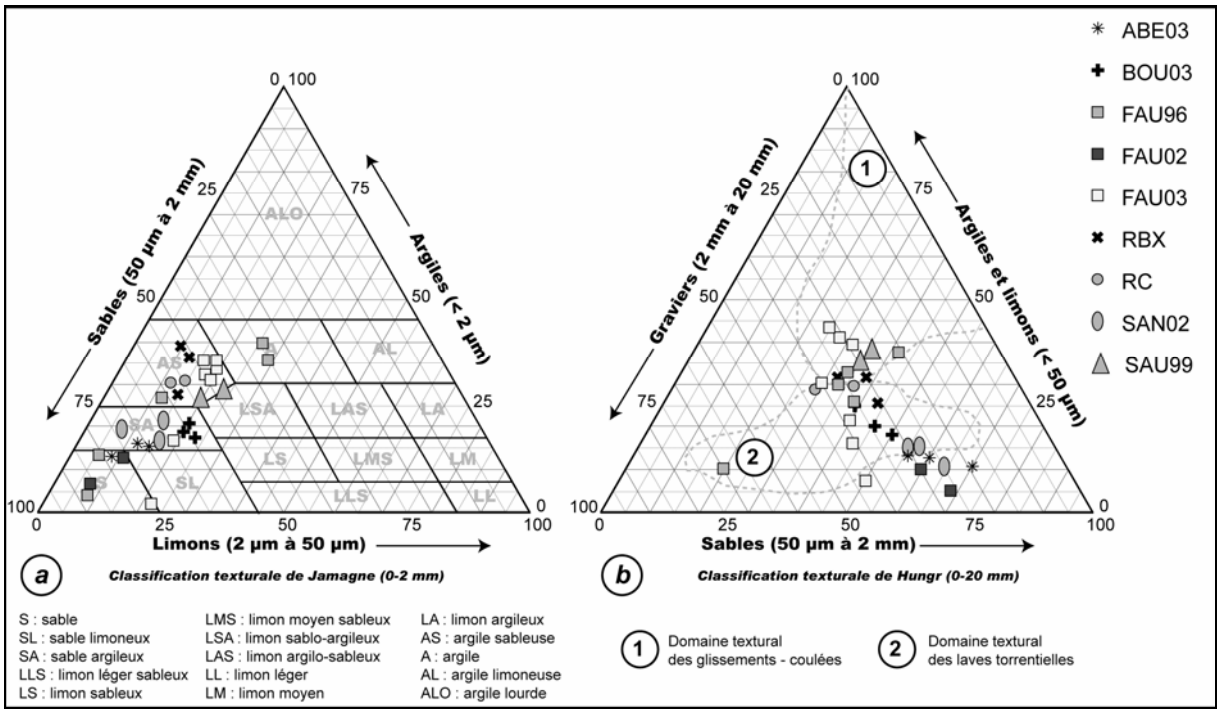


Figure 5.8 *: Texture des dépôts de laves torrentielles (a) classification de Jamagne [0 – 2 mm], (b) classification de Hungr et al. (2001) [0 – 20 mm].*

La grande majorité des dépôts correspond bien à des dépôts de laves torrentielles selon la classification de Hungr *et al.* (2001), alors que d'autres dépôts correspondent à des glissements-coulées, ou bien sortent des limites établies par Hungr *et al.* (Fig. 5.8b). Deux hypothèses peuvent être proposées pour expliquer ceci :

- la première hypothèse est liée aux événements pris en compte dans cette classification. En effet, ils ne sont pas forcément représentatifs de toutes les laves déclenchées dans le monde. Les auteurs ayant essentiellement utilisés des données provenant de torrents situés en Amérique du Nord (Hungr *et al.,* 2001), il convient donc de rester prudent sur la validité de cette classification pour nos sites d'études ;

- la deuxième hypothèse est liée aux matériaux sources. Les dépôts de laves ont un lien génétique étroit avec leurs formations sources (Bonnet-Staub, 1998), les caractéristiques des laves sont donc proches des caractéristiques des matériaux sources. La lave de *Super-Sauze* (SAU99) par exemple, s'est déclenchée à partir d'un glissement-coulée (Malet, 2003) où les formations sont très riches en matériaux fins. Les dépôts de la lave sont donc logiquement riches en matériaux fins, et suffisamment pour apparaître comme 'glissement-coulée' dans la classification.

b) Les formations superficielles sources

L'analyse granulométrique **des sept formations superficielles sources** montre que la nature des échantillons est assez variable. Hormis la formation de pente sur éboulis (FS04), toutes les formations présentent des proportions assez fortes en matériaux argileux et limoneux. Néanmoins, comme pour les dépôts de laves torrentielles, les courbes granulométriques des formations sources se placent dans un large spectre granulométrique (Fig 5.9), avec dans tous les cas un faible tri granulométrique

Ainsi, l'indice de *Trask* présente des valeurs très variables qui se situent dans une gamme de valeur largement aussi étendue que celle des dépôts torrentiels (Tab. 5.8). Les valeurs du quartile 50 sont moins importantes que celles des dépôts torrentiels ; **elles décrivent globalement des matériaux globalement plus fins**, même si le pourcentage d'argiles n'excède pas 15%.

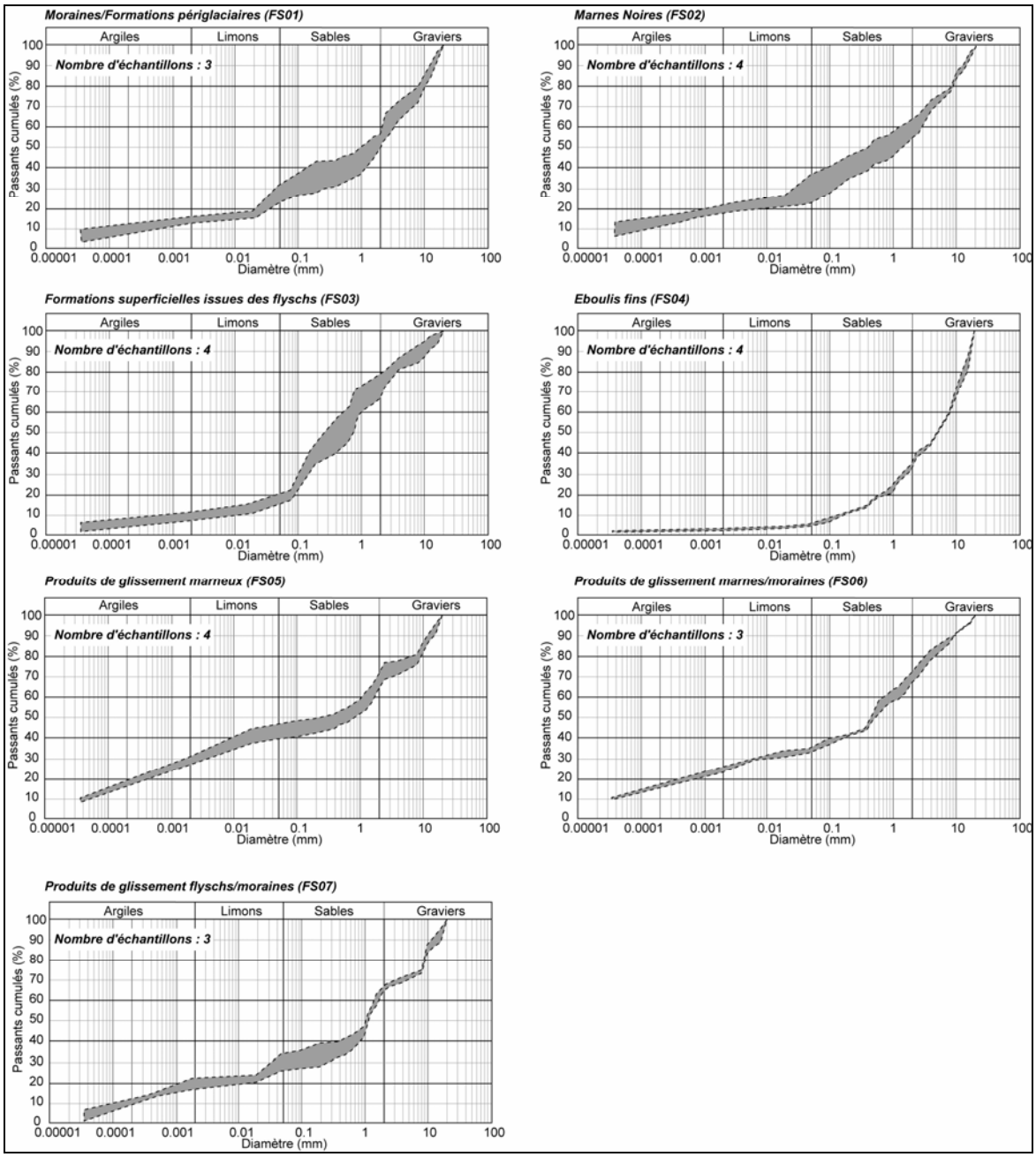


Figure 5.9 *: Fuseaux granulométriques [0 – 20 mm] des formations superficielles sources.*

Tableau 5.8 : *Indices granulométriques pour les formations superficielles sources.*

	D_{50} (mm)	Indice de Trask (S_0)
FS01	1.6 - 2	80 – 450
FS02	0.4 – 1.25	160 – 300
FS03	2.1 – 2.4	50 – 350
FS04	5.6 - 8	10 – 12.5
FS05	0.4 – 0.8	2000 – 4000
FS06	0.2 – 0.63	800 – 2000
FS07	0.63 – 1.25	200 – 400

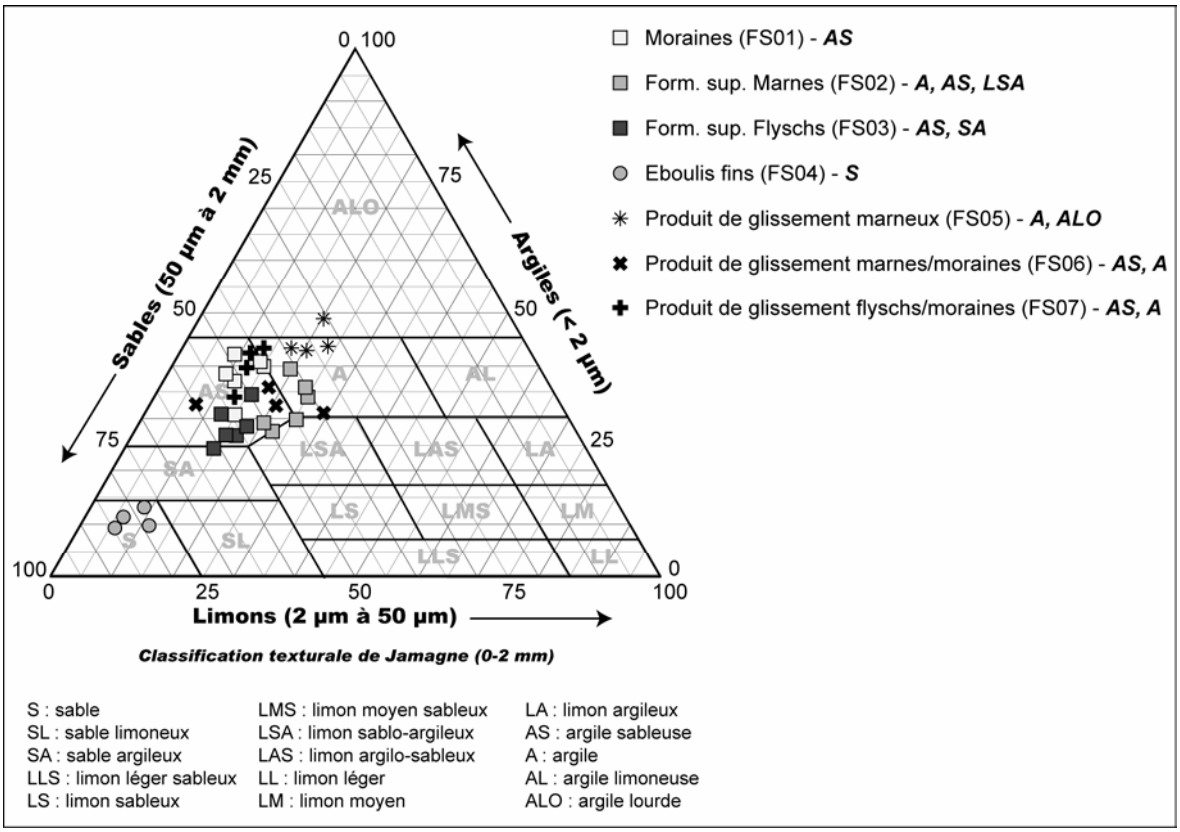


Figure 5.10 *: Texture des formations superficielles sources (classification de Jamagne [0 – 2 mm]).*

La distribution texturale des formations superficielles sources est relativement large. Elle s'étend sur six classes texturales (Jamagne) : les argiles lourdes (ALO), les argiles (A), les argiles sableuses (AS), les limons sablo-argileux (LSA), les sables argileux (SA) et les sables (S). **La répartition des formations superficielles dans le triangle de texture (Fig. 5.10) montre un lien entre la nature du dépôt et sa texture**.

Néanmoins, on observe un regroupement massif sur deux classes majoritaires (AS et A). Les autres classes texturales sont nettement moins représentées. Un lien logique unit les produits de glissement avec les formations sources associées, comme par exemple les formations superficielles dans les flyschs (FS03) et les produits de glissement flyschs/moraines (FS07) : les produits de glissement sont plus riches en matériaux fins que les formations superficielles sources associées.

5.2.1.2. Identification pétrographique

En complément des analyses granulométriques, une étude pétrographique a été effectuée sur les dépôts de laves torrentielles. En effet, la pétrographie est très utile dans le cadre des

études sur le déclenchement et la propagation des laves torrentielles, car elle constitue **un critère d'identification des zones sources** (Bonnet-Staub, 1998 ; Sorgi-de-Gennaro, 1999 ; Remaître, 2000 ; Remaître *et al.*, 2005a).

L'identification pétrographique a été réalisée sur les fractions supérieures à 2 mm, à l'œil nu pour les fractions de 20 à 160 mm et à l'aide d'une loupe binoculaire pour les fractions comprises entre 2 et 20 mm. La méthode consiste à définir la nature pétrographique des matériaux constitutifs des dépôts de laves torrentielles selon les différentes classes granulométriques (2 – 20 mm ; 20 – 40 ; 40 – 80 et 80 – 160). L'analyse pétrographique démontre la présence de trois grands types de roches dans les dépôts : **marnes noires, flyschs à Helminthoïdes et calcaires**.

Les flyschs proviennent des nappes de charriage du *Parpaillon* et de *l'Autapie*, présentes en partie haute du bassin versant de *Faucon* (Chapitre 3). Les calcaires sont présents dans plusieurs formations superficielles : les formations marneuses, les formations morainiques et les formations dans les flyschs. Les cailloux de calcaires ont une double origine (§ 2.1.1.) :

- la nappe du *Parpaillon*, où des bancs décamétriques de calcaire alternent avec les flyschs dissociés ;
- les marnes noires du secteur de *Faucon* (Evin, 1997 ; Remaître *et al.*, 2005a), où des bancs décimétriques de calcaires apparaissent régulièrement.

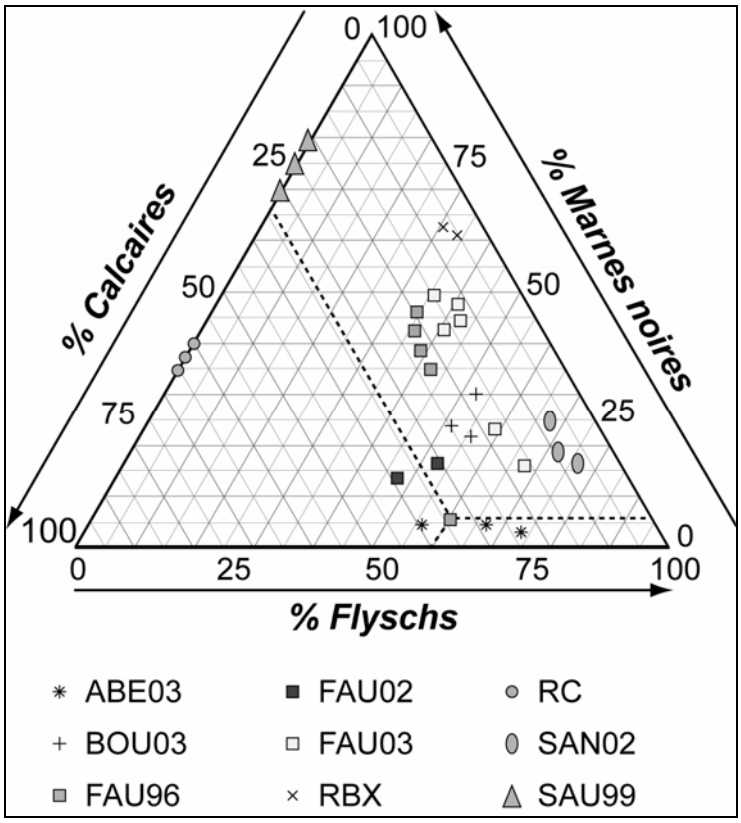


Figure 5.11 *: Pétrographie des dépôts de laves torrentielles sur la fraction 2 – 160 mm.*

La répartition de ces trois roches va être variable au sein de la pétrographie des dépôts torrentiels (Fig. 5.11), ce qui traduit la variété lithologique des zones sources. L'aspect de surface des grains et des cailloux révèle un état d'altération particulièrement élevé : desquamation superficielle, anfractuosités présentant des tâches d'oxydation, réseaux de microfissures, etc. La plupart des grains et des cailloux de marnes peut être désagrégé très facilement. Cet état d'altération des grains ne peut en aucun cas être expliqué uniquement par le transport durant l'épisode de lave. Par contre, il indique que les

matériaux sont issus de zones sources parfois chahutées par les instabilités, les circulations hydriques ou bien encore les conditions climatiques (Bonnet-Staub, 1998).

La distribution pétrographique pour un même dépôt peut varier significativement entre les fractions granulométriques considérées. Ainsi, pour le dépôt FAU03, les trois formations sources n'ont pas la même représentativité selon la fraction granulométrique étudiée. La représentation des marnes noires diminue au sein du dépôt quand la fraction granulométrique considérée devient plus grossière (Tab. 5.9) : ce qui est parfaitement logique compte tenu de la fragilité des clastes de marnes évoquée précédemment (Klotz, 1998 ; Maquaire *et al.*, 2003).

Tableau 5.9 : *Distribution pétrographique pour quatre fractions granulométriques pour le dépôt FAU03.*

	2 – 20 mm (%)	20 – 40 mm (%)	40 – 80 mm (%)	80 – 160 mm (%)
Calcaires	11 – 18	13 – 22	20 – 55	39 – 48
Flyschs	28 – 41	25 – 66	41 - 73	49 – 60
Marnes noires	6 – 51	4 – 47	2 – 21	1 – 3

5.2.2. Caractéristiques physiques et de consistance

Les caractéristiques physiques des matériaux sont estimées sur les fractions [0 – 2 mm] ou [0 – 0.4 mm] pour les formations sources et pour les dépôts de laves torrentielles mais avec des objectifs différents :

- pour les formations sources, les caractéristiques physiques représentent des données d'entrée nécessaires pour l'utilisation future de modèles de stabilité/déclenchement ;
- pour les dépôts de laves torrentielles, ces caractérisations complètent l'identification des dépôts.

Les **poids volumiques du sol sec** γ_d et **du sol saturé** γ_{sat} ont été déterminés sur des échantillons intacts (NFP 94-053, NFP 94-054). Le **pourcentage de $CaCO_3$**, la **teneur en matière organique**, et les **limites d'Atterberg** ont été déterminés sur des échantillons remaniés.

Comme attendu, les poids volumiques du sol sec γ_d et du sol saturé γ_{sat} ont des valeurs assez variables, comprises entre 11.5 et 18.9 kN.m^{-3} pour γ_d, et entre 16.1 et 21.8 kN.m^{-3} pour γ_{sat}. Ces valeurs sont conformes aux valeurs habituellement trouvées dans la littérature (El Amrani Paaza *et al.*, 1998 ; Gökçeoglu *et al.*, 2000 ; Malet, 2003 ; Maquaire *et al.*, 2003).

- Pour **les dépôts de laves torrentielles** (Tab. 5.10), les γ_d s'échelonnent entre 11.5 kN.m^{-3} et 14.6 kN.m^{-3} et les γ_{sat} sont comprises entre 16.2 kN.m^{-3} et 19.1 kN.m^{-3}.

- Pour **les formations superficielles sources** (Tab. 5.11), l'étendue de la gamme de variation est plus importante : les poids volumiques secs γ_d varient entre 12.2 kN.m^{-3} et 18.9 kN.m^{-3}. Les γ_{sat} sont comprises entre 16.1 kN.m^{-3} et 21.8 kN.m^{-3}. La plus grande étendue des valeurs pour les formations superficielles sources reflètent la variabilité granulométrique particulièrement forte d'une formation à une autre.

Le pourcentage de $CaCO_3$ a été déterminé uniquement pour les échantillons des dépôts de laves torrentielles (Tab. 5.10). En effet, les modèles ne tiennent compte de ce pourcentage comme donnée d'entrée. Par contre, ils complètent l'identification des dépôts, en donnant, par exemple, une information supplémentaire sur la zone de déclenchement.

Sur l'ensemble des échantillons, les pourcentages de $CaCO_3$ sont relativement faibles et compris entre 7% et 58%. Sans surprise, les valeurs les plus élevées se retrouvent dans les dépôts torrentiels situés dans les secteurs où les affleurements calcaires sont particulièrement vastes (*Sauze* et *Riou-Chanal,* § 2.2.). Les pourcentages de matière organique au sein des dépôts de laves torrentiels varient entre 1 et 12%. Ces valeurs sont conformes à celles présentées par d'autres auteurs sur des dépôts de laves torrentielles (Bonnet-Staub, 1998 ; Hungr *et al.*, 2001).

Tableau 5.10 : *Plage de variation des poids volumiques, du pourcentage de CaCO3, du pourcentage de matière organique et des limites d'Atterberg pour les dépôts de laves torrentielles.*

	γ_d (kN.m^{-3})	γ_{sat} (kN.m^{-3})	CaCO3 (%)	Matière organique (%)	W_L (%)	I_P
ABE03	11.5 – 11.8	16.2 – 16.6	18 – 24	2 – 7	18 – 21	5 – 6
BOU03	12.3 – 13.0	17.2 – 18.0	7 – 19	5 – 11	25 – 26	5 – 7
FAU96	12.5 – 13.4	17.6 – 18.3	11 – 32	7 – 10	26 – 28	4 – 8
FAU02	11.9 – 12.5	16.4 – 16.8	16 – 25	4 – 6	15 – 17	4 – 6
FAU03	13.9 – 14.4	17.9 – 18.6	6 – 21	3 – 12	16 – 28	5 – 8
RBX	14.0 – 14.6	18.3 – 19.1	17 – 28	4 – 10	29 – 31	8 – 9
RC	13.5 – 14.3	18.0 – 18.7	36 – 58	6 – 9	30 – 31	6 – 7
SAN02	11.8 – 12.2	16.2 – 17.1	10 – 34	7 – 12	20 - 23	5 – 8
SS99	12.0 – 12.7	17.2 – 17.9	29 – 47	2 – 5	25 – 27	9 – 11

Tableau 5.11 : *Plage de variation des poids volumiques pour les formations superficielles sources.*

	γ_d (kN.m^{-3})	γ_{sat} (kN.m^{-3})	W_L (%)	I_P
FS01	13.4 – 13.9	16.8 – 17.6	25 – 29	7 – 9
FS02	14.2 – 14.6	17.4 – 18.2	31 – 34	12 – 16
FS03	12.9 – 13.5	17.0 – 17.5	19 – 23	7 – 8
FS04	12.2 – 12.7	16.1 – 16.7	-	-
FS05	17.4 – 18.9	20.9 – 21.8	33 – 37	14 – 16
FS06	16.3 – 18.2	19.6 – 20.5	29 – 33	12 – 15
FS07	14.1 – 14.7	17.3 – 18.1	26 – 30	10 – 13

Pour les limites d'*Atterberg* des échantillons de dépôts torrentiels, la représentation dans le diagramme de *Casagrande* (Fig. 5.12a) indique qu'il s'agit **d'argiles peu plastiques ou de limons argileux faiblement plastiques**. **Le domaine de plasticité est relativement restreint**. Les limites d'Atterberg des formations d'éboulis (FS04) n'ont pas pu être déterminées car ces échantillons sont trop sableux (classe de texture S, Fig. 5.10).

Les limites de liquidité sont relativement homogènes mais des écarts significatifs entre des échantillons provenant de dépôts d'un même événement peuvent être observés. Par exemple, pour les échantillons FAU96 et FAU03, les variations sont assez importantes (entre 10 et 15%), mais ceci est logique et en rapport avec les variabilité de la texture des différents dépôts.

Dans le diagramme de *Casagrande* (Fig. 5.12b), les échantillons de **formations superficielles sources** sont identifiés comme des **argiles peu plastiques**. Les limites de liquidité s'échelonnent entre 20% et 39% pour des indices de plasticité variant entre 7 et 16. Les marnes noires (FS02) et les produits de glissement marneux (FS05) présentent des limites de liquidité et des indices de plasticité les plus élevés, contrairement aux formations superficielles sur flyschs.

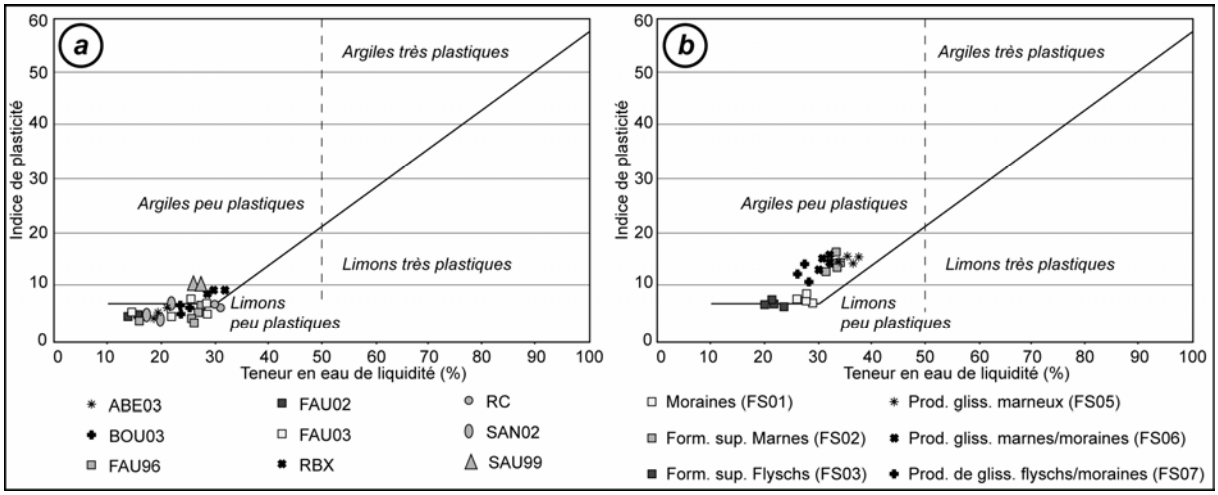


Figure 5.12 *: Représentation des dépôts torrentiels (a) et des formations superficielles sources (b) dans le diagramme de Casagrande.*

La faible étendue du domaine de plasticité et les limites de liquidité basses (en dehors des formations marneuses) impliquent que **de faibles apports d'eau vont entraîner d'importantes modifications d'état du matériau**. Ceci signifie que le matériau passe assez rapidement de l'état plastique à l'état liquide, favorisant la mobilisation des matériaux en laves torrentielles.

5.3. Propriétés hydrodynamiques des formations superficielles sources

Une attention particulière a été apportée à la caractérisation hydrodynamique *in-situ* des matériaux ; de nombreux auteurs soulignent en effet que ces caractéristiques influencent plus les résultats des simulations numériques que les caractéristiques géomécaniques. Ceci est à mettre en relation avec l'étendue des plages de variations associées aux grandeurs hydrodynamiques qui s'étendent très souvent sur deux à trois ordres de grandeurs (Livet, 1976 ; Hillel, 1984 ; Kutiliek et Nielsen, 1994 ; Ambroise, 1998). Plusieurs méthodes de mesure de *la conductivité à saturation* (***Ksat***), *des conductivités hydrauliques*, des *coefficients d'infiltration et de ruissellement* ont été mises en oeuvre *in-situ* :

- des essais d'infiltrométrie à charge variable (**Muntz**) ;
- des essais d'infiltrométrie à charge constante (**Beerkan**) ;
- des expériences sous **pluies artificielles**.

En parallèle et au laboratoire, la *teneur en eau à saturation* et les *courbes de rétention* ont été déterminées sur des d'échantillons intacts par ***la méthode des bacs à sable et à kaolin*** dans une gamme de potentiel de pression de 50 kPa à 1000 kPa. Les protocoles peuvent être trouvés dans Viville et Ambroise, 1985 ; Ambroise et Viville, 1986 ; Velcin, 1997 ; Auzet, 2000 ; Malet *et al.*, 2001, Malet, 2003.

De nombreuses investigations ont été menées sur les matériaux marneux du glissement-coulée de *Super-Sauze* dans le cadre de la thèse de J.-P. Malet (2003). Pour compléter ces résultats, obtenus sur sols marneux et nus, des investigations ont été menées sur des matériaux (moraines et formations périglaciaires, FS01 et Flyschs, FS03) et sur des états de surface (parcelles végétalisées) différents. Le choix de parcelles végétalisées est justifié par l'importance des surfaces herbeuses (champs de pâture) dans l'occupation du sol dans le bassin de *Barcelonnette*. Ces investigations ont été réalisées en Octobre 2001 dans le bassin versant de *Faucon*, dans les secteurs de *Bouzoulières* (Fig. 4.8) pour le matériau

FS01 (4 parcelles) et de *Soleil-Bœuf* pour le matériau FS03 (2 parcelles). Pour des raisons opérationnelles, seules les parcelles de *Bouzoulières* ont été soumises à des expériences de simulation de pluie.

5.3.1. Conductivité à saturation

La conductivité à saturation K_{sat} a été déterminée *in-situ* par la méthode d'infiltration ***Muntz*** (Hillel, 1984 ; Kutilek et Nielsen, 1994) sur des sites de 0.65 m² et par la méthode d'infiltration axisymétrique ***Beerkan*** (Angulo-Jaramillo *et al.*, 2001 ; Soria Ugalde et de Condappa, 2002) sur des sites de 0.15 cm². Le mode opératoire sera trouvé en annexe 10.

Tableau 5.12 : *Plage de variation des résultats des essais d'infiltrométrie à charge constante (Beerkan).*

Parcelle	Nombre d'essais	Flux d'infiltration ($mm.h^{-1}$)	W_n initiale (%)	W_n finale (%)	Charge (cm)	K_{sat} moyen ($m.s^{-1}$)	K_{sat} ajusté ($m.s^{-1}$)
FS01_A	8	72 – 211	15.5 – 19.6	22.3 – 29.4	2 – 5	$2.4\ 10^{-5}$ - $8.0\ 10^{-5}$	$2.0\ 10^{-5}$ - $5.9\ 10^{-5}$
FS01_B	6	289 – 1034	18.9 – 21.2	30.1 – 42.9	2 – 5	$6.0\ 10^{-5}$ - $2.0\ 10^{-4}$	$2.9\ 10^{-5}$ - $1.6\ 10^{-4}$
FS01_C	6	96 – 198	16.5 – 21.7	33.3 – 35.6	2 – 5	$1.0\ 10^{-5}$ - $7.6\ 10^{-5}$	$2.7\ 10^{-5}$ - $5.5\ 10^{-5}$
FS01_D	4	150 – 168	13.6 – 15.7	26.6 – 29.7	2 – 5	$5.1\ 10^{-5}$ - $5.3\ 10^{-5}$	$4.5\ 10^{-5}$ - $4.7\ 10^{-5}$
FS03_A	5	51 – 110	19.8 – 21.4	35.8 – 38.6	2 – 5	$3.5\ 10^{-5}$ - $6.2\ 10^{-5}$	$1.4\ 10^{-5}$ - $3.1\ 10^{-5}$
FS03_B	6	40 - 143	17.4 – 20.3	31.2 – 37.9	2 – 5	$2.9\ 10^{-5}$ - $4.9\ 10^{-5}$	$1.1\ 10^{-5}$ - $2.8\ 10^{-5}$

w_n est la teneur en eau naturelle, K_{sat} la conductivité à saturation.

Tableau 5.13 : *Plage de variation des résultats des essais d'infiltrométrie à charge variable (Muntz).*

Parcelle	Nombre d'essais	Flux d'infiltration ($mm.h^{-1}$)	W_n initiale (%)	W_n finale (%)	K_{sat} moyen ($m.s^{-1}$)	K_{sat} ajusté ($m.s^{-1}$)
FS01_A	18	85 – 223	6.1 – 18.7	20.3 – 33.7	$4.9\ 10^{-5}$ - $1.2\ 10^{-4}$	$2.4\ 10^{-5}$ - $6.2\ 10^{-5}$
FS01_B	13	98 – 251	17.9 – 20.4	34.4 – 41.2	$6.0\ 10^{-5}$ - $1.9\ 10^{-4}$	$2.7\ 10^{-5}$ - $7.0\ 10^{-5}$
FS01_C	14	111 – 351	10.2 – 18.7	26.3 – 34.5	$9.4\ 10^{-5}$ - $2.7\ 10^{-4}$	$3.1\ 10^{-5}$ - $9.8\ 10^{-5}$
FS01_D	11	150 – 168	11.6 – 19.4	29.6 – 33.7	$4.8\ 10^{-5}$ - $8.3\ 10^{-5}$	$3.5\ 10^{-5}$ - $8.7\ 10^{-5}$
FS03_A	7	212 – 326	20.3 – 23.4	40.2 – 43.7	$1.5\ 10^{-5}$ - $2.2\ 10^{-5}$	$4.4\ 10^{-5}$ - $8.7\ 10^{-5}$
FS03_B	5	234 – 312	21.5 – 24.6	42.8 – 46.5	$1.6\ 10^{-5}$ - $2.1\ 10^{-5}$	$3.8\ 10^{-5}$ - $9.1\ 10^{-5}$

w_n est la teneur en eau naturelle, K_{sat} la conductivité à saturation.

Les tableaux (Tab. 5.12 et 5.13) indiquent (1) que les résultats obtenus avec les deux méthodes (*Muntz* et *Beerkan*) fournissent des données comprises dans des **plages de variation analogues** et (2) que les matériaux testés (moraines (FS01) et flyschs (FS03)) sont **perméables à semi perméables** avec une plage de variation de conductivité à saturation K_{sat} relativement restreinte entre 10^{-4} et 10^{-5} $m.s^{-1}$.

Les matériaux marneux présentent une plage de variation de conductivité à saturation K_{sat} plus large, entre 10^{-4} et 10^{-8} $m.s^{-1}$ (Malet, 2003). Ces résultats sont conformes aux

caractéristiques texturales des matériaux : les matériaux les plus argileux (matériaux marneux et assimilés) étant les moins perméables.

5.3.2. Mesure de la conductivité hydraulique et des coefficients d'infiltration et de ruissellement par des expériences de pluies artificielles

Mesurer la conductivité hydraulique *in-situ* par pluie artificielle présente deux avantages (Byars *et al.*, 1999) :

- Le **volume de sol inspecté est grand** comparativement aux volumes explorés par les autres techniques, ce que permet de prendre en compte des changements de structure ou des macropores qui ne sont pas vus à plus grande échelle ;
- Des **conditions idéales peuvent être reproduites** (caractéristiques des averses en termes d'intensité, de durée et de cumul ; état d'humectation du terrain ; conditions géomorphologiques ; conservation de la structure du sol).

En revanche, l'échelle unitaire imposée de 1 m^2, d'aucune utilité opérationnelle, doit être considérée uniquement comme une échelle de mesure et non comme une échelle d'étude, les échelles d'étude étant celles du versant ou du bassin-versant. Généralement, les simulations ne produisent pas des tailles de gouttes représentatives de la pluie naturelle et de la vitesse terminale des gouttes de pluie générées, et sous-estiment souvent la vitesse terminale naturelle du fait de la différence en termes de hauteur de chute (Asseline et Valentin, 1978).

Quatre parcelles expérimentales choisies selon le type de formation superficielle et l'état de surface ont été installées. Les parcelles ont toutes été installées sur **des formations morainiques/périglaciaires (FS03)** dans le secteur de *Bouzoulières* (Fig. 5.13). Le dispositif de mesure est décrit en annexe 10.

Pour connaître la réaction des sols morainiques nus et des sols morainiques recouverts d'herbe, deux parcelles de chaque état de surface ont été installées : une parcelle sur une pente modérée (<5°) et une parcelle sur pente forte (>10°). Les caractéristiques des parcelles (pente et EDS) sont résumées dans le tableau 5.14.

Sur la base du protocole défini par Malet (2003), trois simulations ont été réalisées sur chaque parcelle expérimentale : les deux premières simulations à une intensité constante de 45 $mm.h^{-1}$ et la troisième et dernière simulation à une intensité de 60 $mm.h^{-1}$. Le protocole est le suivant : 1ère pluie de 30 mn, ressuyage pendant 30 mn, 2ème pluie de 30 mn, ressuyage d'une heure, 3ème pluie de 15 mn. Les intensités choisies sont relativement fortes, et peuvent être qualifiées 'd'exceptionnelles' pour le bassin de *Barcelonnette* (les intensités maximales enregistrées dans le bassin sont comprises entre 40 et 50 $mm.h^{-1}$; Sommen, 1995 ; Malet *et al.*, 2001). Mais ces conditions pluviométriques se rapprochent certainement le plus des conditions réelles sur le terrain lors d'épisodes orageux provoquant le déclenchement de laves torrentielles.

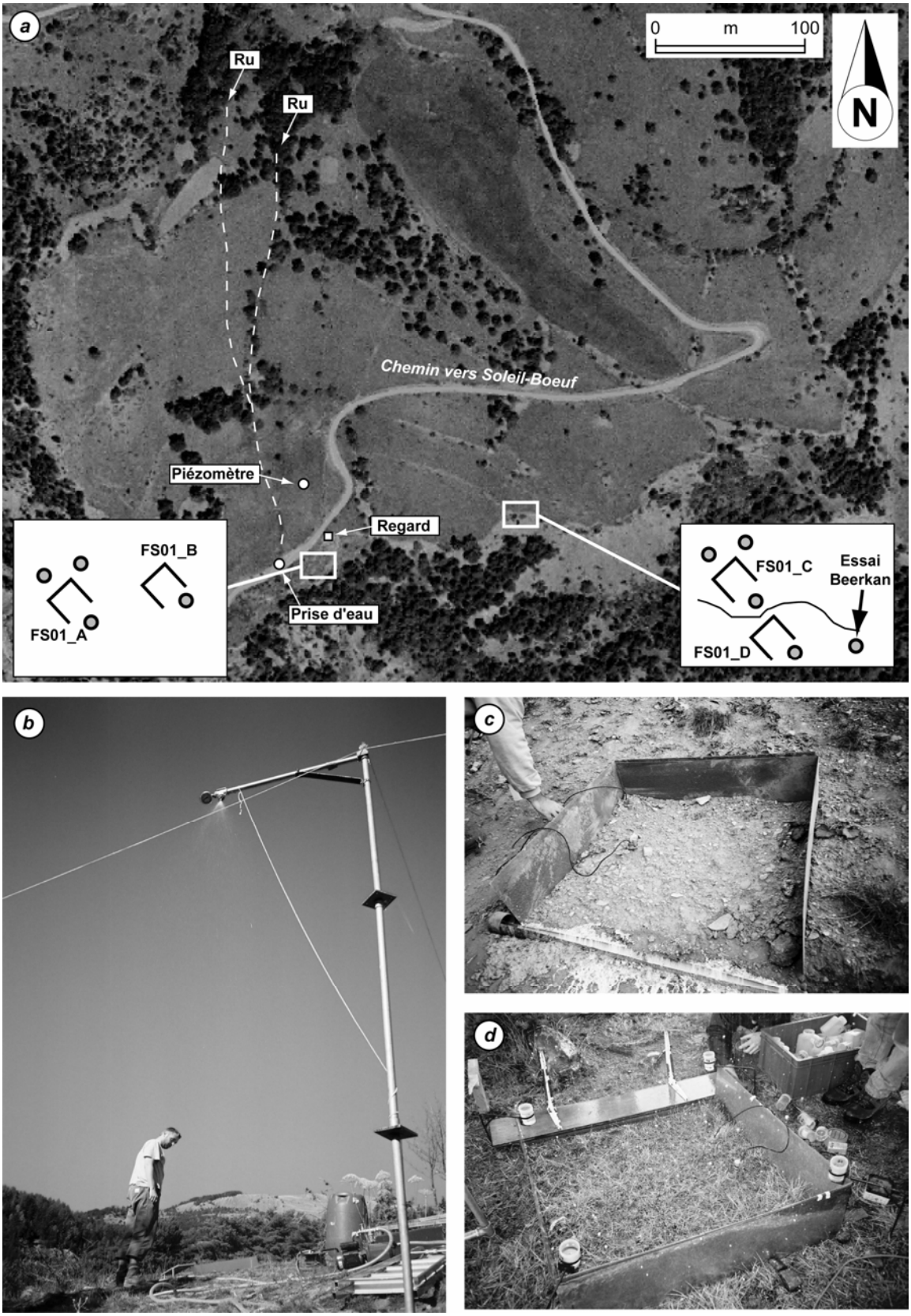


Figure 5.13 *: Les simulations de pluie à Bouzoulières (bassin versant de Faucon).*

a : plan de situation ;
b : vue sur le simulateur de pluie ;
c : la parcelle FS01_D
d : la parcelle FS01_A

Tableau 5.14 : *Caractéristiques des parcelles et résultats expérimentaux des simulations de pluie.*

Parcelle	Pente max (°)	Herbe (% de recouvrement de la parcelle)	Simulation	K_r (%)	K_i (%)	Charge solide ($g.l^{-1}$)	θ_{ini} (-12 cm) ($cm^3.cm^{-3}$)	θ_{fin} (-12 cm) ($cm^3.cm^{-3}$)
FS01_A	9	89	1	31	69	3.5	0.20	0.21
			2	30	70	1.1	0.21	0.46
			3	74	26	0.9	0.46	0.46
FS01_B	4	93	1	10	90	2.4	0.23	0.26
			2	9	91	1.5	0.26	0.33
			3	8	92	1.1	0.46	0.53
FS01_C	3	7	1	6	94	1.6	0.21	0.29
			2	***4***	**96**	0.9	0.28	0.30
			3	8	92	1.3	0.30	0.36
FS01_D	17	2	1	**93**	**7**	24.2	0.20	0.28
			2	88	12	**27.3**	0.26	0.32
			3	90	10	22.6	0.30	0.34

K_r est le coefficient de ruissellement, K_i est le coefficient d'infiltration, θ_{ini} est la teneur en eau volumique initiale du sol, θ_{fin} est la teneur en eau volumique finale du sol.

Les résultats expérimentaux des simulations de pluie (Tab. 5.14) montrent des réponses différenciées pour chacune des parcelles. La parcelle FS01_D (sol nu, pente 17°) obtient les coefficients de ruissellement et les charges solides les plus élevés. A l'inverse la parcelle FS01_C (sol nu, pente 3°) obtient les coefficients d'infiltration les plus forts. Les résultats obtenus sur les parcelles de sol nu sur moraines sont proches de ceux obtenus sur sol nu sur marne (Malet, 2003).

Les résultats sur parcelles herbeuses (FS01_A et B) ont une tendance similaire. Logiquement, les résultats montrent que la pente influence plus le régime d'infiltration/ruissellement que la couverture végétale. Toutefois, le nombre limité de simulations amène à rester prudent : des simulations complémentaires devront être réalisées pour confirmer ces résultats.

5.4. Caractéristiques de résistance à gradient de cisaillement faible des formations superficielles sources

Le comportement géomécanique a été analysé pour les matériaux sources. Il a été étudié en conditions non saturées, à des teneurs en eau proches du terrain (W_n = 10-20%) et à gradient de cisaillement faible. **L'objectif** de ces essais de résistance à gradient de cisaillement faible est principalement de **définir les valeurs caractéristiques de résistance** pour chacune des **formations sources** afin de disposer de données fiables et suffisantes pour l'étude de la phase de déclenchement (vérification de la stabilité de zones potentielles de déclenchement avec les logiciels Seep/W et FLAC, Chapitre 8). Pour ce travail, nous avons complété la base de données établie au préalable sur des formations superficielles et des dépôts de mouvements de terrain dans le cadre des projets de recherche *MOTE* et *ECLAT* (cf. introduction générale). Ainsi, les résultats de nos essais de cisaillement ont complété les résultats publiés ou gracieusement mis à notre disposition pour constituer la base de données sur les formations sources et les dépôts de mouvements de terrain dans le bassin de *Barcelonnette* (Projet *ALARM*, cf. introduction générale).

Les essais de cisaillement rectiligne direct (NFP 94-071-1) ont été réalisés dans une boîte de petite dimension (diamètre, 60 mm ; hauteur, 30 mm) pour une contrainte normale appliquée de 50 à 200 kPa. La vitesse de cisaillement la plus lente (0.02 mm.min^{-1}) a été choisie pour être le plus proche possible des conditions réelles (Klotz, 1998 ; Malet, 2003). Les essais ont été réalisés en conditions drainées, après une phase de consolidation de 24h.

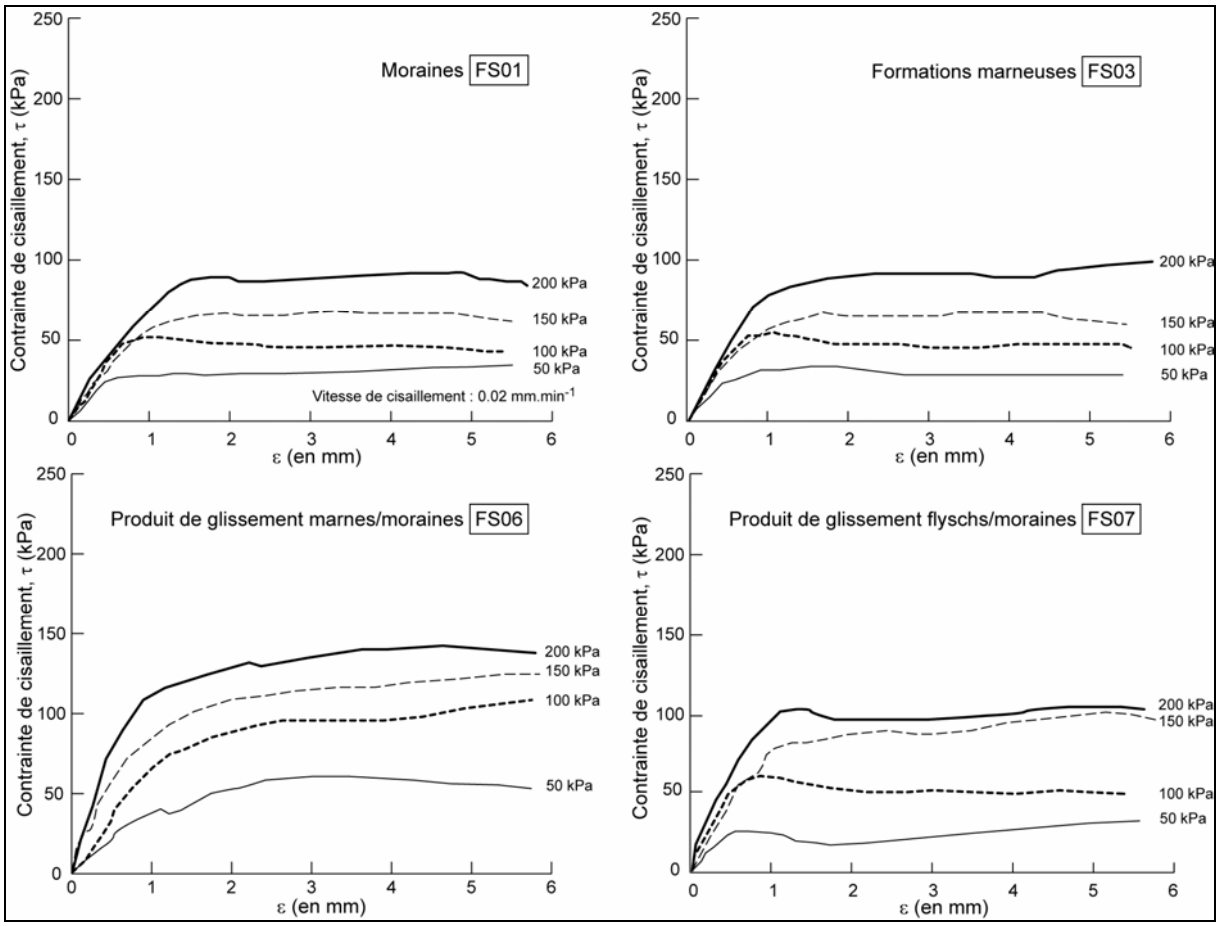


Figure 5.14 *: Courbes contraintes-déformations en cisaillement rectiligne consolidé drainé pour les matériaux FS01, FS03, FS06 et FS07.*

L'allure asymptotique des courbes contrainte-déformation (Fig. 5.14) indique l'absence de pic ; l'allure est semblable à celle des sables lâches dans la mesure ou les formations superficielles sources sont toutes plus ou moins remaniées. Ce comportement a été observé par plusieurs auteurs sur des formations superficielles et des produits de glissement dans la région de *Barcelonnette* (Colas et Locat, 1993 ; Phan, 1993 ; Van Beek et Van Asch, 1996 ; Maquaire *et al.*, 2003).

Les courbes atteignent un palier après quelques millimètres de déformation ; dans certains cas, les courbes présentent des oscillations de la valeur de contrainte de cisaillement (chute momentanée et reprise d'une croissance régulière). Ces irrégularités sont liées à la présence de débris grossiers dans les échantillons comme des clastes de marnes, des éclats de calcaires, etc. Ces problèmes ont été particulièrement importants pour la formation FS04 (éboulis fins), pour laquelle aucun essai de cisaillement n'a réellement fonctionné. Des informations complémentaires sur le mode opératoire, sur le domaine de validité et sur l'interprétation des essais peuvent être trouvées dans Maquaire (2002), Malet (2003) et Maquaire *et al.* (2003).

Tableau 5.15 : *Caractéristiques de résistance en cisaillement rectiligne des matériaux sources (critère de rupture de Mohr-Coulomb).*

	φ' (°)		c' (kPa)		n
	Moyenne	Min-Max	Moyenne	Min-Max	
Moraines (FS01)	34	32 – 40	12	8 – 17	6
Formations marneuses (FS02)	32	30 – 33	18	14 – 20	6
Flyschs (FS03)	31	27 – 34	14	12 – 18	6
Eboulis fins (FS04)		-		-	-
P.G. marnes (FS05)	30	29 – 32	29	22 – 36	6
P.G. marnes/moraines (FS06)	25	22 – 25	18	15 – 21	6
P.G. flyschs/moraines (FS07)	24	23 – 26	17	16 – 18	6

φ' est l'angle de frottement interne ; c' la cohésion et n le nombre de valeurs

Les caractéristiques intrinsèques montrent une hiérarchisation des matériaux en termes de résistance (Tab. 5.15) :

- **Les matériaux 'marneux' présentent des caractéristiques de résistance assez élevées**, caractéristiques des matériaux limono-argileux (Malet, 2003) : l'angle de frottement interne des formations marneuses (FS02) et des produits de glissements marneux (FS05) est de l'ordre de 30°, la cohésion est de 18 kPa pour FS02 et de 29 kPa pour FS05 ;

- **Les matériaux morainiques et les formations superficielles issues des flyschs présentent des caractéristiques de résistance plus faibles**. En moyenne, l'angle de frottement interne est de 22° pour les moraines (FS01), de 26° pour les flyschs (FS03), de 24° pour les produits de glissement flyschs/moraines (FS07) ; la cohésion est de 12 kPa pour FS01, de 14 kPa pour FS03 et de 17 kPa pour FS07.

En complément des essais en cisaillement rectiligne direct, **deux essais triaxiaux consolidés non drainés**, avec mesure de la pression interstitielle, ont été réalisés sur les matériaux FS03 et FS07. Ces essais triaxiaux (appareil triaxial GDS du *Laboratoire de Mécanique des Sols de l'EPF de Lausanne*) ont été effectués sur des échantillons confectionnés dans un tube de diamètre de 55 mm. Les échantillons ont été consolidés de manière isotrope, puis écrasés jusqu'à la rupture en conditions non-drainées. Une décharge a été effectuée en cours de cisaillement lorsque l'éprouvette avait atteint approximativement 2% de déformation axiale. Les courbes de contrainte-déformation peuvent être trouvées en annexe (Annexe 11). Les résultats montrent que les deux échantillons présentent des angles de frottement critique φ'_{pp} relativement proches, néanmoins le matériau FS07 est un peu plus faible d'environ 2°. Par contre, la cohésion (c'_{pp} de *Mohr-Coulomb*) est trois fois plus forte pour FS03 que pour FS07.

Tableau 5.16 : *Caractéristiques de résistance en cisaillement rectiligne des matériaux marneux du glissement de Super-Sauze. Les données sont issues de Klotz (1998) et Malet (2003).*

	φ' (°)		c' (kPa)		n
	Moyenne	Min-Max	Moyenne	Min-Max	
Produit de glissement marneux	31	29 – 33	30	16 – 42	42
Marnes noires non remaniées	31	30 – 33	18	15 – 22	32
Produit de glissement marnes/moraines	24	23 – 26	16	10 – 21	24

φ' est l'angle de frottement interne ; c' la cohésion et n le nombre de valeurs

Comme cela avait déjà été observé sur le glissement de *Super-Sauze*, les produits de glissement ont une cohésion plus élevée que les formations superficielles (Tab. 5.15). Ceci peut s'expliquer par le fait que les produits de glissement ont déjà subit une rupture initiale et que le réarrangement des grains après la rupture va favoriser une augmentation de la cohésion.

5.5. Caractéristiques de résistance à gradient de cisaillement élevé des dépôts torrentiels et des formations superficielles sources.

L'approche rhéologique est l'approche la plus communément répandue pour décrire le comportement des laves torrentielles à **gradient de cisaillement élevé** (Philipps et Davies, 1991 ; Major et Pierson, 1992 ; Coussot, 1997 ; Ancey, 2001a). Elle repose sur le postulat suivant : pour comprendre, calculer, prédire les caractéristiques d'un événement, il est nécessaire de travailler à l'échelle de l'écoulement et d'analyser finement le comportement du mélange mobilisé (Meunier, 1991). Ainsi, ce postulat considère **le mélange comme un fluide homogène** où, si l'on est capable de déterminer **la loi de comportement**, les caractéristiques de l'écoulement (relation hauteur / débit, distances de parcours, force d'impact) peuvent être calculées. L'objectif de cette section est triple :

- estimer les paramètres des lois de comportement (**seuil de contrainte**, **viscosité dynamique**) à introduire dans les modèles de propagation et d'étalement, pour des gradients de cisaillement élevé (10^{-1} s^{-1} < γ < 10^{4} s^{-1}) ;
- analyser la variation des caractéristiques rhéologiques avec la concentration volumique Φ (ou l'indice de liquidité I_L) ;
- comparer le comportement des différents dépôts de laves torrentielles à celui des formations sources et à des mélanges théoriques.

Le comportement rhéologique de la matrice des dépôts de laves torrentielles et des formations superficielles sources a été étudié sur **un spectre granulométrique étendu**. Ainsi, plusieurs méthodes rhéologiques ont été croisées pour se rapprocher au plus près des valeurs rhéologiques 'terrain' (Fig. 5.15) :

- rhéométrie sur la fraction < 400 µm, dans une géométrie plan-plan et coaxiale ;
- essai d'affaissement (slump test au cylindre et au cône d'Abrams) sur la fraction < 400 µm et < 20 mm ;
- plan incliné sur la fraction < 20 mm ;
- morphologie des bourrelets sur le spectre granulométrique total.

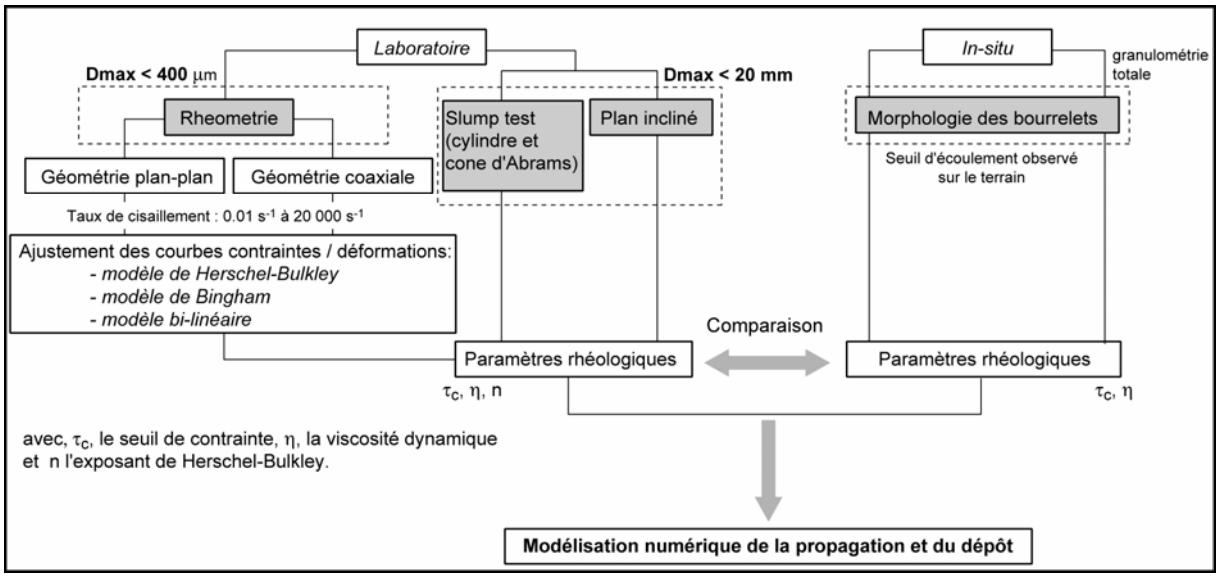


Figure 5.15 *: Méthodologie générale des investigations rhéologiques.*

Ces essais sont représentatifs uniquement du fluide matriciel du corps de la lave torrentielle (§ 1.2. et § 1.3.). Pour les compléter, une rétro-analyse de la morphologie des bourrelets latéraux de certains événements de laves torrentielles (Faucon 1996 et 2003 notamment) permet d'extrapoler, sous certaines hypothèses, les résultats à la granulométrie complète du corps de l'événement (Coussot, 1999).

5.5.1. Caractérisation rhéologique : méthodologie et protocoles

5.5.1.1. Fraction < 400 µm : essais rhéométriques

Comme la forme tensorielle d'une loi de comportement ne peut être facilement déduite à partir d'expériences, il est nécessaire de se rapporter à des écoulements simples (viscosimétriques) pour lesquels l'expression de la loi de comportement se réduit à une relation scalaire reliant gradient de cisaillement et contrainte tangentielle. En considérant un fluide homogène, uniforme et continûment déformé dans un géométrie simple, les essais rhéométriques permettent de déterminer expérimentalement ces relations (Couarraze et Grossiord, 1983).

Les fluides testés sont des suspensions concentrés des matériaux, écrêtés à 400 µm. Les essais ont réalisés pour des concentrations volumiques solides Φ = 0.28-0.50. Un volume connu de matériau solide a été ajouté à de l'eau distillé puis mélangé à l'aide d'un malaxeur mécanique à 600 t.min-1 pendant une minute puis à 400 t.min-1 pendant 30 mn afin d'homogénéiser le fluide. Les essais ont été réalisés avec un rhéomètre Haake Rotovisco-RV 20 équipé de plans parallèles rugueux (diamètre, 5 cm ; épaisseur de l'échantillon cisaillé, 2.8 mm ; rugosité, 250 µm ; Fig. 5.16) et avec un rhéomètre Haake Rotovisco-RV 12 équipé de cylindres coaxiaux en rotation relative et à large entrefer. Les essais ont été exécutés en vitesse imposée à une température constante de 18°C.

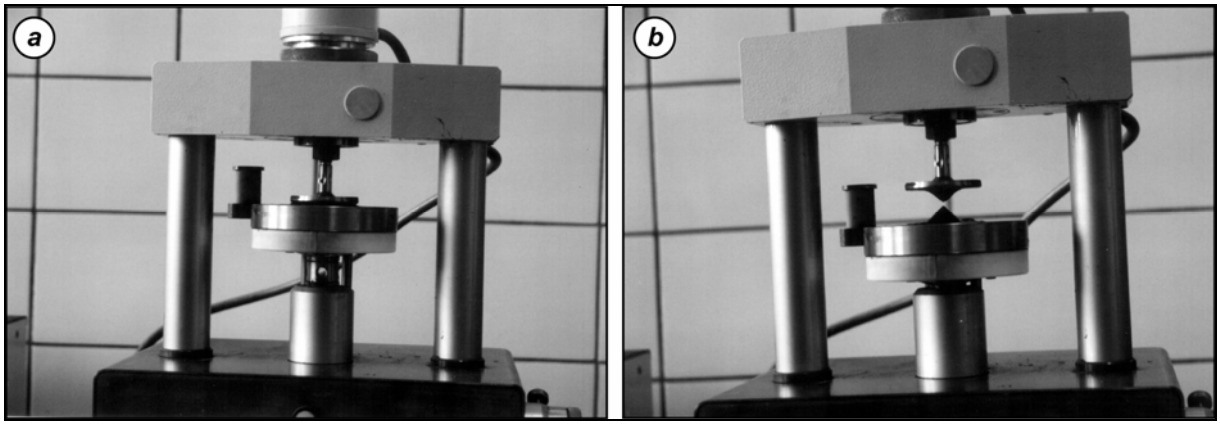


Figure 5.16 *: Le dispositif de rhéométrie plan-plan, (a) pendant l'essai, (b) après l'essai.*

Le **protocole expérimental**, détaillé dans Malet *et al.* (2002, 2003b), tient compte des précautions **pour limiter les effets perturbateurs** (glissement à la paroi, fracturation, migration de particules, sédimentation, creusement de la zone cisaillée, -Locat et Demers, 1988 ; Coussot et Piau, 1990 ; Magnin et Piau, 1990 ; Coussot *et al.*, 1998-). Comme l'hétérogénéité de la contrainte appliquée le long des cylindres ne vérifie plus l'hypothèse d'un fluide continûment déformé dans la géométrie coaxiale, les données brutes ont été transformées par une régularisation de Tikhonov (Tikhonov et Arsenin, 1977 ; Leong *et al.*, 2003).

Introduit dans le rhéomètre, le fluide est cisaillé pendant 2 mn à un gradient de cisaillement de 1000 s^{-1}, puis pendant 28 mn, à un gradient de cisaillement de 100 s^{-1}. Pour la géométrie plan-plan, le protocole expérimental décrit par Coussot et Piau (1994) a été utilisé. Il implique la succession de diverses rampes de vitesses où chaque gradient de cisaillement est maintenu pendant un palier de 15 s, largement supérieur au temps caractéristiques de ce type de matériau (Coussot, 1997). Pour la géométrie à cylindres coaxiaux, trois phases de sollicitation dynamique du fluide ont été associées aux rampes de vitesse (Locat et Demers, 1988). Les deux géométries ont permis d'explorer une plage de gradient de cisaillement étendue, de 1.87 s^{-1} à 18700 s^{-1} pour le plan-plan, de 0.02 s^{-1} à 1200 s^{-1} pour le coaxial. Néanmoins, la plage de gradient de cisaillement utilisée est deux à trois ordres de grandeur supérieure à celle rencontrée pour ce type d'écoulement sur le terrain (O'Brien, 1986). Pour les appareils utilisés, un gradient de cisaillement de 300 s^{-1} est similaire à une vitesse d'écoulement *in-situ* de 10 $m.s^{-1}$ pour une épaisseur de zone cisaillée de 0.03 m. Malet *et al.* (2002) montrent que les courbes d'écoulement obtenues avec les deux géométries sont similaires et se raccordent dans la plage commune de gradient de cisaillement (Fig. 5.16) et que **les fluides sont faiblement thixotropes**. Les valeurs obtenues pour les deux géométries sont comparables (Fig. 5.17), l'écart moyen entre les deux essais reste dans une gamme acceptable de 15 unités (Ancey, 2001a).

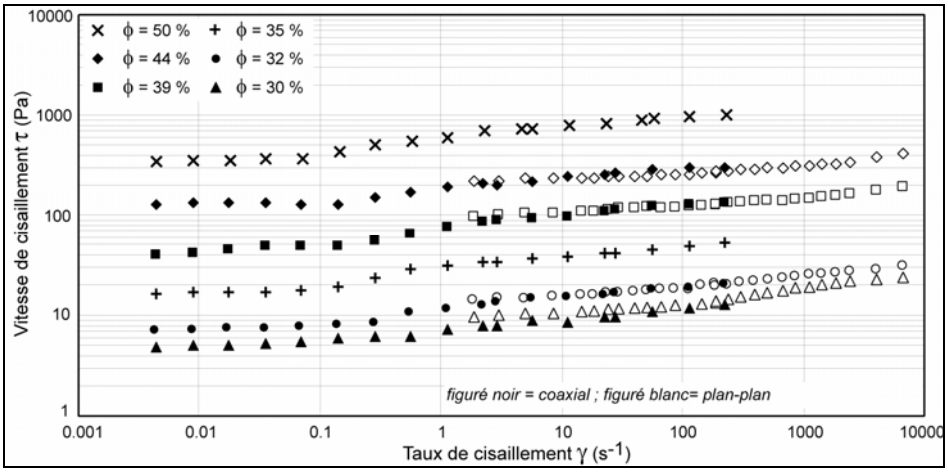


Figure 5.17 *: Raccordement entre la géométrie coaxiale et plan-plan des courbes d'écoulement du matériau SAU_99 pour différentes concentrations volumiques solides ϕ (Malet, 2003).*

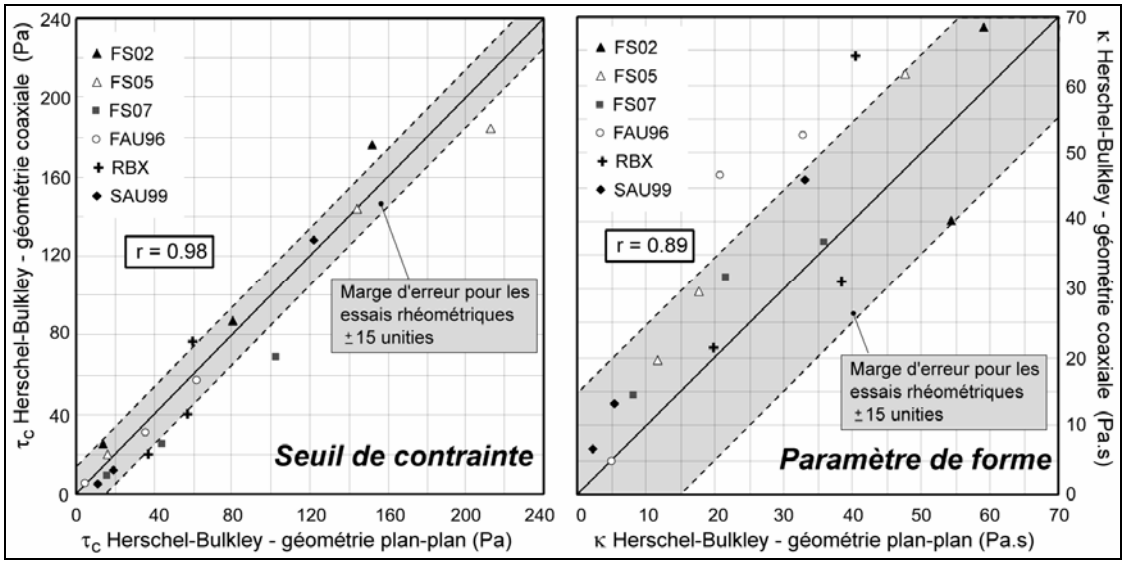


Figure 5.18 *: Comparaisons entre les valeurs obtenues pour le seuil de contrainte et le paramètre de forme de Herschel-Bulkley par la géométrie coaxiale et plan-plan (modifiée de Malet et al., 2002).*

Tous les matériaux présentent **un comportement rhéofluidifiant**[15] vers les gradients de cisaillement forts. Les seuils de contrainte de la phase d'augmentation du gradient de cisaillement sont supérieurs à ceux de la phase de diminution. Cette évolution temporelle est positive (hystérèse dans le sens des aiguilles d'une montre) et non réversible (l'évolution se poursuit lors des cycles ultérieurs en repartant du seuil atteint lors de la première diminution).

Vers les faibles gradient de cisaillement (entre 0.05 et 1 s^{-1}), quelle que soit la concentration volumique solide, une inflexion de la courbe est observée pour les matériaux de laves torrentielles et pour certaines formations superficielles sources issues de produits de glissements (produits de glissement marneux (FS05), marnes/moraines (FS06) et flyschs/moraines (FS07)) ; cette inflexion n'est pas remarquée pour les matériaux non mobilisés. Des essais de fluage-recouvrance (à contrainte imposée) devraient permettre de vérifier si cette inflexion correspond à un comportement particulier des matériaux ayant 'coulé', à des effets géométriques perturbateurs ou à des biais expérimentaux (Nguyen et Boger, 1992).

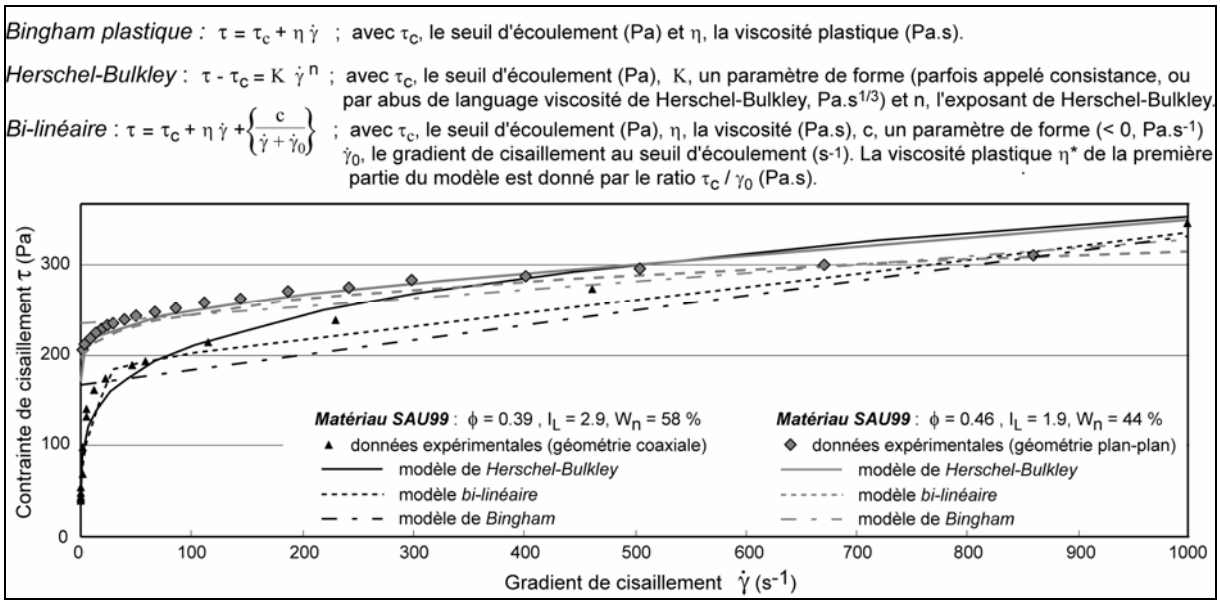


Figure 5.19 *: Comparaison de l'ajustement de deux courbes d'écoulement du matériau SAU99 par un modèle de Bingham, un modèle bi-linéaire et un modèle de Herschel-Bulkley (in Malet et al., 2003b).*

Le comportement rhéofluidant des matériaux suggère d'ajuster une loi de comportement viscoplastique (*Bingham*, *bi-linéaire*, *Herschel-Bulkley*) aux données expérimentales (Fig. 5.19). La profondeur du creux observé dans la géométrie plan-plan a été prise en compte dans l'estimation des paramètres de la loi d'écoulement. Les ajustements ont été réalisés sur les valeurs des derniers cycles de phase montante (seuil de contrainte représentatif du dépôt).

La faible thixotropie des fluides et les faibles gradients de cisaillement utilisés permettent de faire l'hypothèse que les seuils d'écoulements τ_c ajustés par les modèles sont proches des seuils d'écoulement réels (Coussot et Piau, 1994). Sur la plage de taux de cisaillement considérée, **la totalité des matériaux présente un comportement viscoplastique marqué, très bien représenté par un modèle empirique non linéaire de Herschel-Bulkley** ($r^2 > 0.90$) ou par un modèle bi-linéaire ($r^2 > 0.87$) ; le modèle linéaire de Bingham présente des coefficients de détermination plus faibles ($r^2 \approx 0.70$).

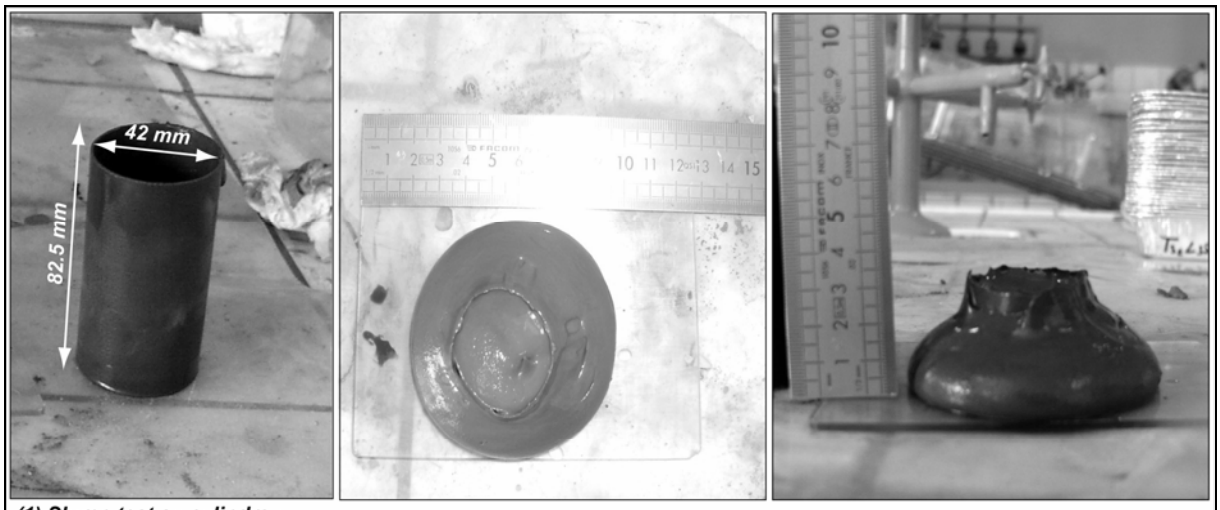
[15] Le comportement rhéofluidifiant signifie que la viscosité du mélange diminue lorsque la vitesse de cisaillement augmente.

Les paramètres de Herschel-Bulkley (seuil de contrainte τ_c, paramètre de forme K) diminuent avec la concentration volumique solide Φ ; l'exposant n est compris entre 0.18 et 0.36. Le seuil d'écoulement et le paramètre de forme (déterminés sur la phase d'augmentation du gradient de cisaillement) varient respectivement de 1 à 480 Pa et de 0.1 à 150 $Pa.s^{1/3}$. Une différenciation importante des matériaux dans la gamme de concentration volumique Φ = 0.35 à Φ = 0.50 est observée ; pour les fortes teneurs en eau, les matériaux présentent les mêmes paramètres rhéologiques.

5.5.1.2. Fraction < 400 µm et < 20 mm : essais d'affaissement (cône d'Abrams et cylindre)

L'essai d'affaissement est fondé sur la mesure de la hauteur d'affaissement H_s d'un volume de matériau de l'hauteur initiale H sous l'action de la gravité (Ferraris et de Larrard, 1999 ; Schowalter et Christiansen, 1998 ; Davidson *et al.*, 2000). Comme les caractéristiques de l'écoulement du matériau au sein de la géométrie ne sont pas maîtrisées, la détermination du seuil de contrainte présuppose un type de comportement particulier : *le slump test* (essai au cylindre et au cône d'Abrams) est validé pour la détermination du seuil de contrainte de fluide rhéofluidifiant où le volume affaissé forme un cône évasé. (Fig. 5.20). Le seuil de contrainte est évalué à l'aide de l'expression analytique de Tanigawa et Mori (1989) reformulée pour des fluides viscoplastiques par Pashias *et al.* (1996). Les essais ont été réalisés sur la même gamme de concentration volumique que les essais rhéométriques et pour deux fractions granulométriques :

- sur la fraction < 400 µm dans un cylindre métallique lisse (hauteur, 82.5 mm ; diamètre, 42 mm) ;
- sur la fraction < 20 mm dans un cône d'Abrams métallique lisse (hauteur, 300 mm ; grand diamètre, 200 mm ; petit diamètre, 100 mm).



(1) Slump test au cylindre :

$$\frac{H_S}{H} = 1 - \frac{2\,\tau_c}{\rho\, g\, H}\left(1 - \ln\left(\frac{2\,\tau_c}{\rho\, g\, H}\right)\right)$$

avec, τ_c le seuil de contrainte ; ρ le poids volumique ; g l'accélération de la gravité ; H la hauteur initiale de l'échantillon ; H_S l'affaissement

Figure 5.20 *: Essai d'affaissement au cylindre (avant et après essai) et formule analytique associée.*

L'erreur relative ($\xi = \Delta\tau_c / \tau_c$) de détermination du seuil de contrainte par les essais au cylindre et les essais au cône d'Abrams est proche de 0.15 et varie entre 0.03 et 0.19 pour le cylindre et entre 0.05 et 0.22 pour le cône d'Abrams (Fig. 5.21). L'erreur relative des essais d'affaissement est dans la même gamme que celle déterminée sur les essais rhéométriques (Ancey et Jorrot, 2001 ; Malet *et al.*, 2003).

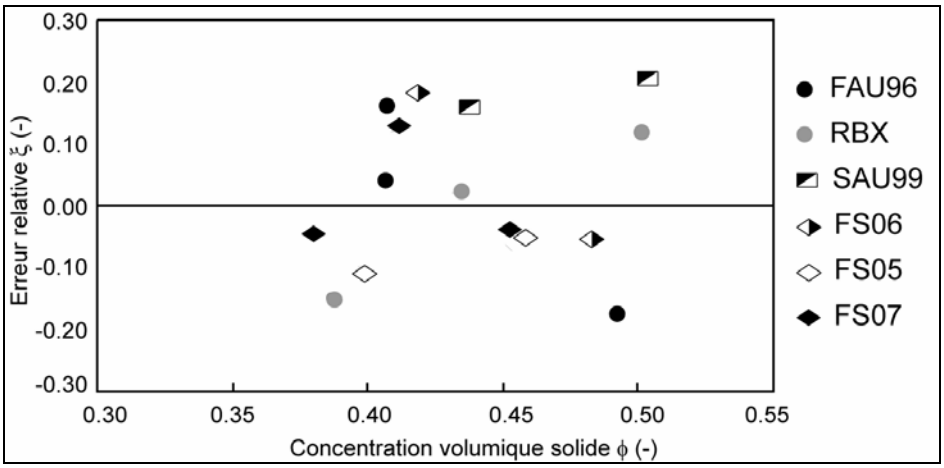


Figure 5.21 *: Erreur relative sur la détermination du seuil de contrainte par la rhéométrie plan-plan et les essais d'affaissement pour six matériaux pour différentes concentrations volumiques solides (ϕ).*

5.5.1.3. Fraction < 20 mm : essais au plan incliné

La technique de détermination des paramètres rhéologiques à l'aide d'un plan incliné utilise la caractéristique essentielle des fluides à seuil qui forment des dépôts d'épaisseur significative sur des pentes non nulles. Lors de l'écoulement, sur un plan incliné d'angle θ, d'un fluide à seuil de très grande surface par rapport à son épaisseur h(x), l'expression de la contrainte montre qu'au delà d'une certaine hauteur h_0 par rapport au fond, la contrainte tangentielle est inférieure au seuil de contrainte τ_c. Lorsque la hauteur de fluide h(x) est plus faible que cette épaisseur h_0, il n'y a pas d'écoulement permanent uniforme possible avec un fluide à seuil.

En pratique, **le seuil de contrainte** τ_c est déduit de la forme prise par un volume de fluide à l'arrêt sur le plan incliné (Coussot et al., 1996), en utilisant l'approche théorique de Liu et Mei (1989). En considérant un volume de fluide de longueur finie (selon O_x), de largeur (selon O_z) constante grande devant son épaisseur et confiné latéralement (Fig. 5.22), le fluide s'étale un peu vers l'amont et plus largement vers l'aval.

Pour une répartition hydrostatique des pressions à l'arrêt, la contrainte tangentielle τ_{xy} vaut exactement le seuil de contrainte τ_c, ce qui permet d'écrire l'équilibre des forces sur un tronçon de fluide et de déduire l'équation du profil de la surface libre (Coussot *et al.*, 1996). Une approximation du seuil de contrainte est déduite des équations (1) et (2) de la figure 5.22, pour un lobe frontal ou un bourrelet latéral.

Les essais ont été réalisés sur un plan incliné à chenal rectangulaire en bois (longueur, 4 m ; largeur 0.25 m) dont la pente peut être inclinée entre 4° et 40°. Pendant les expériences, le glissement à la paroi est négligeable. Le chenal est équipé d'un système de lâcher d'un volume de 0.002 m^3 de matériau (fraction 0-20 mm). L'épaisseur asymptotique a été mesurée à l'arrêt dans les directions O_z et O_x (Fig. 5.23). Les essais ont été réalisés dans la gamme de concentration volumique Φ = 0.35-0.50, pour deux angles de pente (θ = 16°, θ = 24°) qui sont proches des valeurs de pente observées sur les profils en long des torrents du bassin de *Barcelonnette*. De plus, pour des valeurs de pente inférieures à 16°, la plupart des matériaux ne coulent pas ou très peu. La reproductibilité des essais est élevée (différences d'épaisseur moyenne et de distance de parcours pour plusieurs essais inférieurs à 5%, Malet *et al.*, 2003b). Comme pour les essais d'affaissement, l'erreur relative ξ dans la détermination du seuil de contrainte est proche de 0.15 (Malet *et al.*, 2002).

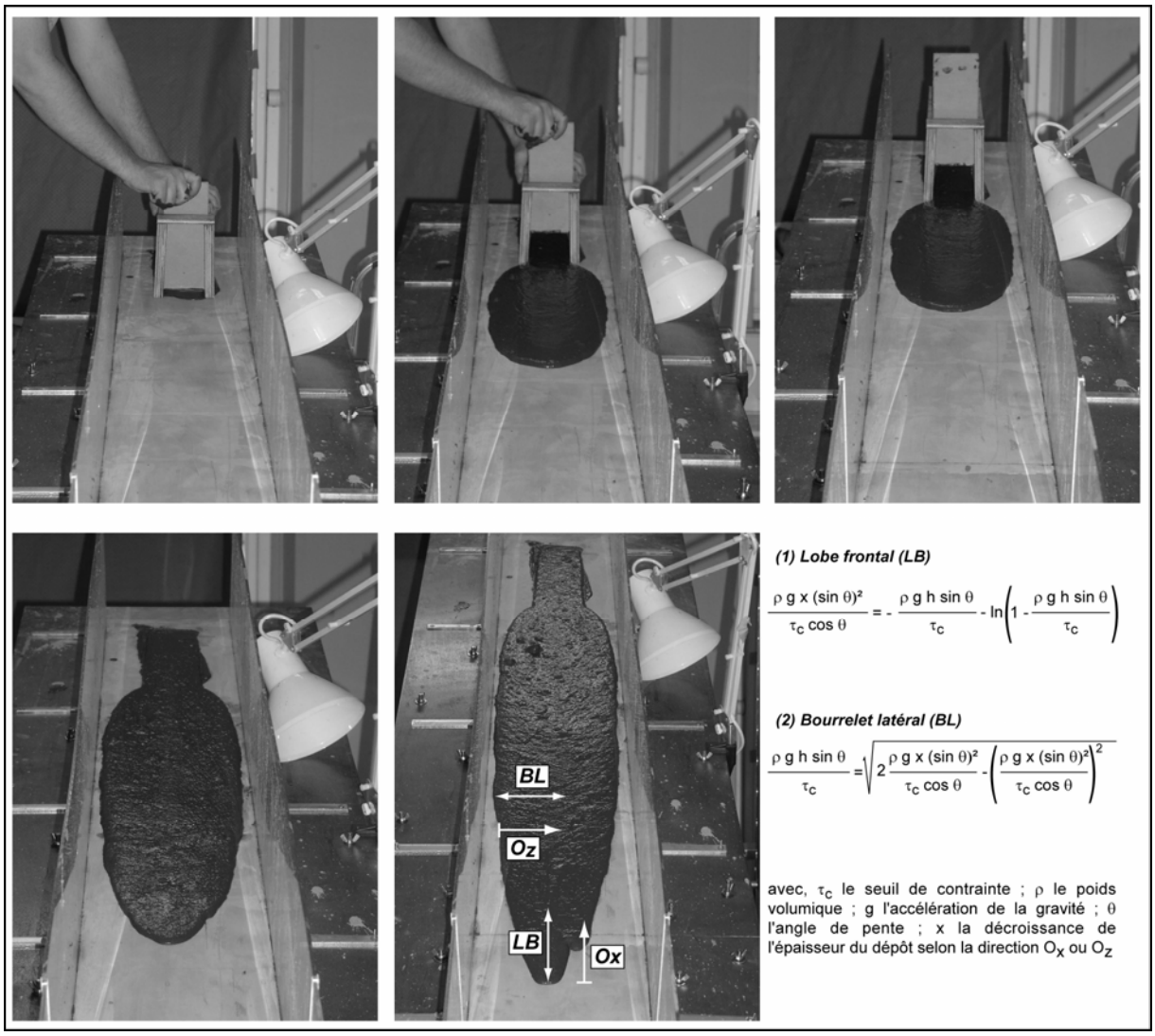


Figure 5.22 *: Cinématique d'un essai rhéologique au plan incliné et formules analytiques associées.*

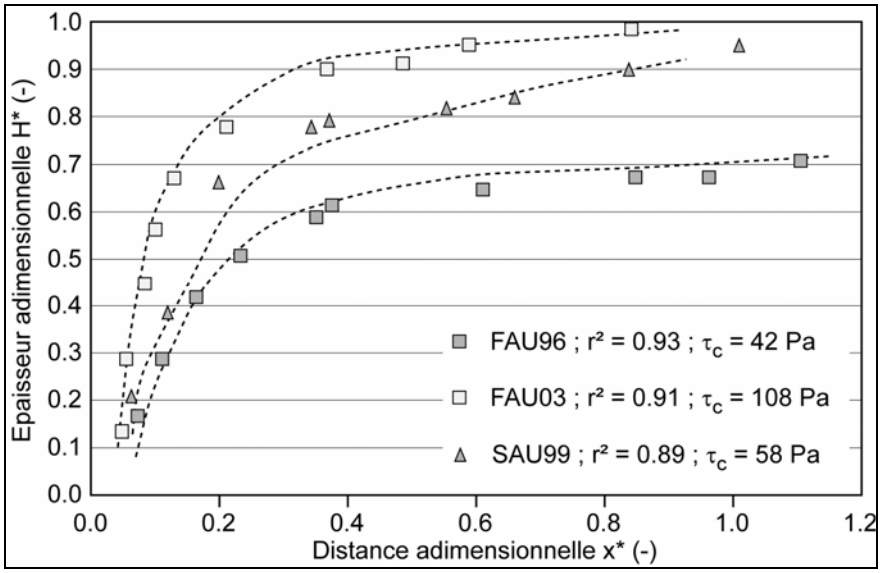


Figure 5.23 *: Détermination du seuil de contrainte par la méthode du plan incliné. Points expérimentaux et ajustement théorique de la forme du bourrelet latéral pour les matériaux FAU96, FAU03 et SAU99 (ϕ = 0.44 ; θ = 16°).*

La figure 5.23 montre un exemple d'ajustement pour des essais réalisés sur les matériaux FAU96, FAU03 et SAU99 ; **la forme des dépôts est régulière et présente un arrondi caractéristique des dépôts d'écoulements viscoplastiques** (Ancey, sous presse ; Bardou, 2002).

5.5.1.4. Fraction 'totale': mesures terrain

La théorie développée par Coussot *et al.* (1996, 1998) pour les fluides viscoplastiques permet d'estimer les paramètres rhéologiques sur le terrain d'après la forme des dépôts, en appliquant les mêmes formules que précédemment.

La géométrie (forme du bourrelet en mesurant la décroissance de l'épaisseur) de plusieurs bourrelets latéraux caractéristiques des matériaux FAU96, FAU03, BOU03, SAN02, RBX et SAU99 ont été mesurés sur le terrain au niveau de chantier et au décamètre (Fig. 5.24).

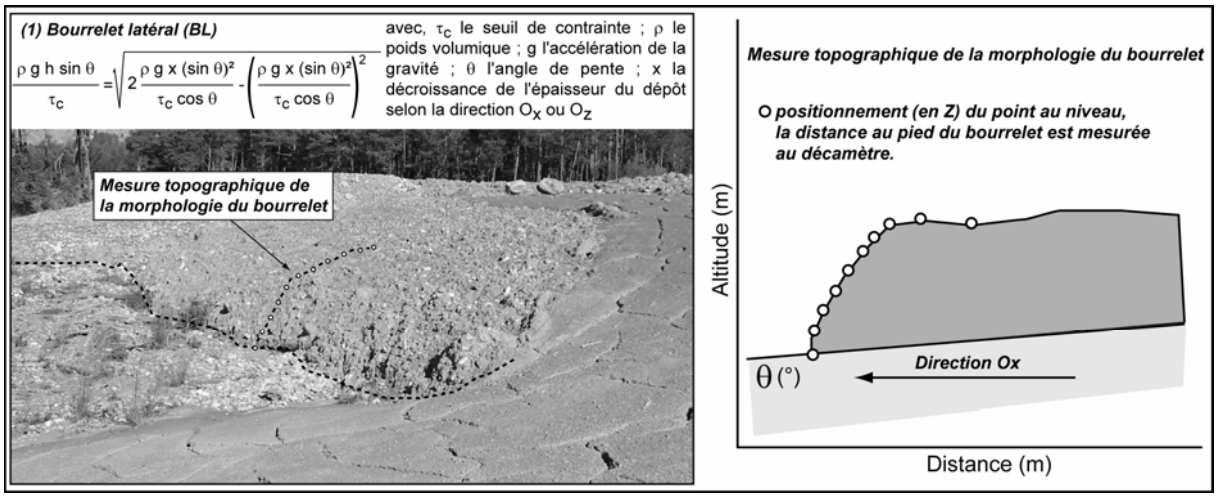


Figure 5.24 *: Exemple de mesure topographique de la morphologie d'un bourrelet de la lave torrentielle de 2003 sur le torrent de Faucon (FAU03_1).*

Une analyse de sensibilité sur la détermination du seuil de contrainte à partir de plusieurs mesures indique une plage de variation de 8% pour un même événement. Les valeurs déterminées sur les lobes frontaux sont généralement supérieures de 15% à celles évaluées sur les bourrelets latéraux : cette différence traduit le comportement rhéologique différent du front de l'écoulement (Major et Pierson, 1992 ; Major, 2000).

5.5.2. Analyse du comportement des dépôts de laves et des formations superficielles

Les seuils de contrainte déterminés au laboratoire sur la fraction < 400 µm et < 20 mm ne montrent pas de différences significatives (0.06 < erreur relative ξ < 0.17) ; en première approximation, **le comportement rhéologique de la matrice < 400 µm et de la matrice < 20 mm est similaire**. Les seuils de contraintes déterminés par les différentes méthodes (rhéométrie, affaissement, plan incliné et mesures terrain) sont proches et restent dans la marge d'erreur communément admise (Ancey, 2001a). Cependant il n'y a pas une correspondance parfaite entre le seuil de contrainte déterminé au laboratoire et celui défini à partir des mesures de terrain sur la morphologie des bourrelets (Malet, 2003). Une relation identique est trouvée dans les Alpes Suisses par Bardou (2002). L'augmentation du seuil de contrainte sur les bourrelets latéraux peut s'expliquer par l'incorporation de grains grossiers provenant du front (Coussot, 1997).

Les variations du seuil de contrainte (rhéométrie, affaissement, plan incliné) et du paramètre de forme κ de la relation de Herschel-Bulkley (*ie*. viscosité), avec la concentration volumique solide Φ suivent une loi exponentielle (Fig. 5.25a et b, - O'Brien et Julien, 1988 ; Locat, 1997). Pour des concentrations volumiques solides de Φ = 0.30 à Φ = 0.60, le seuil de contrainte τ_c varie sur trois ordres de grandeurs, alors que le paramètre de forme κ ne varie que sur deux ordres de grandeur.

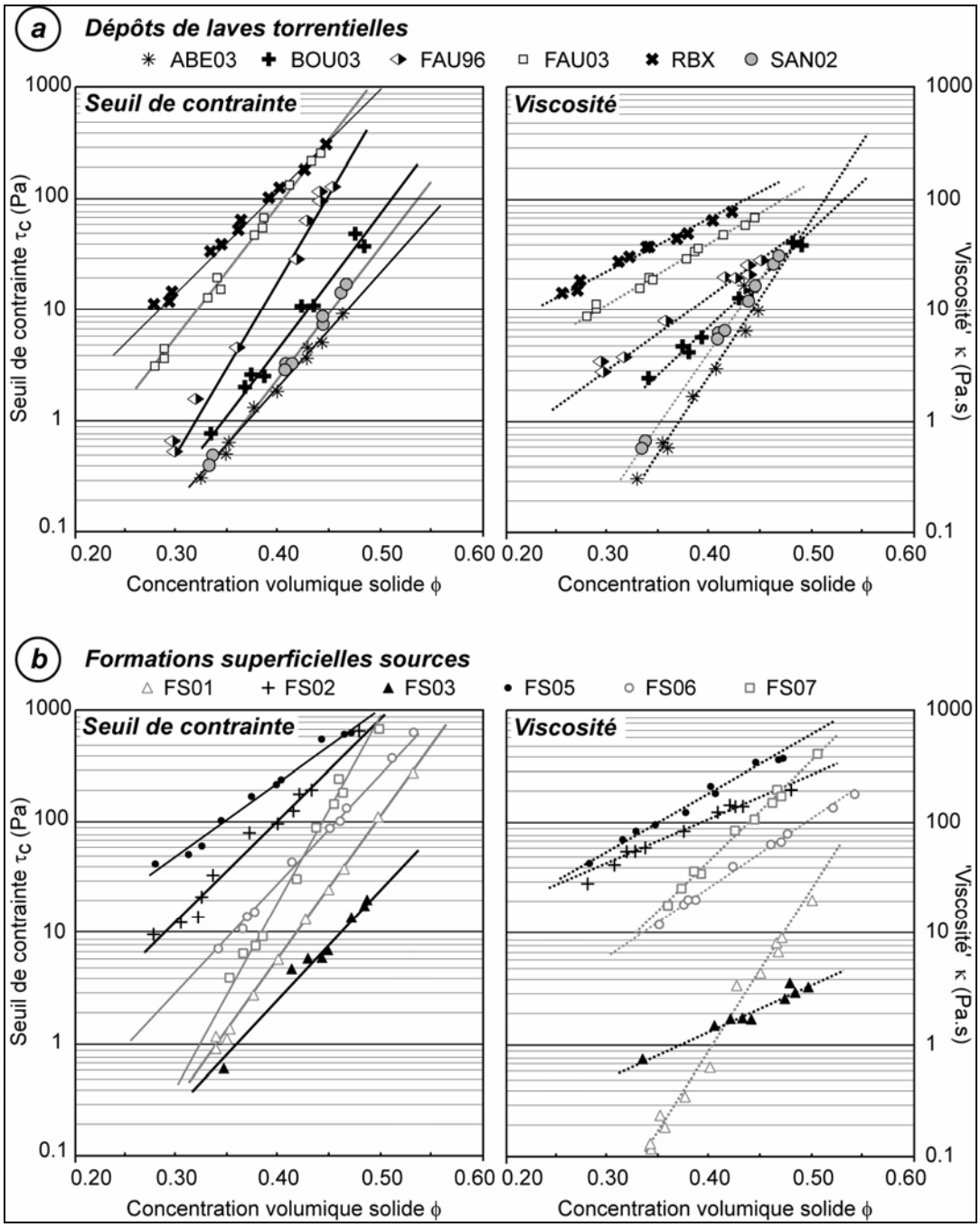


Figure 5.25 *: Variation du seuil de contrainte et du paramètre de forme de Herschel-Bulkley ('viscosité') avec la concentration volumique solide (essais rhéométriques + essais d'affaissement + plan incliné) pour six dépôts de laves torrentielles et six formations superficielles sources.*

Parmi les matériaux issus des **dépôts de laves torrentielles**, les matériaux ABE03, SAN03, BOU03 et FAU96 présentent les seuils de contraintes et les 'viscosités' les plus faibles quelle que soit la concentration volumique solide. A l'inverse, les matériaux RBX et FAU03 présentent les seuils de contraintes et les 'viscosités' les plus élevées (Fig. 5.25a).

Concernant les matériaux **des formations superficielles sources**, les moraines (FS01) et les formations superficielles issues des flyschs (FS03) présentent les caractéristiques rhéologiques les plus faibles ; les marnes noires (FS02) présentent les seuils de contraintes et les 'viscosités' les plus élevées au sein des formations superficielles sources (Fig. 5.25b). Les matériaux issus des produits de glissement présentent des caractéristiques rhéologiques assez élevées qui augmentent avec la présence de marnes noires dans le mélange.

La forme des relations est identique pour les matériaux de dépôts de laves torrentielles : forme caractéristique des matériaux **rhéofluidifiant**. Néanmoins, pour ABE03 la forme est différente, évoquant un comportement non-rhéofluidifiant proche d'un comportement **frictionnel-collisionnel**. Cette différence de comportement est à mettre en relation avec **la proportion élevée de sables** dans la texture du dépôt ABE03. On retrouve le même type de comportement pour les formations superficielles sources les plus sableuses, comme les moraines (FS02) et les formations superficielles sur flyschs (FS03). Les points expérimentaux sont alors sont mieux ajustés par un modèle linéaire de Bingham, que par le modèle non linéaire viscoplastique de Herschel-Bulkley.

Malgré les différences de granulométrie, minéralogie et de pétrographie, il est possible de matérialiser le comportement en écoulement par une courbe maîtresse unique par matériau dont les paramètres ne dépendent que du seuil de contraintes et des concentrations volumiques solides (Fig. 5.26) (Malet *et al.,* 2002).

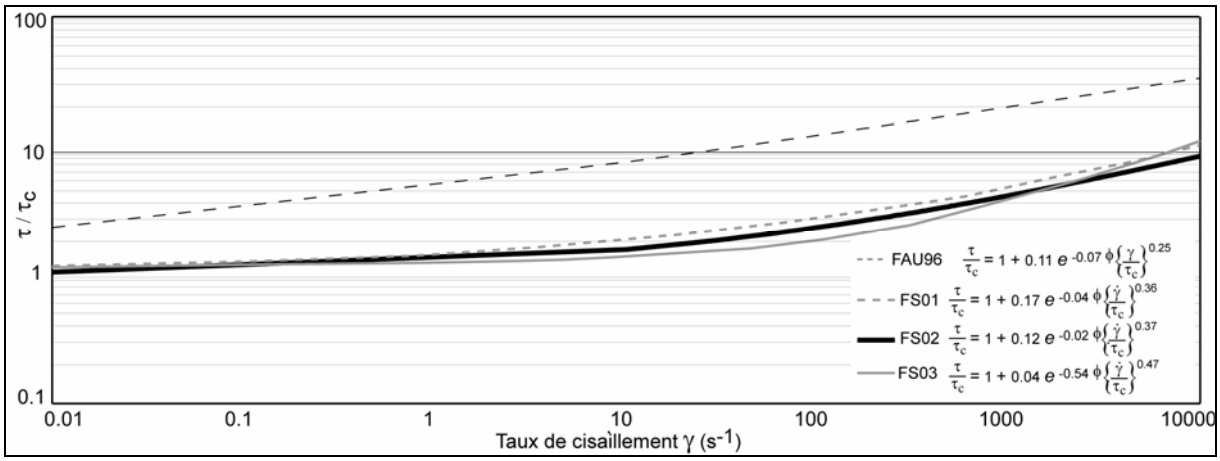


Figure 5.26 *: Courbes maîtresses des matériaux FAU96, FS01 (moraines), FS02 (marnes noires) et FS03 (formations sur flyschs).*

5.5.3. Comparaison des caractéristiques physiques des laves torrentielles avec des mélanges artificiels théoriques

Les matériaux sources incorporés dans les laves torrentielles survenues dans le bassin de *Barcelonnette* sont principalement des formations morainiques et périglaciaires (texture sablo-limoneuse, FS01), des marnes noires dégradées (texture argilo-sableuse, FS02) et des formations superficielles issues de la dégradation des flyschs (texture sableuse, FS03). Les laves torrentielles sont ainsi composées d'un mélange de ces formations ou de leurs assimilées (produits de glissement) dans des proportions variables en fonction du contexte géomorphologique.

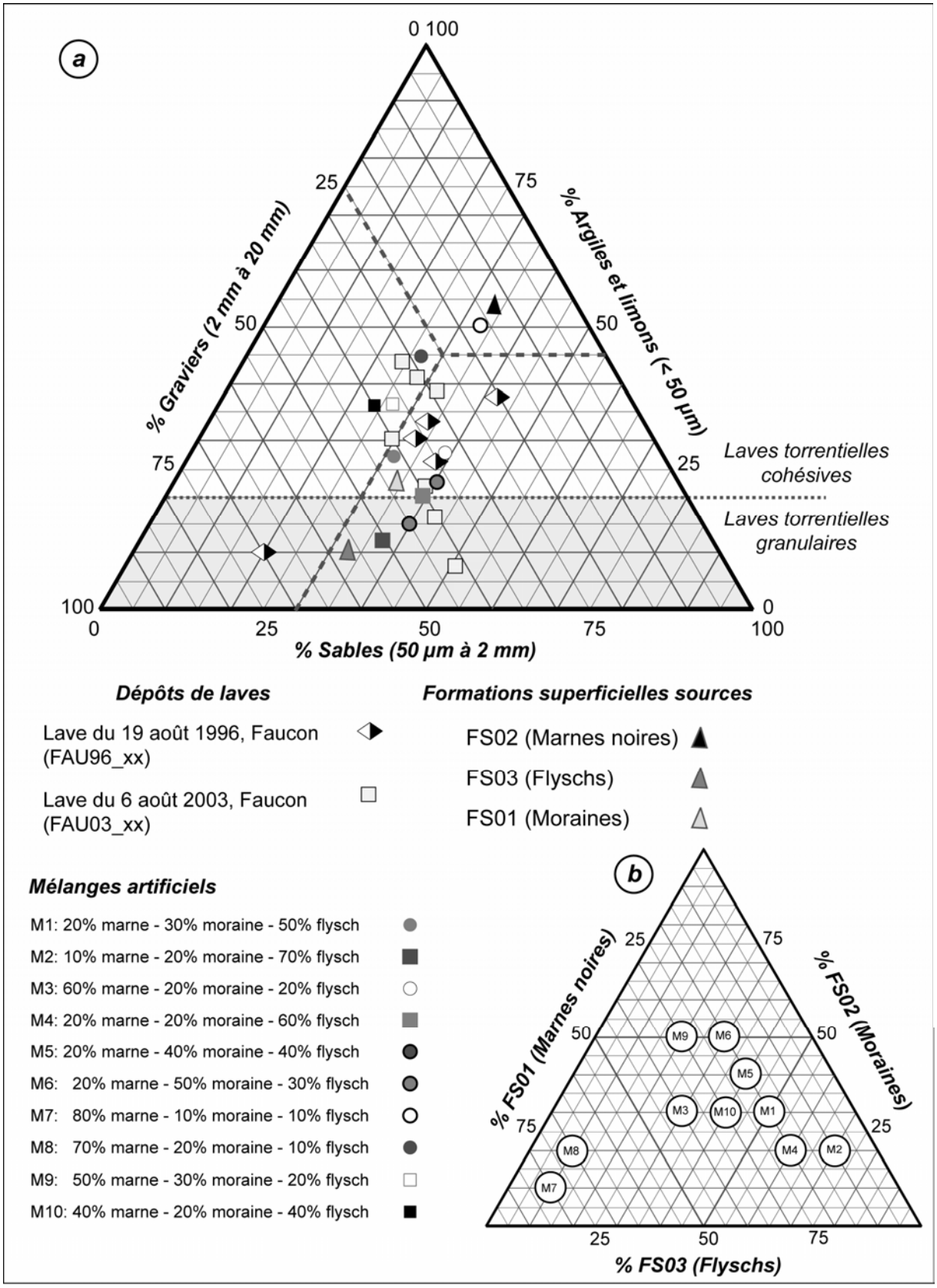


Figure 5.27 *: Caractéristiques des mélanges artificiels de formations superficielles sources ; (a) texture, (b) répartition des formations superficielles sources au sein des mélanges artificiels.*

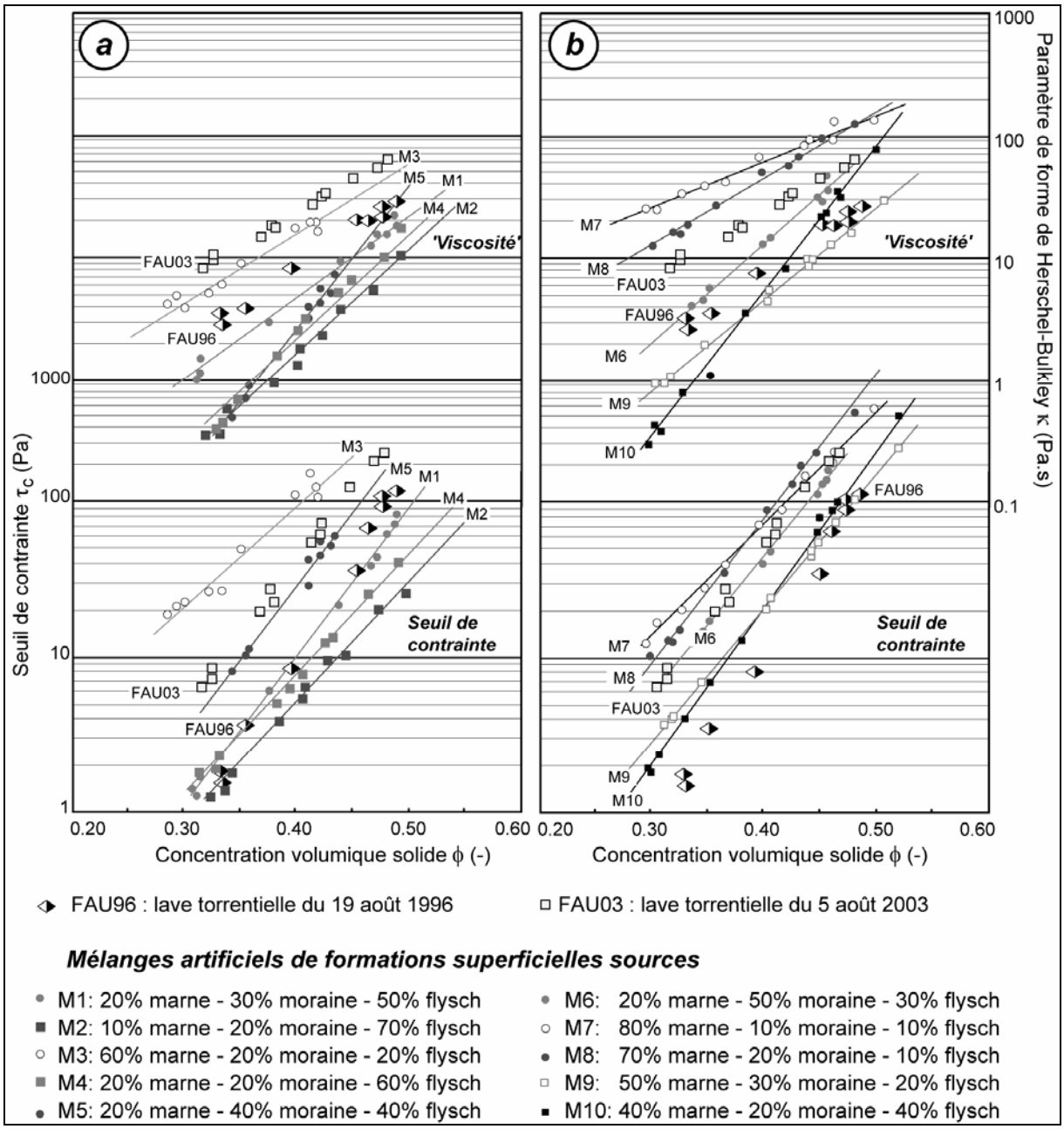


Figure 5.28 *: Caractéristiques rhéologiques des mélanges artificiels ; (a) pour les mélanges de M1 à M5, (b) pour les mélanges de M6 à M10.*

Ces matériaux présentent des caractéristiques sédimentologiques et rhéomécaniques différentes ; ils peuvent ainsi influencer les caractéristiques générales des laves torrentielles qu'elles nourrissent (Malet *et al.*, 2003b ; Remaître *et al.*, 2005b). Pour estimer leur influence respective, des essais rhéologiques[16] ont été réalisés sur des mélanges artificiels recouvrant une bonne partie du spectre granulométrique (Fig. 5.27a). Les proportions testées et présentées dans ce travail sont données sur la figure 5.27b. Le pourcentage de fraction fine augmente avec la proportion de marnes noires dans le mélange.

Pour les mélanges artificiels, le seuil de contrainte et la viscosité augmentent avec la proportion de marnes noires dans le mélange (Fig. 5.28). D'une manière générale, et assez

[16] Pour les mélanges artificiels, les caractérisations rhéologiques ont été réalisées à partir d'essais d'affaissement. Pour certains d'entre eux, ces essais ont été complétés par des essais rhéométriques plan-plan.

logiquement, le comportement est commandé par l'élément dominant au sein du mélange ; les mélanges qui contiennent une proportion plus élevée de flyschs (M2 et M4) et à un degré moindre de moraines (M6, M9 et M10) présentent les caractéristiques d'écoulement les plus faibles. L'incorporation de matériaux sableux et graveleux dans la texture a une influence plus grande sur la viscosité que sur le seuil de contrainte. Le comportement de M9 et M10 est proche de celui des matériaux de la lave torrentielle de 1996 (FAU96). Le comportement de M6 et de M5 est proche de celui des matériaux de la lave torrentielle de 2003 (FAU03). Malet *et al.* (2003b) montrent qu'une corrélation forte existe entre les caractéristiques rhéologiques et la texture du matériau, même pour de faibles variations granulométriques ; ce résultat préliminaire complète les travaux de Bonnet-Staub (1998) et Bardou (2002) qui ont principalement discriminé les écoulements torrentiels à 'matrice granulaire' des écoulements à 'matrice boueuse'.

5.6. Synthèse des caractérisations

Cette section propose une synthèse des différentes caractérisations effectuées dans ce chapitre. Cette synthèse est réalisée pour :

- la typologie des dépôts de lave torrentielle en fonction de leur texture ;
- la constitution d'une base de donnée sur les caractéristiques physiques des formations superficielles sources.

5.6.1. Typologie des dépôts de laves et évolution spatiale des caractéristiques granulométriques et pétrographiques

Au delà de l'analyse brute des résultats, une étude plus approfondie des résultats des caractérisations des matériaux doit apporter des informations supplémentaires sur la typologie des écoulements torrentiels. La typologie des laves torrentielles a fait l'objet de nombreux travaux (§ 1.2, § 1.3). La classification de Bonnet-Staub (1998), définie à partir d'un échantillonnage de douze torrents alpins, permet de distinguer les laves granulaires des laves cohésives (Fig. 1.5) à partir des classes granulométriques comprises entre 20 et 200 µm (Tab. 5.17) :

- **les laves torrentielles cohésives** ont une courbe granulométrique continue, uniforme et étalée représentant un matériau non trié et très hétérogène qui s'étend des argiles jusqu'au graviers sans réelle classe granulométrique prédominante ;
- **les laves torrentielles à matrice granulaire** sont elles aussi mal triées, mais possèdent une courbe granulométrique discontinue qui exprime le plus souvent un enrichissement dans les fractions grossières.

Tableau 5.17 : *Critères granulométriques de distinction d'un type de lave torrentielle (Bonnet-Staub, 1998)*

Laves à matrice granulaire	*Laves à matrice cohésive*
- de 16% d'éléments < 20 µm	+ de 16% d'éléments < 20 µm
- de 18% d'éléments < 40 µm	+ de 18% d'éléments < 40 µm
- de 20% d'éléments < 50 µm	**+ de 20% d'éléments < 50 µm**
- de 24% d'éléments < 100 µm	+de 24% d'éléments < 100 µm
- de 30% d'éléments < 200 µm	+ de 30% d'éléments < 200 µm

Bonnet-Staub (1998) souligne que le pourcentage de fines [0 – 0.05 mm] dans le mélange est le discriminant le plus efficace, le pourcentage d'argiles ne constituant pas un critère distinctif contrairement au pourcentage de limons et de sables fins.

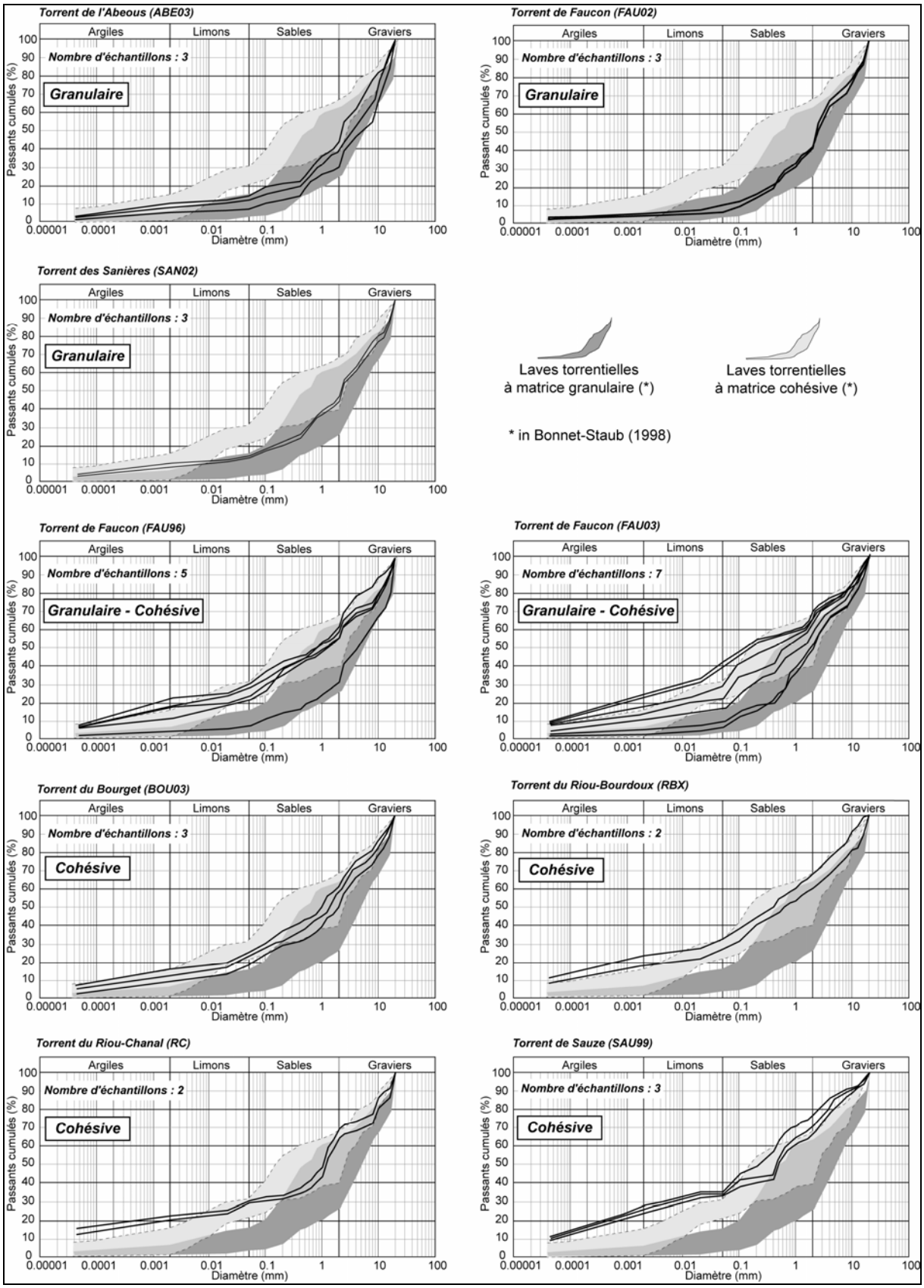


Figure 5.29 *: Typologie des dépôts de laves torrentielles.*

Les courbes granulométriques de neuf laves torrentielles du bassin de *Barcelonnette* ont été comparées aux fuseaux granulométriques distinctifs des laves torrentielles définis par Bonnet-Staub (1998) (Fig. 5.29). Sur les neuf événements :

- quatre sont de type boueux (cohésif) : BOU03, RBX, RC, SAU99 ;
- trois sont de types granulaires : ABE03, FAU02, SAN03 ;
- deux ont un fuseau qui couvre les deux types : FAU96 et FAU03.

Ces deux derniers ont les fuseaux granulométriques les plus larges ; mais il faut garder à l'esprit que ce sont les seuls cas où des dépôts de laves ont pu être prélevés dans des secteurs proches des zones de déclenchement. La coexistence des types de laves torrentielles dans des torrents tous localisés dans ce même secteur reflète parfaitement la diversité lithologique et morphologique des versants du bassin de *Barcelonnette*.

Certains fuseaux de ces événements sortent des fuseaux de Bonnet-Staub, notamment dans les petites classes granulométriques (argiles et limons) ; hormis le cas du *Bourget* (BOU03) tous les dépôts identifiés comme cohésifs ont un pourcentage de fines supérieur à celui de la classification. Ceci doit certainement être mis en relation avec le pourcentage de marnes noires présent dans les dépôts de laves (§ 4.2.1)

5.6.2. Base de données physiques des formations superficielles sources

Les données des différentes caractérisations ont été insérées dans une base de données. Cette base de données a été incorporée dans les tables d'attributs associées à chaque formation superficielle dans le SIG ArcView 3.1© (§ 4.1, Fig. 4.4). Cette base de donnée est utile voir indispensable pour mener un travail de modélisation et de définition de la susceptibilité des formations superficielles sources à déclencher ou a alimenter une lave torrentielle.

Les informations contenues dans cette base de donnée proviennent des caractérisations menées durant ce travail de thèse, de données acquises par les membres de notre équipe de recherche (Genet et Malet, 1997 ; Hermann, 1997 ; Klotz, 1998 ; Pierre et Remaître, 1998 ; Remaître, 2000 ; Schmutz, 2000 ; Guillon, 2001 ; Malet, 2003), de données mises gracieusement à notre disposition[17], et de données issues de la littérature. Ainsi, la table d'attribut associée à la cartographie des formations superficielles sources, en complément des informations morphologiques (épaisseur, volume), contient des descripteurs (granulométrie, poids spécifique) et des valeurs caractérisant les propriétés mécaniques (indice de plasticité, limite de liquidité, cohésion, angle de frottement interne). Deux grands groupes de formations superficielles sources peuvent être distingués :

- le groupe **des matériaux 'cohésifs'** est formé des produits de glissements (FS05, FS06 et FS07) et des formations superficielles marneuses (FS02). Leur granulométrie est relativement fine (D50 < 1 mm), leur indice de plasticité est fort (10 – 17%) et leur cohésion (c') est élevée (>11 kPa) ;

- le groupe **des matériaux 'granulaires'** est formé des moraines (FS01), des flyschs (FS03) et dans une moindre mesure des éboulis fins (FS04). Ce sont de formations grossières (D50 > 1.5 mm), peu plastiques (Ip < 9%) et qui possèdent une cohésion globalement peu élevée.

[17] Des données ont été mises gracieusement à la disposition de notre équipe de recherche par J. Locat (*Centre de Géotechnique et de Génie Géologique, Université de Laval, Quebec*), par T. van Asch (*Université d'Utrecht*) et par G. Le Mignon (*Centre de Géologie de l'Ingénieur à l'Ecole des Mines de Paris*).

5.7. Conclusion du chapitre 5

Les informations relatives aux caractéristiques physiques des laves torrentielles développées dans les torrents du bassin de *Barcelonnette* et des formations superficielles sources associées sont particulièrement instructives dans le cadre de la gestion des risques liés au déclenchement, à la propagation et au dépôt des laves torrentielles :

- les caractéristiques granulométriques des dépôts de laves torrentielles sont variables d'un torrent à un autre. La **texture des dépôts de laves torrentielles** dans le bassin de *Barcelonnette* présente **une absence d'une classe granulométrique prédominante**. Il s'agit de dépôts **hétérogènes et faiblement triés**. Ils recouvrent quatre classes texturales : des argiles sableuses (AS) aux sables (S). Ainsi, certains de ces dépôts définissent les laves associées comme **boueuses**, d'autres, au contraire, comme **granulaires** ;

- les caractéristiques physiques des **formations superficielles sources** montrent que leur **susceptibilité à déclencher ou à alimenter une lave torrentielle est particulièrement élevée**. Les moraines (FS01) et les flyschs (FS03) sont **peu plastiques** et ont des **caractéristiques de résistance faibles**. Leurs caractéristiques hydrodynamiques montrent que globalement les matériaux sources sont perméables (FS03) à semi-perméables (FS01 et FS02) favorisant le ruissellement ou l'infiltration en fonction notamment de la configuration géomorphologique ;

- pour des **gradients de cisaillement élevés** (γ > 10-6 s^{-1}), dans la gamme de concentration volumique solide ϕ = 0.25 – 0.50, les matériaux de laves torrentielles présentent un comportement **viscoplastique rhéofluidifiant non thixotrope** bien représenté par un modèle empirique non-linéaire de *Herschel-Bulkley* ou un modèle *bi-linéaire*, dont les paramètres augmentent avec la concentration volumique solide. Des différences significatives existent entre le comportement des formations superficielles sources, ainsi dans certains cas, les moraines ou les flyschs présentent un comportement **non rhéofluidifiant** plus proche d'un modèle empirique de *Bingham* ;

- l'analyse des caractéristiques **granulométriques** et **pétrographiques** de plusieurs dépôts de laves d'un événement montre que ces **caractéristiques peuvent évoluer au fur et à mesure de la propagation**. Pour les laves torrentielles de 1996 et 2003, ces analyses mettent clairement en évidence **un enrichissement de la lave en matériaux fins de l'amont vers l'aval**. La pétrographie suggère que cette augmentation est liée, entre autres, à l'augmentation progressive de la proportion de **marnes noires** dans le mélange ;

- pour des **mélanges artificiels** 'marnes-moraines-flyschs', le seuil de contrainte et la viscosité **augmentent sensiblement** avec la proportion de **marnes noires** dans le mélange. Les mélanges constitués majoritairement de **flyschs,** et à un degré moindre de **moraines,** présentent les **seuils de contrainte et les viscosités les plus faibles**.

Ces résultats sont un premier pas dans la caractérisation du fonctionnement global des laves torrentielles dans le bassin de *Barcelonnette*. Ils ont permis de **différencier** le type de laves torrentielles et les matériaux sources et de créer une **base de données** nécessaire pour l'utilisation de modèles de déclenchement, de propagation et de dépôt.

Dans le chapitre 4, les caractéristiques morphologiques de plusieurs événements de laves torrentielles survenus dans le torrent de *Faucon* ont été décrites ; les résultats de ce chapitre complètent cette description. La confrontation de ces résultats avec l'analyse géomorphologique détaillée de trois événements torrentiels sur le torrent de *Faucon* doit permettre de reconstituer la cinématique de ces événements pour définir des **scénarios pour la modélisation,** le plus proche possible des conditions 'réelles' sur le terrain.

Chapitre 6 : ANALYSE DE LA DYNAMIQUE TORRENTIELLE DU TORRENT DE FAUCON

A partir des résultats obtenus sur les caractéristiques **morphologiques** (Chapitre 4) et les caractéristiques **physiques** des dépôts de laves et des formations superficielles sources (Chapitre 5), l'objectif premier de ce chapitre est **de proposer une interprétation du fonctionnement de l'appareil torrentiel de *Faucon* pour chacun des événements de 1996, 2002 et 2003**. Cette interprétation des phases de déclenchement, de propagation et de dépôt est exposée en termes de volumes écoulés et de types de matériaux impliqués. Elle doit permettre de mieux cerner les conditions de fonctionnement des laves torrentielles dans le torrent de *Faucon* et plus généralement dans les bassins marneux.

Plusieurs méthodes d'estimation des paramètres des laves torrentielles ont été présentées dans le chapitre premier. Elles demeurent généralement très 'locales' et attachées à une région ou un secteur d'application. Néanmoins, elles sont utilisées dans la pratique pour d'autres régions, faute de modèles disponibles. Une difficulté majeure est de pouvoir **confronter ces méthodes aux données réelles** en l'absence d'observations complètes et détaillées. Ainsi, cette reconstitution passe, tout d'abord, par une estimation des paramètres hydrauliques (volumes globaux et caractéristiques d'écoulement) de plusieurs événements torrentiels. Paramètres qui sont ensuite confrontés aux observations de terrain et à autres données sédimentologique, géomorphologique et rhéologique.

Les milieux naturels sont complexes par nature. Pour comprendre leurs fonctionnements, il est ainsi nécessaire d'identifier les facteurs contrôlant leurs dynamiques. Les approches systémiques et statistiques permettent d'appréhender ce type de milieu dans sa globalité. Ainsi, le deuxième objectif de ce chapitre est d'**identifier ces facteurs contrôlant la dynamique torrentielle** : (1) en estimant le poids relatif de chacun de ces facteurs à partir d'une analyse en composantes principales (ACP) et, (2) en classant les biefs fonctionnels du torrent à partir d'une classification hiérarchique ascendante (CAH). Enfin les résultats de ces analyses statistiques sont confrontés aux observations des événements de laves torrentielles.

6.1. Interprétation des trois événements torrentiels du torrent de Faucon

Les modèles de laves torrentielles, en termes de déclenchement, de propagation et de dépôt, n'ont d'utilité que s'ils peuvent être confrontés à des observations de terrain et à des analyses en laboratoire. La reconstitution de trois événements torrentiels survenus dans le torrent de *Faucon* doit ainsi permettre de constituer une base d'informations utilisables à des fins de modélisation. Pour chaque événement sont successivement évoquées :

- les **conditions de déclenchement** en termes de localisation et de mécanismes déclencheurs, et de types et de volumes de matériaux sources ;

- les **conditions de propagation** en insistant sur les variations de volumes durant un même événement. Ces variations de volumes sont étudiées en termes de zones d'érosion/contribution et de dépôt ;
- les **conditions de dépôt** en évoquant les volumes des matériaux déposés et leur localisation.

Dans ce travail, les variations de volumes de matériaux sont estimées par l'étude conjointe du profil en long (1/1000ème) et d'observations de terrain. Cette approche a déjà fait l'objet de travaux récents (Lehmann *et al.*, 1996 ; Spreafico *et al.*, 1996 et Veyrat-Charvillon, 2005). Le volume de la lave et des matériaux provenant des zones contributives et les autres caractéristiques de la lave torrentielle sont ainsi étudiés à l'échelle du bief pour les trois phases et pour les trois événements.

Pour replacer les trois événements dans un contexte plus global, les caractéristiques hydrauliques de ces événements doivent être comparées aux paramètres hydrauliques globaux (Rickenmann, 1999). L'estimation des paramètres hydrauliques constitue ainsi une étape préliminaire indispensable.

6.1.1. Estimation des paramètres hydrauliques globaux pour le torrent de Faucon

La mise en place de systèmes de protection et de correction torrentielle efficaces nécessite d'estimer les paramètres hydrauliques d'un événement de référence (§ 1.4). Dans plusieurs travaux (Costa, 1984 ; Johnson, 1984 ; Hungr *et al.*, 1984 ; PWRI, 1988), des formules empiriques ont été proposées pour estimer ces paramètres. La validité de ces formules est difficile à évaluer car :

- la variété des formations superficielles sources est très grande d'un bassin torrentiel à un autre ;
- le nombre d'observations en temps réel d'événements torrentiel est très limité ;
- les problèmes d'échelle rendent délicat la correspondance entre tests en laboratoire (rhéologie sur plan incliné par exemple) et événements réels ;
- les formules ne tiennent pas compte des dispositifs de correction et de protection torrentielle.

Rickenmann (1999) précise que les valeurs calculées à partir de ces formules doivent donc être considérées avec beaucoup de prudence car les ordres de grandeur des résultats obtenues avec ces formules peuvent varier de 1 à 100. Il indique également que ces formules ne doivent être utilisées qu'à titre indicatif et être, si possible, confrontées aux données historiques et aux observations de terrain (Aulitzky, 1982 ; Nakamura, 1980 ; Costa, 1987).

6.1.1.1. Estimation des volumes globaux

En première approximation, la détermination du volume global d'une lave torrentielle permet d'estimer les autres paramètres hydrauliques associés : le débit de pointe, la distance de parcours ou bien encore la vitesse de propagation (Ikeya, 1989 ; Mizuyuama *et al.*, 1992 ; Schilling et Iverson, 1997).

Dans la plupart des cas, les volumes d'événements torrentiels sont déterminés à des amplitudes variables (volume(s) extrême(s), moyen, décennal, centennal, etc.). Les volumes sont définis d'une manière globale (à l'échelle du bassin versant) et en distinguant grossièrement le type de transport solide torrentiel (charriage, lave, etc.). De nombreux auteurs ont souligné que la validité d'une telle approche globale n'était pas satisfaisante car

elle ne reflètait que trop partiellement la diversité des processus mis en jeu. Les formules, qui ont évolué au cours du temps, ont été notamment développées dans différents pays (Tab. 6.1) en *Autriche* (Hampel, 1977 ; Kronfellner-Kraus, 1985), au *Canada* (Hungr *et al.*, 1984 ; Vandine, 1985 ; Jakob *et al.*, 2000 ; Bovis et Jakob, 1999), aux *Etats-Unis* (Johnson, 1984) en *Suisse* (Rickenmann et Zimmermann, 1993 ; Rickenmann, 1996), en *Italie* (D'Agostino *et al.*, 1996 ; Marchi et Trecca, 1996 ; Franzi et Blanco, 2001 ; Marchi et D'Agostino, 2004), au *Japon* (Takei, 1984) et en *France* (Brochot *et al.*, 2000).

Le volume de la lave torrentielle est estimé sur la base de paramètres communs exprimant les caractéristiques générales d'un bassin versant (surface, pente moyenne du chenal, longueur, pente du cône, etc.). Trois grands types de volume de lave torrentielle peuvent être estimés :

- le volume maximal (V) ;
- le volume moyen (V_a) ;
- et le volume pour un événement avec une période de retour de 100 ans (V_{100}).

***Tableau 6.1** : Modèles globaux de prédiction des volumes transportés par une lave torrentielle (modifié de Marchi, 1999).*

Formule	Région/Pays	Référence
$V_a = 150\ A_d\ (S_f - 3)^{2.3}$	Autriche	Hampel (1977)
$V_a = c\ 13{,}600\ A_d^{0.61}$	Japon	Takei (1984)
$V_a = 39\ A_d\ S_f^{1.5}\ IG$	Trentino (Italie)	D'Agostino *et al.* (1996)
$V_a = 29{,}100\ A_d^{0.67}$	Trentino (Italie)	D'Agostino (1996)
$V = 1100\ o\ R_{24}\ A_d$	Japon	PWRI (1984)
$V = (L_1 e_1) + \ldots + (L_i e_i)$	Colombie Britannique (Canada)	Hungr *et al.* (1984)
$V = K\ A_d\ I_c$	Autriche	Kronfellner-Kraus (1985)
$V = 10{,}000\ A_d$	Colombie Britannique (Canada)	Vandine (1985)
$V = L_c\ (110 - 2.5\ S_f)$ $15\% < S_f < 40\%$	Suisse	Rickenmann et Zimmermann (1993)
$V = L_c\ (6.4\ S_f - 23)$ $7\% < S_f < 15\%$	Suisse	Rickenmann (1996)
$V = 70{,}000\ A_d$	Italie du Nord	Marchi et Trecca (1996)
$V_{100} = 0.49\ A_d\ I_b^{1.6}\ IG\ (SNV+2)^{0.2}$	Vallée de la Maurienne (France)	Brochot *et al.* (2000)

V_a est le volume moyen (m^3), V est le volume maximal (m^3), V_{100} est le volume pour une période de retour de 100 ans (m^3), A_d est la surface du bassin versant (km^2), S_f est la pente du cône de déjection (%), c est un paramètre statistique, IG est un facteur géologique, o est un coefficient de ruissellement, R_{24} est le cumul de précipitations sur les 24H précédant l'événement (mm), L_i est la longueur d'un bief homogène (m), e_i est le taux de production des sédiments pour un bief homogène i ($m^3.m^{-1}$), K est un facteur de torrentialité, I_c est la pente moyenne du chenal (%),L_c est la longueur du chenal torrentiel (m), I_b est l'élévation du relief (m), SNV est la surface de sols nus (km^2).

Ces formules peuvent revêtir un caractère régional par l'introduction d'un facteur de torrentialité (Kronfellner-Kraus, 1985) ou d'un indice géologique (D'Agostino, 1996 ; Brochot *et al.*, 2000). A partir d'observations menées sur des laves torrentielles dans la province canadienne de *Colombie Britannique*, Hungr *et al.* (1984) et Jakob et Thompson (1997) ont formulé le volume de la lave torrentielle en fonction de la distance de parcours et du taux de production sédimentaire des berges et du lit torrentiel (contribution).

Le taux de production sédimentaire a été défini pour différents types de biefs torrentiels ; cette contribution varie de 0 à plus de 200 $m^3.m^{-1}$. Cette méthode est très proche des conditions de terrain, mais nécessite une connaissance approfondie de la morphologie du chenal pour estimer la contribution.

Les méthodes empiriques d'estimation des volumes moyens et maximaux ont été appliquées sur le torrent de *Faucon* (Fig. 6.1). Ces résultats conduisent aux remarques suivantes :

- l'estimation du volume moyen est relativement proche pour les trois formules. Le volume moyen oscille entre 75 000 et 95 000 m^3 ;
- les volumes maximaux sont très variables (entre 40 000 m^3 et 420 000 m^3) : (a) inférieurs à 60 000 m^3 avec les formules du PWRI, de Vandine et du VWHG-ETH, (b) supérieurs à 300 000 m^3 avec celles de Marchi et Trecca, et de Rickenmann et Zimmermann, et (c) compris entre 95 000 m^3 et 120 000 m^3 avec celles de Kronfeller-Kraus, de Zeller, et de Rickenmann.

Finalement, un volume moyen de 85 000 m^3 et un volume maximal de l'ordre de 120 000 m^3 seront retenus.

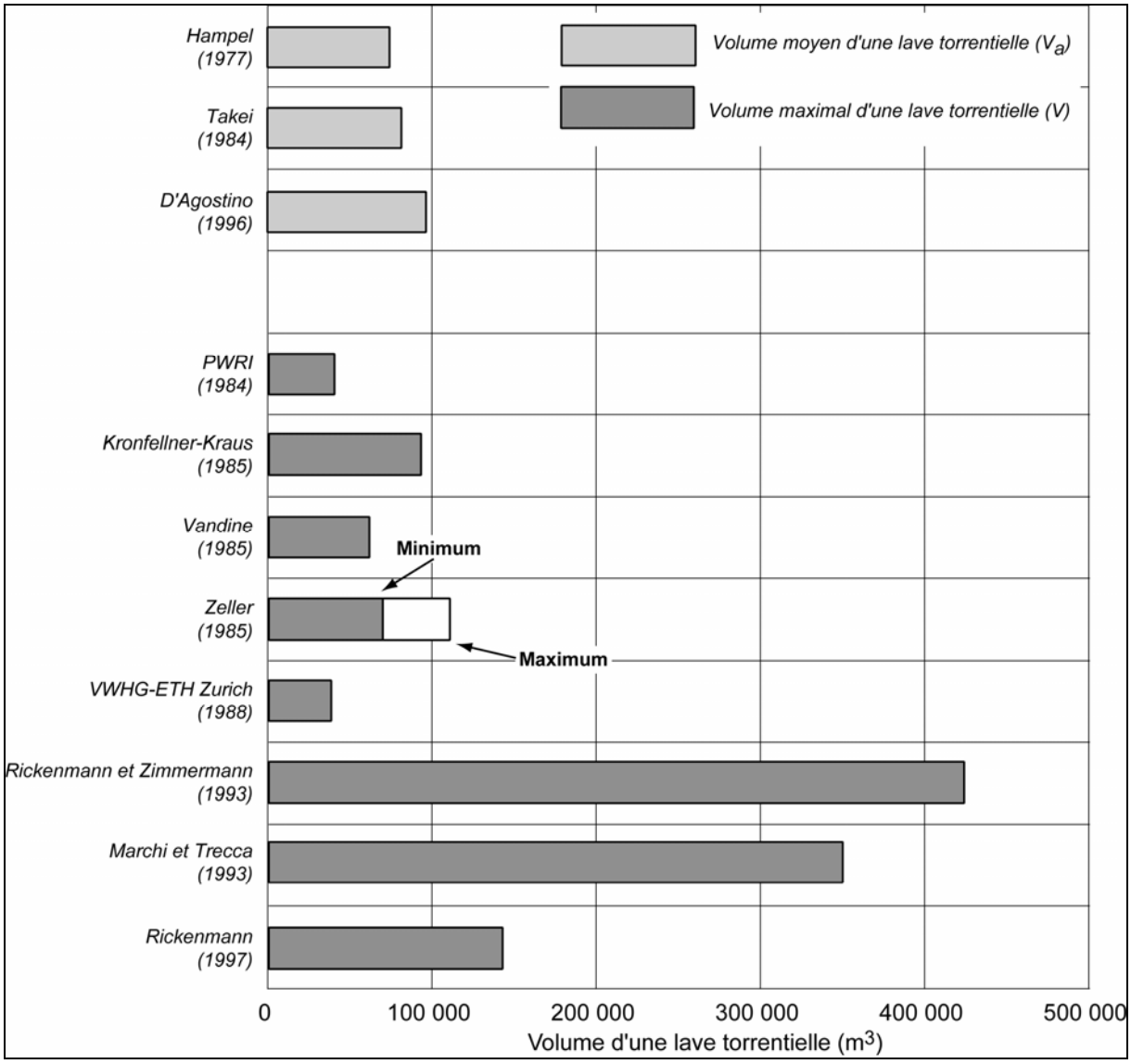


Figure 6.1 *: Comparaison des estimations des volumes moyens et maximaux à l'aide de formules empiriques sur le torrent de Faucon.*

6.1.1.2. Estimation des caractéristiques d'écoulement

Les caractéristiques d'écoulement (débit maximal, vitesse d'écoulement et distance de parcours) peuvent être estimées à partir du volume de la lave. Les caractéristiques d'écoulement ont été calculées pour un volume moyen et un volume maximal.

Rickenmann (1999) indique que **le débit maximal** d'un mélange eau-matériaux Q_{max} ($m^3.s^{-1}$) peut être relié au volume de la lave torrentielle par :

$$Q_{max} = 0{,}135\ V^{0.78} \qquad (1)$$

Cette formule a été développée au Japon à partir de l'étude de plusieurs centaines de laves torrentielles (Mizuyama *et al.*, 1991) et validée sur des données de laves torrentielles suisses (Rickenmann, 1999). Pour le torrent de *Faucon*, les débits maximaux associés à un **volume de lave moyen** (85 000 m^3) et à un **volume maximal** (120 000 m^3) correspondent respectivement à **944 $m^3.s^{-1}$ et 1236 $m^3.s^{-1}$**.

Contrairement au volume ou au débit de la lave, l'estimation de la **vitesse d'écoulement** v ($m.s^{-1}$) n'est pas globale, car elle tient compte de la géométrie du chenal au droit de la mesure (Fig. 6.2). Pour cette raison, les vitesses d'écoulement peuvent être données pour chaque événement, avec les caractéristiques géométriques associées (Tab. 6.2).

Toutefois, en l'absence de mesures ou d'observations directes pendant l'événement, les vitesses d'écoulement peuvent être tout de même estimées à partir de formules empiriques à partir de la géométrie du chenal. Néanmoins, ces formules estiment une vitesse qui ne reflète que partiellement les conditions de propagation car la vitesse d'une lave torrentielle n'est pas uniforme avec : (1) des différences entre le front et la queue d'une bouffée de lave, (2) des différences entre le centre de l'écoulement et les marges, etc.

L'estimation d'une vitesse d'écoulement moyenne comportant de nombreuses approximations, il est préférable d'estimer la vitesse de pic pour le dimensionnement des ouvrages de protection et de correction torrentielle (Meunier, 1991). **La vitesse d'écoulement de pic** peut être estimée à partir de deux méthodes.

La première méthode, appliquée pour les crues torrentielles, consiste à utiliser la formule empirique de Manning-Strickler (Ambroise, 1998).

$$v = 20\ R_H^{2/3}\ J^{1/2} \qquad (2)$$

où le facteur 20 correspond au coefficient de Strickler pour un lit torrentiel (en $m^{1/3}.s^{-1}$), R_H (en m) est le rayon hydraulique et J la pente sous forme adimensionnelle dans la portion du lit considéré. Son utilisation est possible, mais il faut garder à l'esprit que le processus d'écoulement d'une lave torrentielle se distingue de celui d'un écoulement d'eau claire.

La deuxième méthode, dite méthode de surélévation des courbes de Johnson (Johnson, 1984 ; Hungr *et al.*, 1984), peut être utilisée après une lave torrentielle à condition de trouver un endroit convenable pour relever différentes grandeurs (Fig. 6.2) :

$$v = (g\ R_c \cos\delta \tan\beta)^{1/2} \qquad (3)$$

où g représente l'accélération de la gravité ($m.s^{-1}$), δ (°) la pente du lit torrentiel, β l'angle (°) fait par la surface libre penchée (mesurée perpendiculairement à la direction d'écoulement) et R_c le rayon de courbure (m).

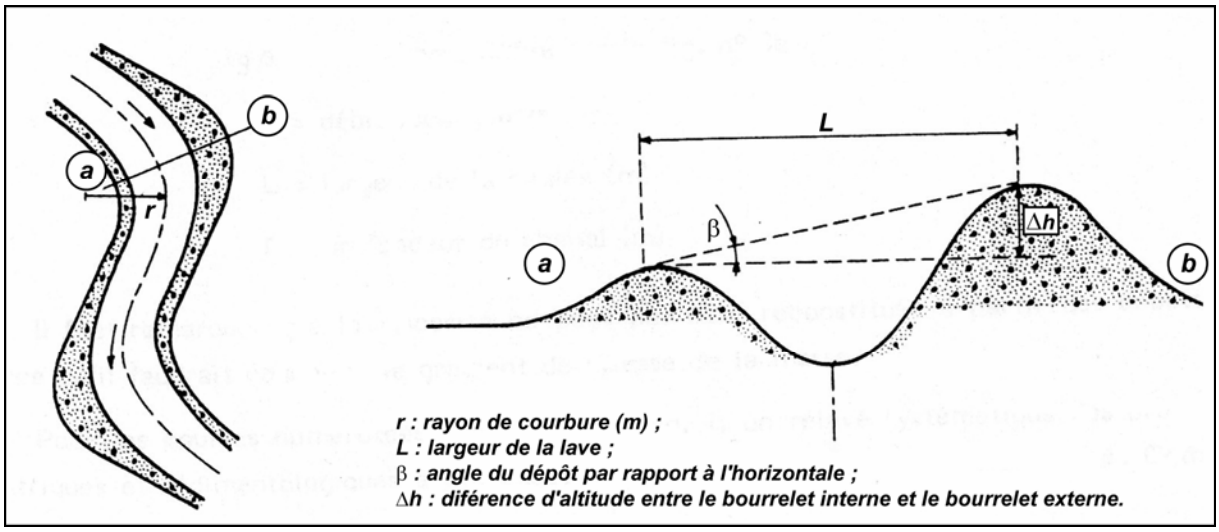


Figure 6.2 *: Morphologie des dépôts et définition des termes de l'équation de Johnson.*

Tableau 6.2 *: Estimation des vitesses d'écoulement pour les événements torrentiels survenus sur le torrent de Faucon en 1996, 2002 et 2003.*

	Section mouillée (m^2)	Périmètre mouillé (m)	Rayon hydraulique (m)	Pente du chenal (°)	Pente du chenal (m/m)	Rayon de courbure (m)	Angle du dépôt par rapport à l'horizontale (°)	Vitesse Manning 'Strickler' ($m.s^{-1}$)	Vitesse 'surélévation' 'Johnson' ($m.s^{-1}$)
FAU96_2	22.3	17.9	1.23	11	0.24	6.8	21	X	**5**
FAU96_1	20.9	18.6	1.13	13	0.29	7.5	19	X	**4.9**
FAU02_2	17.6	13.3	1.32	15	0.31	X	X	**10.8**	X
FAU02_1	15.4	12.2	1.26	9	0.20	X	X	**10.2**	X
FAU03_2	24.6	21.7	1.13	16	0.33	28.6	9	X	**8.9**
FAU03_1	22.1	19.8	1.11	12	0.27	24.7	7	X	**7.1**

Les valeurs de vitesses d'écoulement sont discutées dans l'étude comparative des phases de propagation des trois événements (§ 6.1.2.3.)

L'estimation de **la distance de parcours** (m) est fortement dépendante des caractéristiques topographiques du chenal d'écoulement et du cône : immobilisation de la lave dans un portion où la pente est faible, dépôts et débordements à l'amont des sections étroites, obstacles naturels ou anthropiques dans le chenal, etc. A partir de l'analyse de 82 événements torrentiels, Rickenmann (1999) a cependant démontré une relation entre le volume de la lave et la distance de parcours. Les distances de parcours moyenne (L_{moy}), maximale (L_{max}) et minimale (L_{min}) peuvent être estimées par les équations suivantes (4, 5 et 6) :

$$L_{moy} = 75\ V^{0.31} \quad (4)$$

$$L_{max} = 350\ V^{0.25} \quad (5)$$

$$L_{min} = 6.2\ V^{0.45} \quad (6)$$

Tableau 6.3 *: Estimation des distances de parcours moyennes, minimales et maximales pour le torrent de Faucon à partir des formulations de Rickenmann (1999).*

Distance de parcours (m)	Volume moyen (85 000 m^3)	Volume maximal (120 000 m^3)
L_{min}	1 025	1 200
L_{moy}	2 530	2 815
L_{max}	5 975	6 515

Les valeurs des distances de parcours associées aux volumes moyen et maximal sur le torrent de *Faucon* (Tab. 6.3) varient grossièrement entre 1 000 et 6 500 m. Il est intéressant de constater que la différence importante (35 000 m^3) entre le volume moyen et le volume maximal de lave se traduit par des différences modérées dans l'estimation des distances de parcours.

6.1.1.3. Conclusion

A partir de différentes formules plus ou moins empiriques et de règles d'approximation basées sur l'expérience, les paramètres hydrauliques ont été estimés soit de manière globale, soit sur la base de relevés morphologiques et de traces dans le chenal, pour chacun des trois événements survenus au torrent de *Faucon*. On peut retenir des ordres de grandeur suivants :

- volume attendu de la lave : volume moyen (85 000 m^3) et volume maximal (120 000 m^3) correspondant à un débit maximal d'un mélange eau-matériaux respectivement de 944 $m^3.s^{-1}$ et 1236 $m^3.s^{-1}$;
- vitesses d'écoulement de pic : 4.9 à 8.9 $m.s^{-1}$ pour les deux laves et de l'ordre de 10 $m.s^{-1}$ pour la crue ;
- distances de parcours moyennes et extrêmes : 1 000 et 6 500 m selon les volumes moyens et maximaux retenus.

Ces ordres de grandeur devront être confrontés aux observations de terrain pour (1) en vérifier la validité (ou la cohérence) et (2) définir la capacité de stockage du chenal, les possibles points d'engorgement et de débordement et enfin l'extension de l'étalement des volumes débordés.

Sur la base de ces informations, les scénarios les plus vraisemblables doivent être identifiés parmi toute la gamme d'événements possibles. Les formules utilisées ne doivent cependant pas faire illusion sur le fait qu'il ne s'agit que d'un ordre de grandeur des paramètres hydrauliques les plus importants. Une meilleure évaluation nécessite des mesures plus précises et des analyses *in situ*.

6.1.2. Reconstitution des événements torrentiels du Faucon

Les données disponibles pour la reconstitution des trois événements survenus sur le torrent de *Faucon* ne sont pas homogènes pour les trois événements, à la fois sur leur quantité et sur leur qualité : les données relatives à la lave torrentielle d'Août 2003 sont les plus fournies et précises. De ce fait, l'analyse de cet événement sera plus poussée que pour les deux autres, notamment pour la phase de propagation. Pour chacun des trois événements, la reconstitution des événements est donnée chacune des trois phases de la cinématique des écoulements : déclenchement, propagation et dépôt.

6.1.2.1. Les conditions de déclenchement

Dans cette sous-section, des hypothèses étayées par les observations de terrain et les analyses en laboratoire sont exposées. Elles concernent :

- le mécanisme de déclenchement et sa localisation ;
- le volume de matériau libéré par la zone de déclenchement et leurs caractéristiques physiques.

a) La lave torrentielle du 19 août 1996

Pour l'interprétation de cet événement, le lecteur doit garder à l'esprit que les différentes observations ont été recueillies deux ans après les faits. Il s'agira donc de rester prudent dans notre interprétation. Cet avertissement est également valable pour l'étude des conditions de propagation et de dépôt. Les observations permettent de localiser grossièrement la zone de déclenchement de la lave torrentielle de 1996 entre le seuil 54 (bief 81) et seuil 56 (bief 85) (Fig. 6.3).

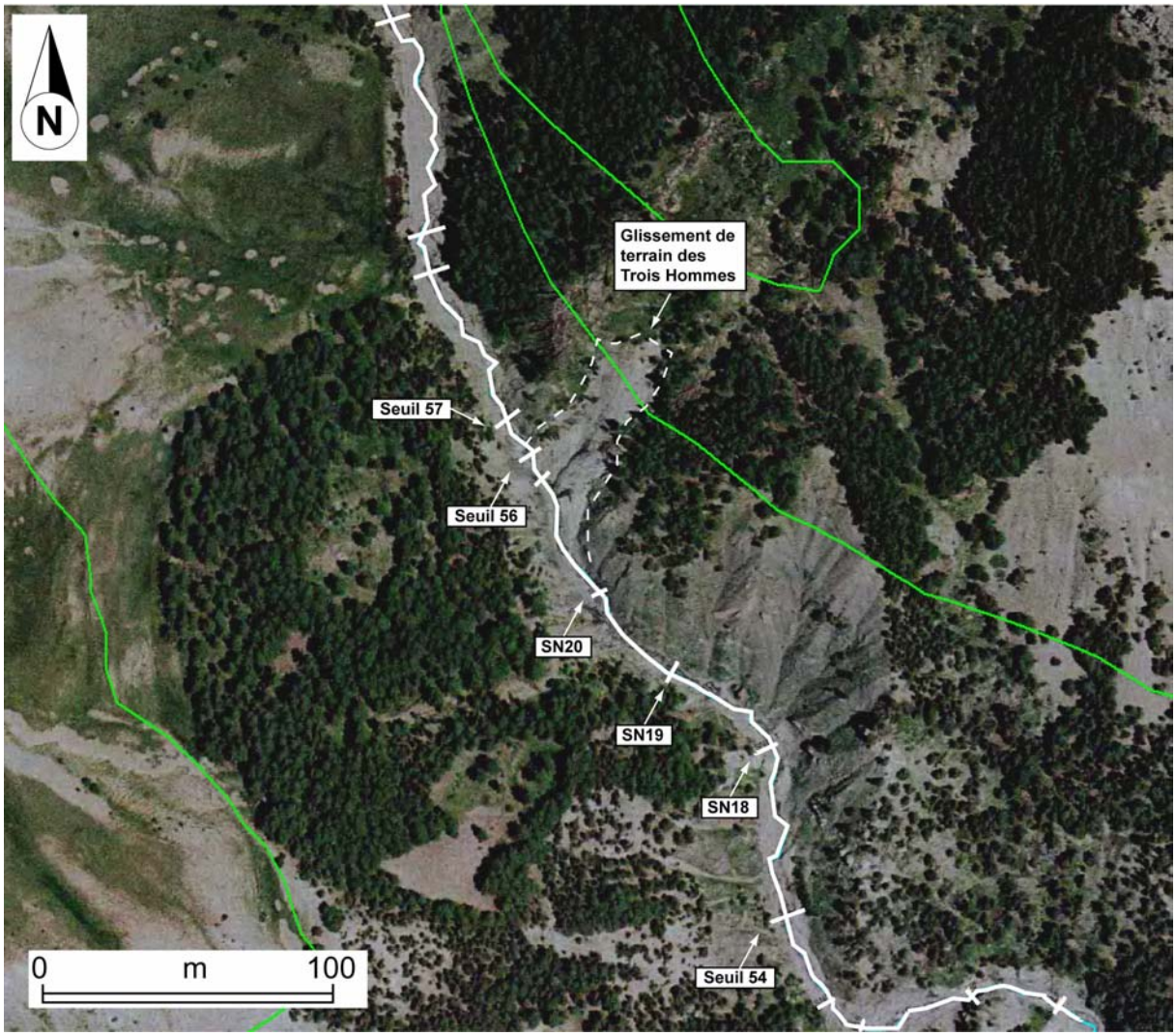


Figure 6.3 *: Vue aérienne de la zone de déclenchement de la lave torrentielle du 19 août 1996 sur le torrent de Faucon.*

Plusieurs éléments incitent à penser que ce secteur correspondrait à la zone de déclenchement :

- **l'affouillement dans cette zone est particulièrement important** : il atteint près de 5 m en amont immédiat du seuil 54 détruit (Fig. 6.4). La morphologie du lit est chahutée avec la présence conjointe d'une gorge particulièrement profonde et instable et de nombreux petits glissements de terrain affectant les berges et les versants. Les seuils 54, 55, 56 et 57, en maçonnerie de pierres sèches datant des années 1880, sont entièrement détruits : seules des vestiges des ailes sont encore visibles et la partie centrale a presque complètement disparue selon les seuils. A noter qu'aucun vestige n'a été retrouvé pour le seuil 55 et son implantation initiale nous est inconnue.

Figure 6.4 *: Vue sur les vestiges du seuil 54, le niveau sommital du seuil est représenté en pointillé blanc.*

- **d'important débris encombrent le fond du lit**. Ils sont constitués de matériaux grossiers (certains blocs ont un volume supérieur à 1 m^3) et de débris végétaux (troncs d'arbres et branches). Ces débris sont caractéristiques d'un embâcle avec un enchevêtrement et un aspect particulièrement chaotique. L'épaisseur de ces débris diminue vers l'amont ;
- **des traces de boue ont été relevées à plusieurs mètres au dessus du lit torrentiel** sur les troncs d'arbres situés de part et d'autre du chenal. Ces traces de boue témoignent d'une montée d'eaux boueuses à cet endroit, elles se situent entre 5 et 6 mètres au dessus du niveau du lit torrentiel lors de nos observations en septembre 1998.

Ces observations sont tout à fait caractéristiques **d'une rupture d'embâcle** à l'origine de la lave torrentielle de 1996. Sa localisation, en contrebas de la crête des *Trois Hommes,* coïncide avec les témoignages oculaires qui précisent que l'orage à l'origine de cet événement était localisé sur cette crête. Les matériaux de cet embâcle proviendraient : (1) pour partie, du lit torrentiel (et des stockages des plages de dépôt des seuils détruits lors de cet événement ?) ; (2) pour partie de matériaux issus du glissement des *Trois Hommes*, localisé à 200 m environ à l'amont du seuil 54 (Fig. 6.3 ; Fig. 6.5 ; § 4.2.1.5.) :

- Pour les matériaux du lit, ne disposant d'aucune information précise (dans les archives du service RTM) sur les caractéristiques des seuils de ce secteur et sur leur date d'endommagement puis de destruction, rien ne nous interdit de supposer qu'ils aient été détruits lors de cet événement, libérant ainsi les matériaux des plages de dépôts.
- Pour les matériaux issus du glissement des *Trois Hommes :* s'il n'apparaît pas sur la photographie aérienne de mai 1996, il est nettement visible sur celle 1997 (Fig. 6.6). Ainsi, soit les matériaux de ce glissement obstruaient déjà le chenal en pied du versant, et ils ont

été remobilisés ; soit ce glissement s'est déclenché lors de l'orage du 19 août 1996, et ces matériaux ont été directement mobilisés.

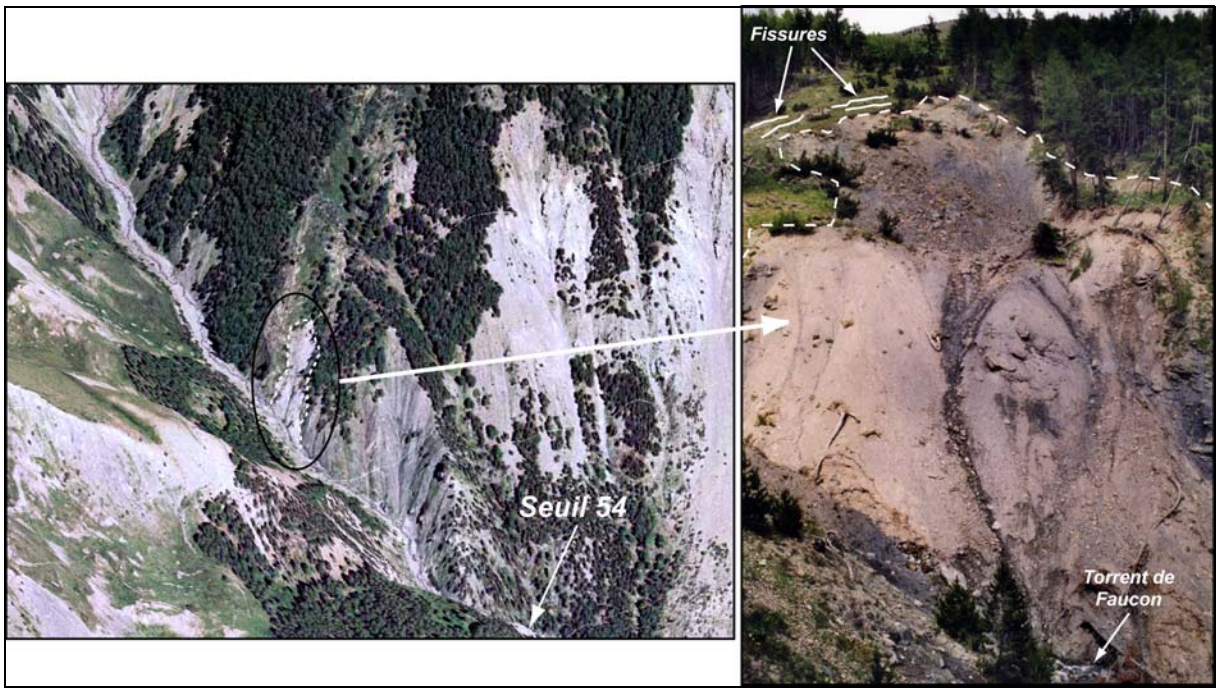


Figure 6.5 *: Ortho-photographie drapée sur le modèle numérique de terrain (mai 2000) et vue de face (juillet 2001) du glissement de terrain des Trois Hommes.*

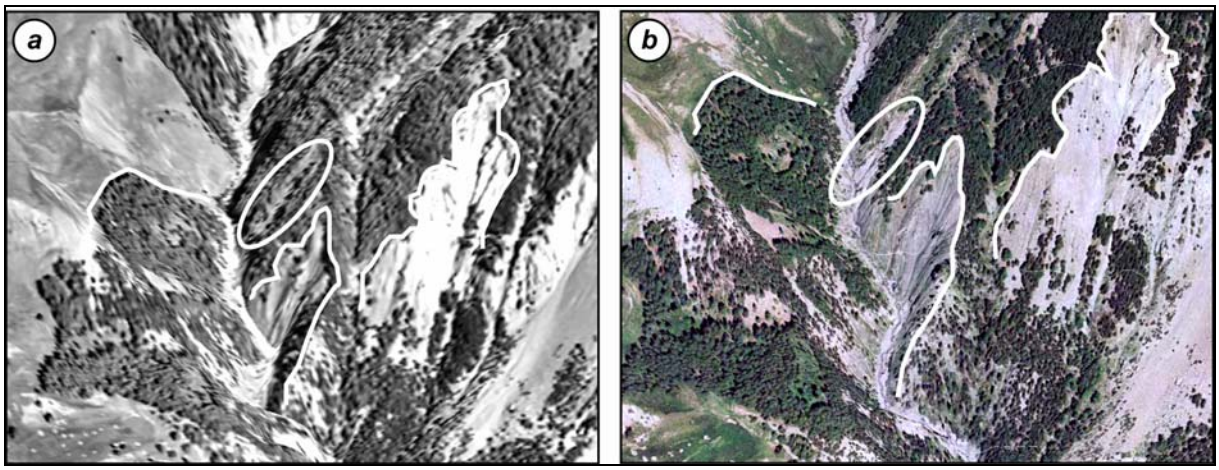


Figure 6.6 *: Ortho-photographies drapées sur le modèle numérique de terrain de la zone des Trois Hommes en mai 1996 (a) et en juin 1997 (b).*

Le volume libéré par la zone de déclenchement a été évalué, en considérant une hauteur maximale de 5 m pour l'embâcle, à partir du profil en long du torrent (Fig. 6.7) selon trois hypothèses :

- pour le seul bief 81 (amont seuil 54), le volume serait compris entre **2 000 et 2 500 m^3** ;
- pour les biefs 81 et 82, en supposant l'implantation du seuil 55 à proximité de SN18, et avant le changement de pente lié au seuil rocheux SN19 (Annexe 7), le volume serait compris **entre 3 500 et 4 500 m^3** ;
- pour une zone s'étendant, sur une distance d'environ 250 m, du seuil 54 au seuil 56, comprenant le glissement des *Trois Hommes* (volume libéré estimé entre 7 500

et 15 000 m^3), le volume libéré serait compris entre **12 000 et 20 000 m^3** (hypothèse vraisemblable aux vues des observations).

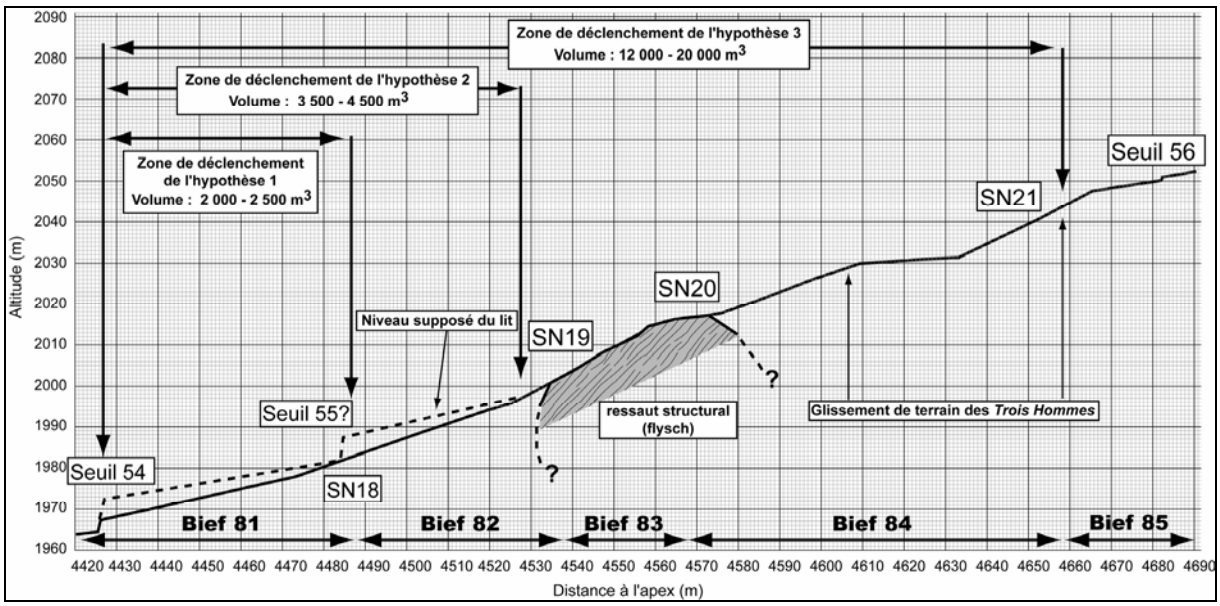


Figure 6.7 *: Profil en long de la zone de déclenchement probable de la lave torrentielle de 1996 sur le torrent de Faucon.*

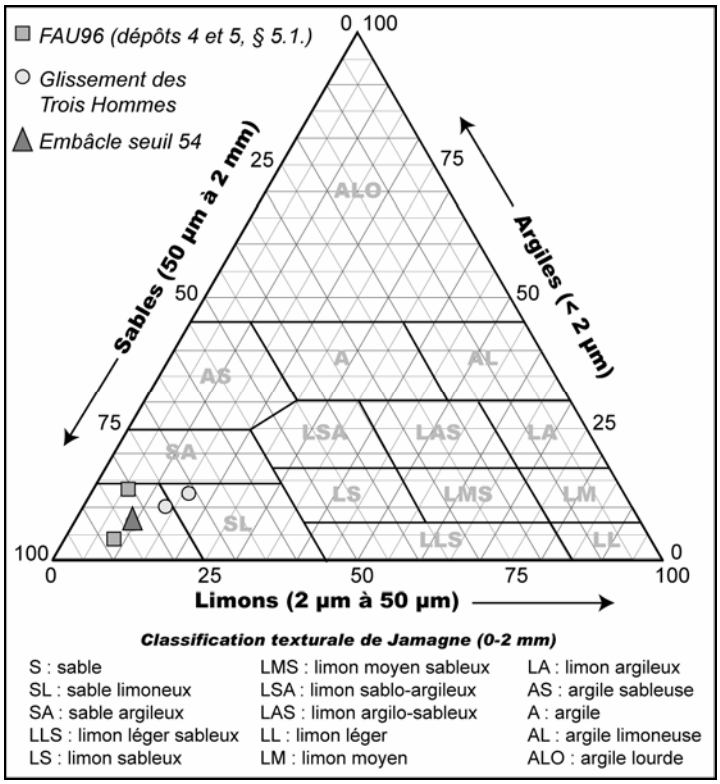


Figure 6.8 *: Comparaison entre la granulométrie de la lave torrentielle de 1996, de l'embâcle du seuil 54 et de celle du glissement des Trois Hommes.*

La comparaison entre les matériaux de l'embâcle, les matériaux du glissement des *Trois Hommes* et les dépôts de laves (FAU96_4 et 5) montre que leurs caractéristiques granulométriques sont relativement proches (Fig. 6.8) : ces matériaux correspondent tous à des matériaux sableux et granulaires. Ces similitudes confortent l'hypothèse que le déclenchement de la lave torrentielle est du à une rupture d'embâcle dont le volume provient

en grande partie du glissement de terrain des *Trois Hommes*. D'autant plus, comme il a été décrit et affirmé dans le chapitre 4, aucun dépôt de lave n'a été observé dans les zones fonctionnelles F et G.

b) La crue torrentielle du 4 juin 2002

L'événement du 4 juin 2002 s'est déclenché à la suite d'un violent orage localisé dans le bassin de réception du torrent de *Faucon*. La description morphologique du chenal après cet événement suggère que l'événement se soit déclenché dans la partie centrale du torrent ; les traces les plus significatives se localisent entre les seuils 47 et 85 (Fig. 6.9a et 6.9b). Cette zone correspond à un secteur qui au moment des faits, faisait l'objet de la construction de nouveaux seuils torrentiels (seuils 45N à 42N en 2001, seuils 85 à 88 en 2002, Fig. 6.9c).

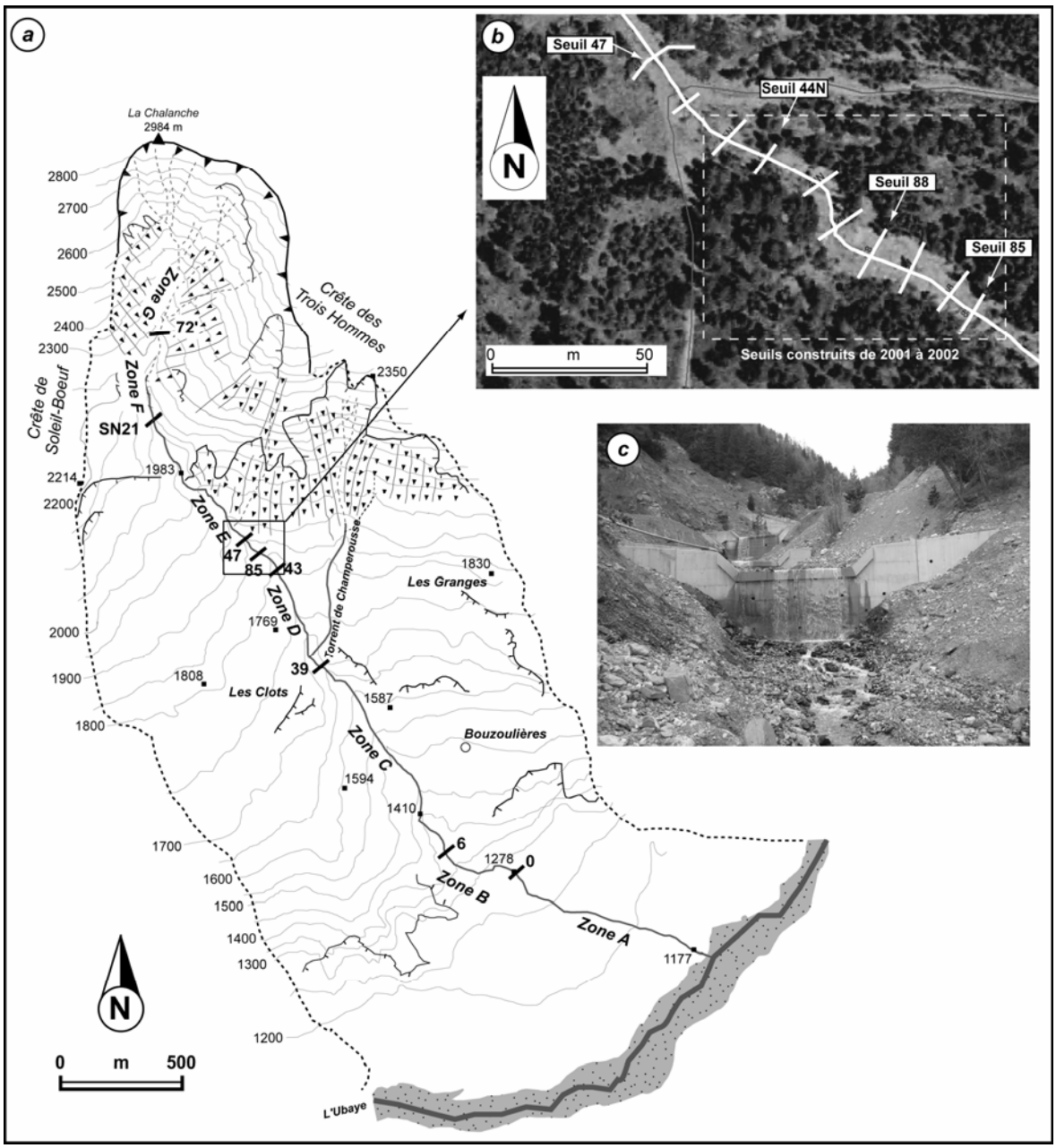


Figure 6.9 *: La zone de déclenchement de la crue torrentielle du 4 juin 2002.*

a : localisation de la zone dans le bassin versant du Faucon ;
b : vue aérienne de la zone ;
c : vue sur les seuils 88 à 85 (juin 2002).

Dans ce secteur, le lit est localement fortement incisé (entre 2 et 4 m) ; cette incision a notamment été très forte dans les plages à l'amont des seuils en travaux. Les déblais relatifs aux travaux ont été partiellement érodés puis déposés quelques mètres plus loin. Néanmoins, ces traces ne correspondent pas réellement à une zone de déclenchement, mais à des traces liées au passage d'un écoulement torrentiel. A l'amont immédiat de cette zone, au droit du franchissement du torrent de *Faucon* par le chemin de *Soleil-Bœuf*, une zone de dépôt (matériaux d'une épaisseur d'environ 1 m) s'étale sur une longueur d'environ 20 m. Les observations ont montré que les traces relatives au déclenchement de cet événement disparaissaient à l'amont du seuil 47.

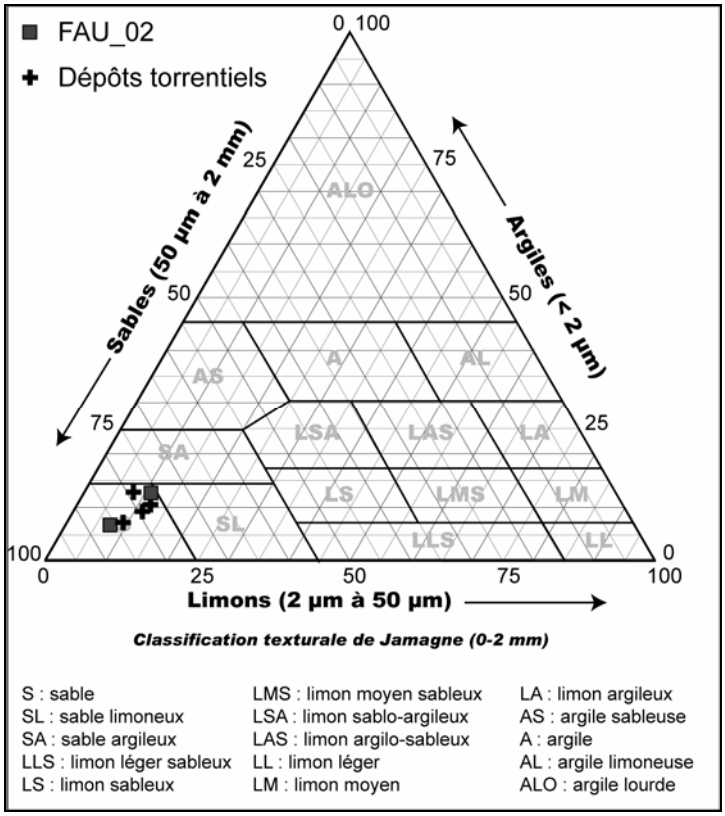


Figure 6.10 *: Comparaisons entre la granulométrie de la crue torrentielle de 2002, et de dépôts torrentiels de fond de lit.*

Ces observations suggèrent **un mode de déclenchement 'hydrologique'**, sans apport de matériaux par glissements de terrain ou instabilités de berges. L'emprise spatiale de la zone de déclenchement de cet événement est donc très délicate à évaluer. Il est probable que seul le lit torrentiel ait fonctionné durant cet événement, car c'est uniquement dans le lit que les traces ont été observées (§ 4.2.2.).

Les analyses granulométriques confirment cette hypothèse (Fig. 6.10) : la granulométrie du dépôt situé le plus en amont (seuil 47) montre une grande similitude avec la granulométrie du lit torrentiel dans ce secteur. Selon la nomenclature, le dépôt FAU02_3 correspond à un dépôt de crue torrentielle, caractérisé par une texture limono-sableuse.

Les observations recueillies sur l'événement du 4 juin 2002 ne permettent pas de cerner réellement les conditions de déclenchement. Ces traces sont très peu perceptibles et il reste difficile de délimiter avec précision une réelle zone de déclenchement.

c) La lave torrentielle du 5 août 2003

A l'amont du bassin versant, en rive gauche du *Faucon*, la zone de déclenchement est scindée en trois zones distinctes aux fonctionnements différenciés, situées à une altitude maximale de l'ordre de 2300 m (Fig. 6.11) :

- dans un **talweg du tablier d'éboulis**, en contrebas de la crête des *Trois Hommes*, la morphologie est caractéristique du passage d'une lave torrentielle : levées et chenal d'incision. Comme les '*debris flows*' observés dans le *Bachelard* par Blijenberg (1998) ou observés au dessus du glissement-coulée de *Super-Sauze* par Weber (2001). Les analyses sédimentologiques montrent que les matériaux correspondent à une lave torrentielle à matrice granulaire ;
- dans la **zone du torrent de *Champerousse*,** la morphologie associe des levées latérales à une incision relativement modérée (inférieure à 1 m). Les matériaux correspondent à des dépôts de lave torrentielle granulaire.
- dans la **zone amont du torrent de *Faucon*,** entre les seuils SN14 (bief 77) et SN21 (bief 85), les observations et analyses sédimentologiques suggèrent du passage d'un écoulement torrentiel hyperconcentré avec un affouillement du lit compris entre 0.50 et 1 m environ..

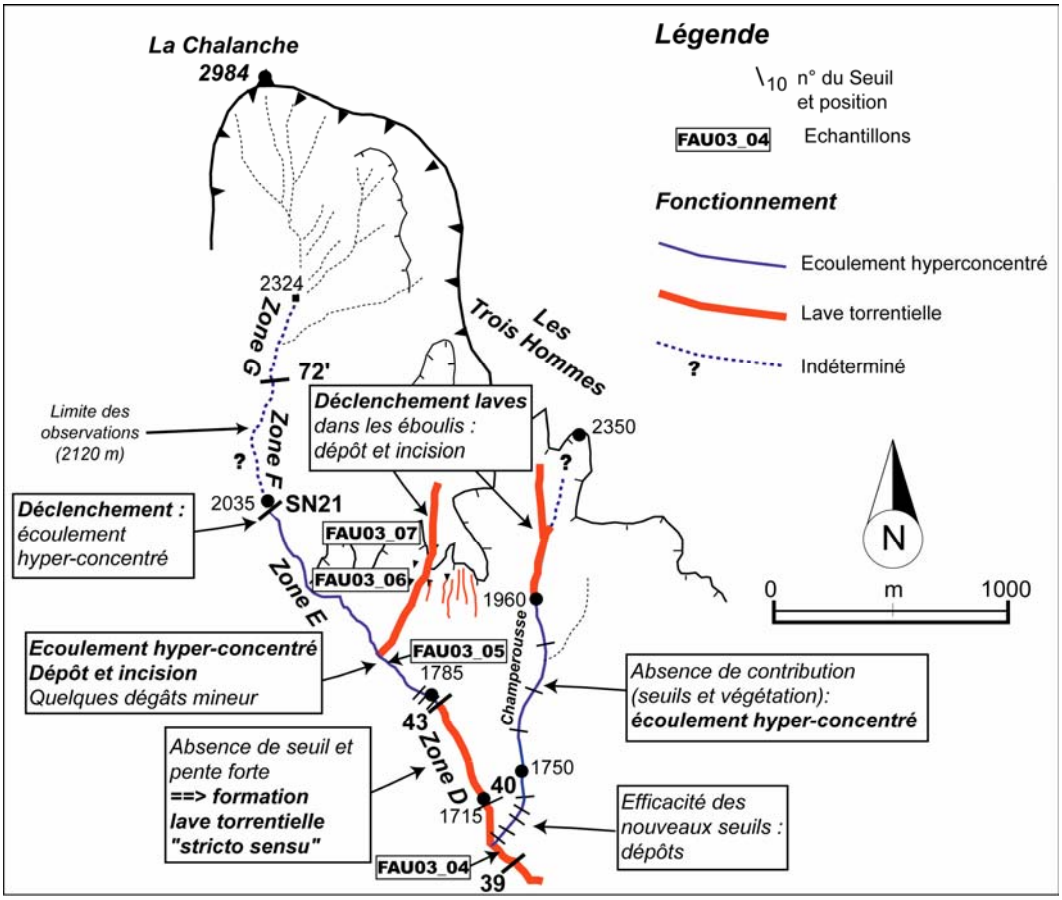


Figure 6.11 *: Schéma fonctionnel de la zone de déclenchement de la lave torrentielle du 5 août 2003 sur le torrent de Faucon.*

Ainsi, ce n'est qu'à 1785 m d'altitude environ que la lave torrentielle *stricto sensu* se serait formée, associant des matériaux des trois zones décrites précédemment. C'est sur ce secteur que l'orage s'est particulièrement concentré (§ 3.2.3.2.). L'unique seuil 53 situé dans cette zone de déclenchement était déjà détruit avant cet événement.

Les volumes associés à chacune de ces trois zones de déclenchement ont été estimés à partir du profil en long et la géométrie du chenal. Ces volumes totaux sont évalués entre 10 000 et 15 000 m^3 et se répartissent :

- entre 1 000 et 2 000 m^3 pour la partie haute du chenal de *Faucon*,
- entre 5 000 et 7 500 m^3 pour le bassin de réception et le chenal du torrent de *Champerousse*.
- entre 2 500 et 5 000 m^3 pour le talweg des *Trois Hommes*.

6.1.2.2. Les conditions de dépôts : volumes globaux écoulés, débordements associés et étalement

- Les volumes globaux des événements étudiés ont été estimés à partir des méthodes proposées par Remaître *et al.* (2002, Fig. 6.12).

Plusieurs méthodes empiriques (Remaître *et al.*, 2002) permettent de calculer le volume total d'un écoulement torrentiel :

(1) **une méthode hydraulique** (volume des sédiments et de l'eau) ;
(2) **une méthode hydrologique** (volume de l'eau uniquement) ;
(3) **une méthode géomorphologique** (volume des sédiments uniquement).

(1) **La méthode hydraulique** prend en compte la durée totale de la lave et le débit maximal de crue. Ce débit maximal peut être défini sur plusieurs tronçons du cône de déjection en multipliant la surface de la section mouillée par la vitesse de propagation. Les sections mouillées doivent être mesurées au droit des sites de surélévation mais également une trentaine de mètres à l'amont et à l'aval, en raison de ces deux types d'erreur (Jakob et al., 2000) :

- les phénomènes d'érosion et de reprise survenus après l'événement peuvent modifier considérablement la morphologie des sections mouillées ;

- les hauteurs maximales de la lave peuvent être surestimées car les traces de boue peuvent correspondre à des projections et non à la hauteur réelle de la lave.

Le volume total est calculé en supposant une forme d'hydrogramme (triangulaire, etc.). Le volume de sédiments peut être calculé à l'aide de la concentration volumique solide. Si celle-ci ne peut pas être mesurée directement sur le terrain, on peut utiliser une fourchette de valeurs parmi celles communément admises dans la littérature (§ 1.1.).

(2) **La méthode hydrologique** consiste à évaluer la quantité d'eau précipitée pendant l'épisode orageux, puis à extrapoler le volume total de l'événement en utilisant la concentration volumique solide.

(3) **La méthode géomorphologique** peut s'appliquer de deux manières :

- soit en estimant les volumes de sédiments érodés puis incorporés par la lave (volumes libérés par la zone de déclenchement et volumes des matériaux érodés pendant la propagation) ;

- soit en estimant le volume des dépôts dans le chenal et sur le cône de déjection.

Figure 6.12 *: Méthodes empiriques d'estimation du volume total d'une lave torrentielle.*

Il peut paraître étrange d'étudier les conditions de dépôts avant les conditions de propagation. Mais dans notre réflexion, qui cherche entre autres à étudier les phénomènes de contribution/dépôt pendant la propagation, il paraissait plus approprié de faire :

- un bilan général entre les volumes libérés par la zone de déclenchement et les volumes déposés (aux abords du chenal et sur le cône de déjection) et écoulés ;
- une étude fine des variations de volume pendant la propagation en essayant de quantifier les volumes érodés et déposés pour chacun des biefs concernés.

Le deuxième point ne sera discuté que pour l'événement torrentiel du 5 août 2003, car c'est le seul événement où les informations sont suffisantes pour faire un bilan sédimentologique précis. Ainsi, dans cette sous-section, des hypothèses étayées par les observations de terrain et les analyses en laboratoire sont exposées. Elles concernent :

- la distribution spatiale des volumes de laves torrentielles (cheminement et débordement) ;
- le volume et les hauteurs des débordements sur le cône associés aux trois événements.

a) La lave torrentielle du 19 août 1996

Rappelons que l'essentiel des matériaux de la lave torrentielle a rejoint *l'Ubaye*. Les dépôts sont restés confinés dans le chenal torrentiel. Seuls quelques débordements de quelques dizaines de m^3 environ ont été observés dans la partie médiane du cône de déjection (deux jardins du lotissement du *Bérard*, sans provoquer toutefois de dégâts significatifs).

Les résultats donnés dans le tableau 6.4. ont été obtenus :

- Pour la **méthode hydraulique** en adoptant : (1) une durée totale de la lave de 2.5 h environ (selon les témoignages des riverains) ; (2) un débit maximal de l'ordre de 100 $m^3.s^{-1}$ (variant entre 96 et 106 $m^3.s^{-1}$ pour deux sites sur le cône de déjection) et ; (3) en supposant un hydrogramme de forme triangulaire.
- Pour la **méthode hydrologique** en considérant : (1) une intensité de l'orage de 80 $mm.h^{-1}$ pendant une demi-heure ; (2) un coefficient de ruissellement de l'ordre de 0.50 et ; (3) une surface de 200 ha (superficie estimée de la zone arrosée).
- Pour la **méthode géomorphologique** en considérant le volume des dépôts dans le chenal et sur le cône de déjection en l'absence d'informations fiables sur l'état du bassin et du chenal torrentiel avant 1996.

Tableau 6.4 *: Comparaison entre trois méthodes d'estimation du volume de la lave torrentielle du 19 août 1996 (in Remaître et al., 2002).*

Méthode utilisée	Volume des sédiments (m^3)	Volume de l'eau (m^3)	Concentration volumique solide	Volumes globaux (m^3)
Hydraulique	200 000	250 000	0.45	450 000
	275 000	175 000	0.60	
	360 000	90 000	0.80	
Hydrologique	33 000	40 000	0.45	73 000
	60 000		0.60	**100 000**
	140 000		0.80	200 000
Géomorphologique	60 000	73 000	0.45	133 000
		40 000	0.60	**100 000**
		15 000	0.80	75 000

Avec la méthode géomorphologique, les 60 000 m3 se répartissent en (1) 10 000 m^3 environ pour les bourrelets latéraux et les zones de remplissage du chenal et (2) 50 000 m^3 environ pour le cône de la lave (Remaître *et al.*, 2002). Ce chiffre est à prendre avec précaution car le calcul ne prend pas en compte les sédiments qui ont été emportés par l'Ubaye pendant et après l'événement (nos investigations n'ayant débutées qu'en septembre 1998).

Pour une concentration volumique solide de 0.6, avec les méthodes hydrologiques et géomorphologiques, le volume total de la lave torrentielle serait proche des **100 000 m^3** , ce qui semble tout à fait vraisemblable au regard des volumes théorique moyen (85 000 m^3) et maximal (120 000 m^3). A contrario, les 450 000 m^3 déterminés par la méthode hydraulique

sont surestimés, car le débit utilisé pour ce calcul est un débit de pic non représentatif de toute la durée de l'événement.

b) La crue torrentielle du 4 juin 2002

Le volume de cette crue torrentielle est difficile voire impossible à estimer (les méthodes appliquées aux laves torrentielles ne peuvent être utilisées). **Le volume d'eau estimé par la méthode hydrologique est de l'ordre de 20 000 m^3.** Il est difficile d'accorder un crédit quelconque à ce volume, en l'absence d'autres valeurs obtenues par d'autres méthodes.

Seuls quelques dépôts ont été identifiés dans le chenal torrentiel (§ 4.3.2.). D'un point de vue granulométrique, ces dépôts correspondent bien à des dépôts de crue torrentielle (Fig. 6.10). D'un point de vue dynamique, la crue torrentielle a raboté certains biefs, mais cette érosion est restée relativement limitée, la tranche érodée étant de quelques centimètres au maximum. Les biefs situés de part et d'autre de l'apex ont été partiellement remplis par les dépôts de cette crue.

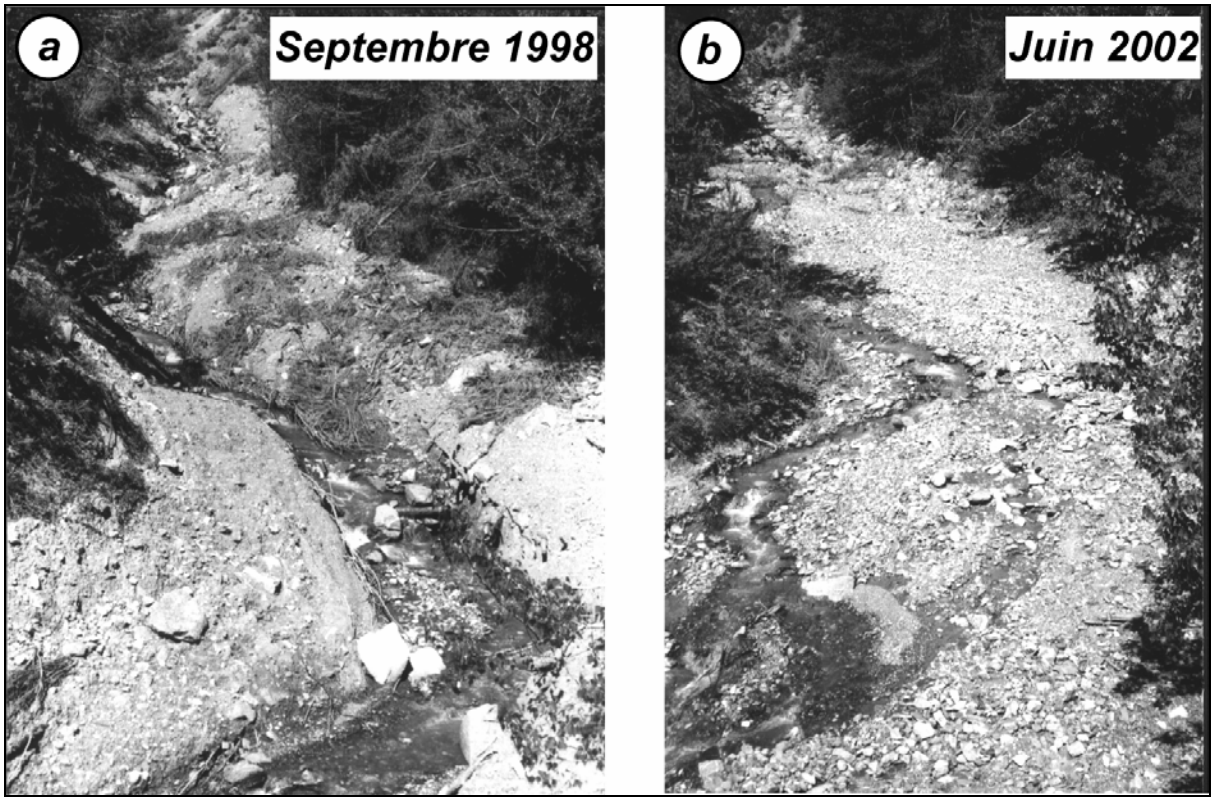


Figure 6.13 *: Vue sur le bief 1 depuis le pont de l'apex (1287 m) en 1998 (a) et en 2002 (b).*

Sur la figure 6.13, la différence de morphologie est flagrante entre la première (4 septembre 1998) et la deuxième prise de vue (8 juin 2002) : le bief a été en partie rempli par les dépôts de la crue sur une hauteur de près de 2 m. Aucune trace de débordement n'a été identifiée, l'ensemble des matériaux est resté dans le chenal torrentiel et/ou a rejoint l'*Ubaye*.

c) La lave torrentielle du 5 août 2003

Les volumes globaux estimés par les trois méthodes (Tab. 6.5) sont compris dans une fourchette assez large comprise entre 54 500 m^3 et 150 000 m^3. Les valeurs de concentration volumique mesurées sur des échantillons prélevés le jour même par des agents du service RTM et par nous même, quelques jours après la lave, indiquent que cette concentration était comprise entre 0.58 et 0.66.

Tableau 6.5 *: Comparaison entre trois méthodes d'estimation du volume de la lave torrentielle du 5 août 2003.*

Méthode utilisée	Volume des sédiments (m^3)	Volume de l'eau (m^3)	Concentration volumique solide	Volumes globaux (m^3)
Hydraulique	27 000	33 000	0.45	**60 000**
	36 000	24 000	0.60	
	48 000	12 000	0.80	
Hydrologique	24 500	30 000	0.45	54 500
	45 000		0.60	75 000
	120 000		0.80	150 000
Géomorphologique	55 000	67 000	0.45	122 000
		36 500	0.60	**91 500**
		13 750	0.80	68 750

Ainsi, le volume global de la lave doit être assez proche des valeurs de volumes calculés par les différentes méthodes : à savoir 60 000 m^3 et 91 500 m^3 pour des concentrations volumiques de 0.60. Ces valeurs sont en conformes à celles fournies par Koulinski (2004).

Contrairement aux deux précédents événements torrentiels, la lave de 2003 a très largement débordé pour les raisons suivantes :

- les biefs ont été comblés en grande partie par les matériaux de la crue torrentielle du 4 juin 2002 avec un remplissage des plages de dépôts et un exhaussement du lit de 0.5 à 2 m provoquant une diminution : (1) de l'efficacité des seuils par réduction de leur hauteur de chute, (2) de la capacité de stockage (Fig. 6.14) ;

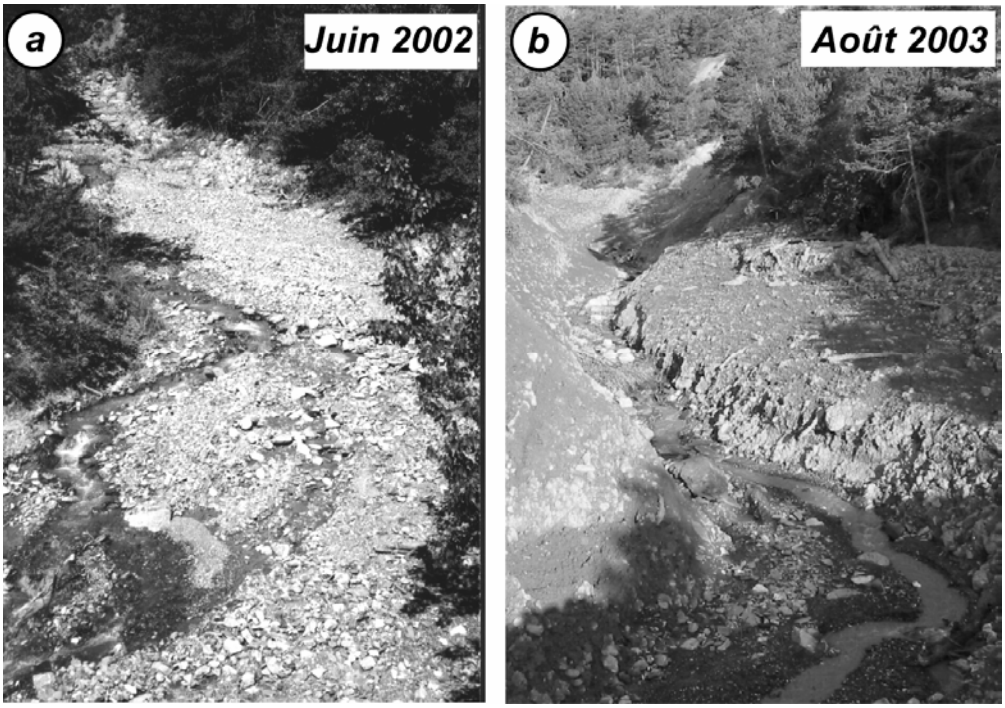


Figure 6.14 *: Vue sur le bief 1 depuis le pont de l'apex (1287 m) en 2002 (a) et en 2003 (b).*

- sur le cône de déjection, le rétrécissement de la section mouillée, à l'amont immédiat du pont V.C.3., a provoqué un encombrement partiel du chenal (Fig. 6.15) Les matériaux se sont accumulés derrière les culées du pont et la dernière bouffée a fait céder le pont en provoquant un important débordement en rive gauche ;

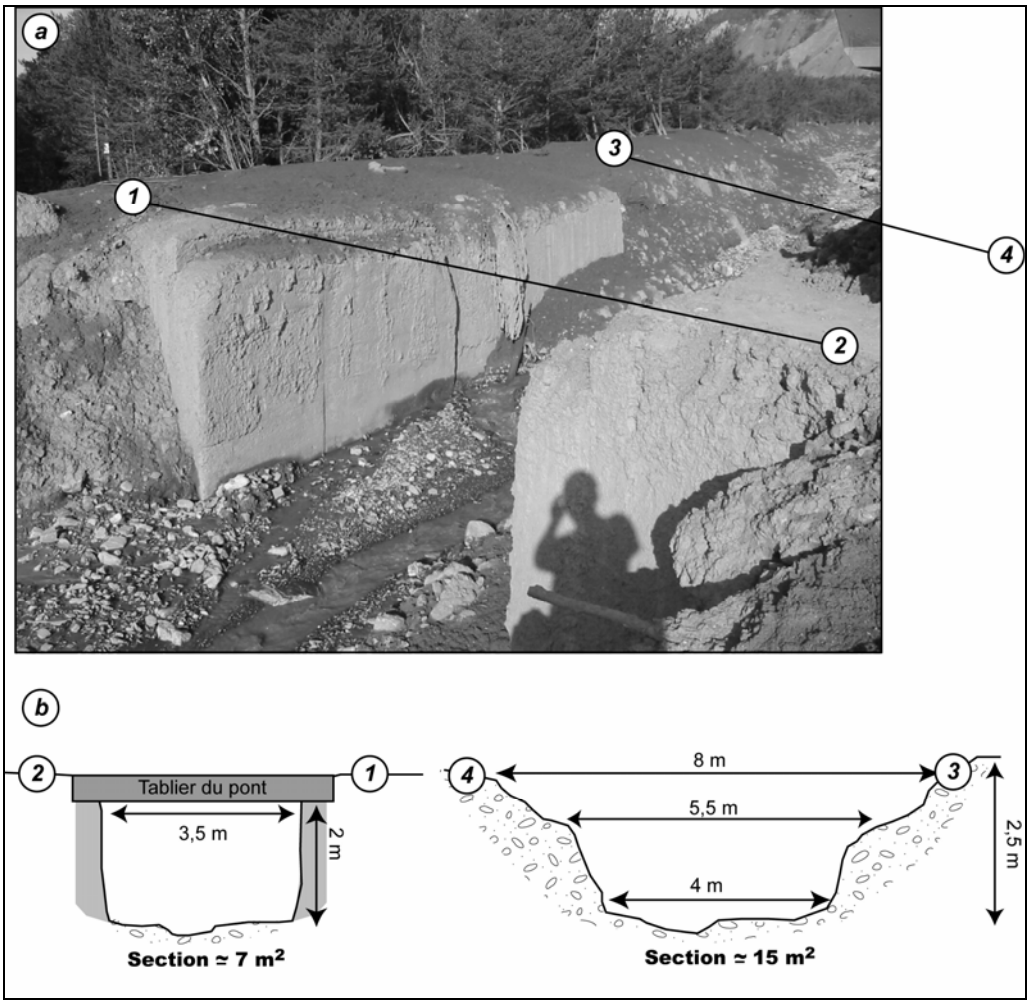


Figure 6.15 *: Vue (a) et coupes transversales (b) du pont V.C.3. sur le cône de déjection du torrent de Faucon.*

Contrairement à la lave de 1996, la lave de 2003 a largement débordé en plusieurs points, alors que les volumes de ces deux laves étaient approximativement les mêmes. La crue torrentielle de 2002 a ainsi joué un rôle essentiel en comblant une partie du chenal.

6.1.2.3. Les conditions de propagation

Dans cette sous-section, des hypothèses étayées par les observations de terrain et les analyses en laboratoire sont exposées. Elles concernent :

- les caractéristiques hydrauliques des trois événements (vitesse de propagation, débits, etc.) ;
- les variations volumétriques et des caractéristiques physiques de la lave au cours de sa propagation. Identification des zones où l 'érosion a prédominé et des zones où le dépôt a prédominé.

L'étude des conditions de propagation des événements torrentiels du 19 août 1996, du 4 juin 2002 et du 5 août 2003 s'appuie sur l'analyse conjointe des dépôts et de la morphologie torrentielle. Les traces de débordement sur les berges torrentielles permettent d'estimer la hauteur maximale de l'écoulement dans le chenal. Pour les événements de 1996 et de 2003, sur l'ensemble du chenal, la hauteur maximale d'écoulement varie entre 1.5 et 6 m, le maximum est atteint au droit du pont du *Châtelaret*.

Les vitesses de propagation sont très différentes entre les trois événements (Tab. 6.6) ; elles évoluent du simple au double. Les deux laves torrentielles ont logiquement des vitesses plus faibles que la crue torrentielle. La lave de 2003 s'est propagée plus rapidement que celle de 1996. Cette différence de vitesse ne s'explique pas par la granulométrie. En effet, la proportion de matériaux fins est plus grande pour la lave torrentielle de 2003 que pour celle de 1996. L'augmentation de matériaux fins dans le mélange devrait normalement provoquer une augmentation de la viscosité et donc une diminution de la vitesse. Ceci est vrai en considérant que les deux laves avaient la même concentration volumique solide, or ce n'était certainement pas le cas. L'hypothèse d'une lave plus fluide en 2003 et plus visqueuse en 1996 peut être formulée : les lobes de laves observés sur le cône de déjection étaient moins épais et plus arrondis en 1996 qu'en 2003. Il n'est pas possible de valider définitivement cette hypothèse en l'absence de mesure de concentration volumique solide en 1996.

Tableau 6.6 *: Estimation des vitesses d'écoulement pour les événements torrentiels survenus sur le torrent de Faucon en 1996, 2002 et 2003.*

	Section mouillée (m^2)	Périmètre mouillé (m)	Rayon hydraulique (m)	Pente du chenal (°)	Pente du chenal (m/m)	Rayon de courbure (m)	Angle du dépôt par rapport à l'horizontale (°)	Vitesse Manning 'Strickler' ($m.s^{-1}$)	Vitesse 'surélévation' 'Johnson' ($m.s^{-1}$)
FAU96_2	22.3	17.9	1.23	11	0.24	6.8	21	X	**5**
FAU96_1	20.9	18.6	1.13	13	0.29	7.5	19	X	**4.9**
FAU02_2	17.6	13.3	1.32	15	0.31	X	X	**10.8**	X
FAU02_1	15.4	12.2	1.26	9	0.20	X	X	**10.2**	X
FAU03_2	24.6	21.7	1.13	16	0.33	28.6	9	X	**8.9**
FAU03_1	22.1	19.8	1.11	12	0.27	24.7	7	X	**7.1**

L'évolution des caractéristiques des matériaux est particulièrement sensible pour les deux laves torrentielles de 1996 (Fig. 6.16a, c et e) et 2003 (Fig. 6.16b, d et f). En comparant cette évolution aux observations géomorphologiques, il est possible de définir l'emprise spatiale des zones d'érosion et de dépôt le long du parcours de la lave torrentielle des deux laves à l'exception de la crue de 2002 pour laquelle nous ne disposons pas d'informations suffisantes.

a) La lave torrentielle du 19 août 1996

L'évolution des matériaux est particulièrement marquée entre les dépôts FS96_5 et FS96_4 avec une forte augmentation des matériaux fins et à contrario une forte diminution des matériaux grossiers. Cette zone située entre les deux dépôts correspond aux premiers affleurements de marnes noires : de nombreuses instabilités (glissements superficiels des berges et des versants contigus) affectent ce secteur compris entre SN8 (bief 55) et le seuil 47 (bief 71). Ce secteur est caractérisé par un lit en forte pente (> 15°) favorisant l'érosion au dépend du dépôt. Les cinq seuils de ce secteur étaient détruits : les seuils 43 et 45 étaient déjà détruits en 1993 (Service RTM de *Barcelonnette*). Par contre, pour les trois autres, il n'est pas possible d'affirmer que la lave de 1996 était responsable de leur destruction.

Il est probable que la lave a érodé ce secteur en incorporant des sédiments fins provenant du lit et des berges torrentielles et des versants marneux. Les analyses pétrographiques des dépôts confirment l'enrichissement progressif de la lave en marnes noires. A partir du bief 55, les caractéristiques sédimentologiques n'évoluent plus significativement, la part de matériaux fins augmente légèrement. Les deux grandes zones de dépôts identifiées correspondent toutes les deux à des secteurs caractérisés par une pente du lit faible à modérée et un lit torrentiel large (§ 4.6.1.), même si tous les secteurs de ce type n'ont pas connu le même fonctionnement.

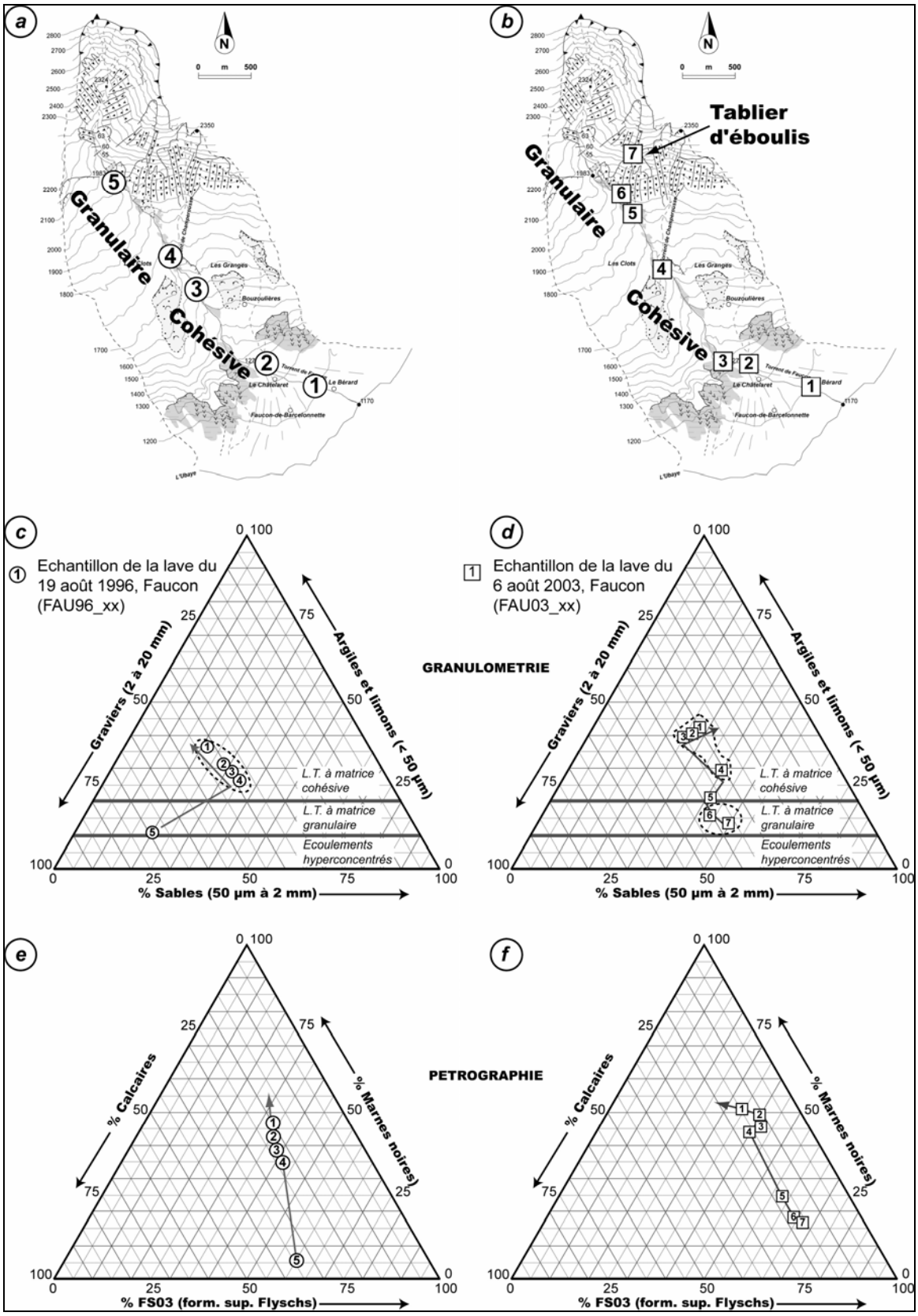


Figure 6.16 *: Evolution granulométrique et pétrographique des dépôts de laves torrentielles sur le torrent de Faucon ; (a) carte de localisation des dépôts FAU96, (b) carte de localisation des dépôts FAU03, (c) texture des dépôts FAU96, (d) texture des dépôts FAU03, (e) pétrographie des dépôts FAU96 et (f) pétrographie des dépôts FAU03.*

L'absence d'un état initial avant la lave torrentielle de 1996 ne nous a pas permis de faire un bilan sédimentaire précis de cet événement. Néanmoins, la contribution de la lave torrentielle de 1996 a du être particulièrement importante en considérant la différence importante entre l'estimation du volume de départ maximal de 20 000 m^3 et l'estimation du volume total de l'événement (100 000 m^3). Cette différence de 80 000 m^3 sur une distance de parcours de 4 500 m environ permet de calculer **un taux de contribution moyen de 18 $m^3.m^{-1}$**.

b) La lave torrentielle du 5 août 2003

Son fonctionnement semble plus complexe (Fig. 6.18). Nous disposions d'un état initial complet du bassin versant et du chenal avant la lave. Ainsi, son bilan a été réalisé bief par bief à partir de la description morphologique du chenal, de l'analyse des matériaux et de la description de l'état des seuils (Fig. 6.19).

La granulométrie et la pétrographie des dépôts de cette lave ont fortement évolué de la zone de déclenchement à la zone de dépôt (comme en 1996). Les dépôts FAU03_7 et FAU03_6, localisés sur le tablier d'éboulis de la zone des *Trois Hommes* correspondent à des dépôts de **lave à matrice granulaire (moins de 15% de fines)** (Fig. 6.19a). A partir de la confluence avec le torrent de *Faucon*, les dépôts indiquent une forte augmentation des matériaux fins : 20% pour FAU03_5, 30% pour FAU03_4 et plus de 40% pour FAU03_3, 2 et 1. Les matrices (<20 mm) présentent une texture d'**argiles sableuses** pour les échantillons FAU03_1, 2, 3, 4, de **sables argileux** pour l'échantillon FAU03_5 et de **sables grossiers** pour les échantillons FAU03_6 et FAU03_7. Ainsi, la lave était granulaire de son déclenchement jusqu'à la confluence avec le torrent de *Faucon*, puis elle est devenue cohésive par un enrichissement progressif en matériaux marneux confirmé par l'analyse pétrographique (Fig. 6.19b). La granulométrie des matériaux prélevés dans le bassin de réception et le chenal du torrent de *Champerousse* (Fig. 6.17) indique que ces dépôts correspondent à des dépôts de **lave torrentielle à matrice granulaire**, avec moins de 20% de fines.

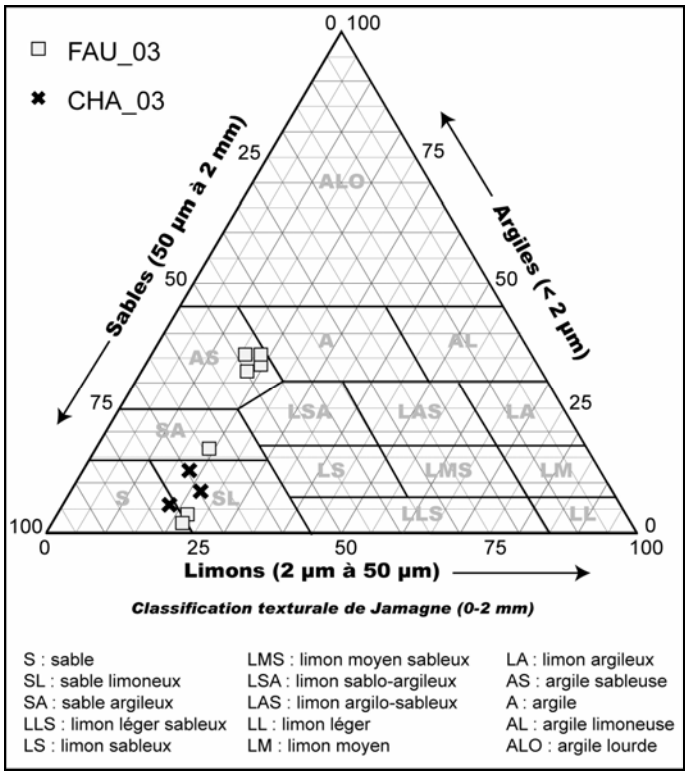


Figure 6.17 *: Texture des dépôts des événements du 5 août 2003 sur les torrents de Champerousse et de Faucon.*

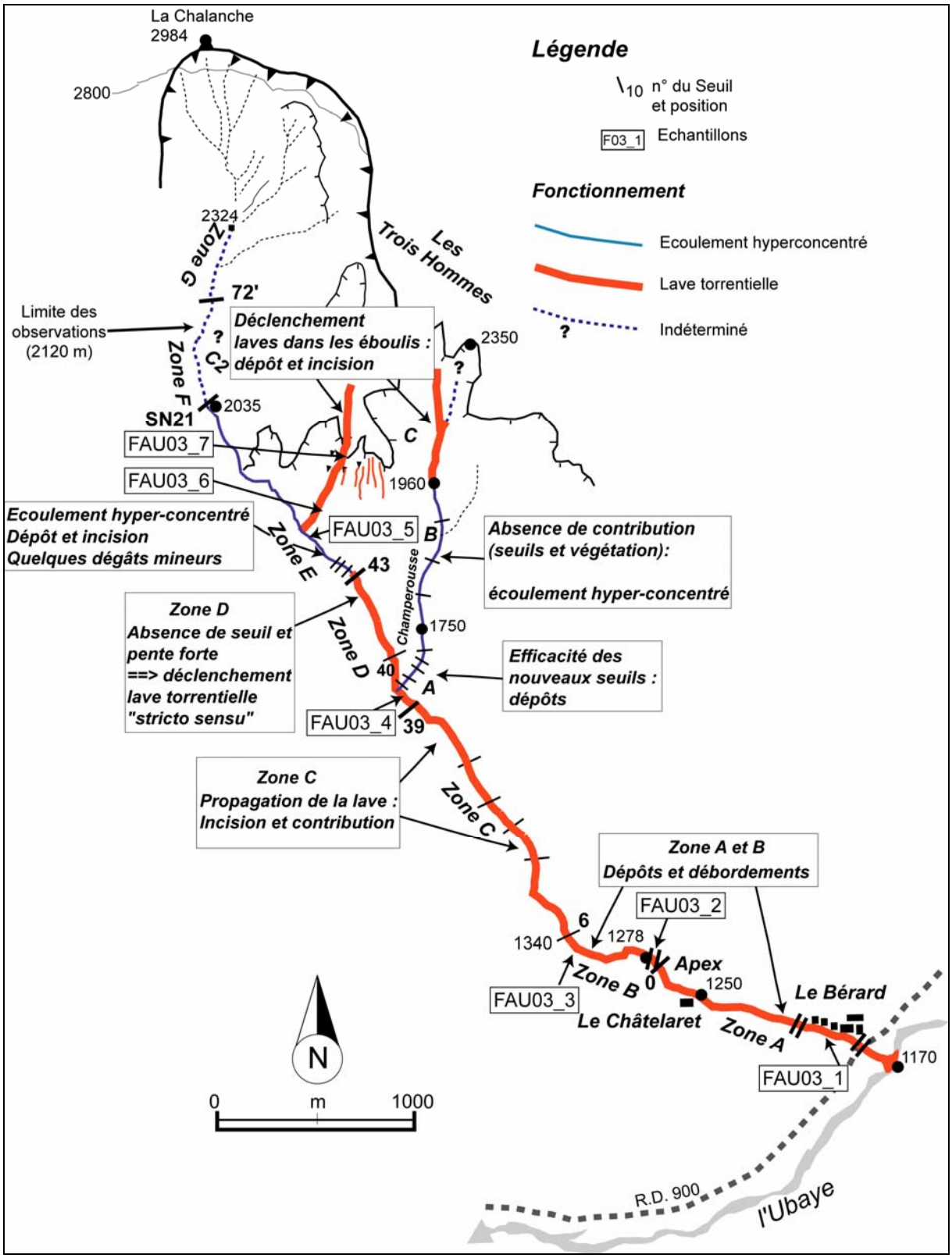


Figure 6.18 *: Carte fonctionnelle des événements torrentiels du 5 août 2003 dans le bassin versant du Faucon.*

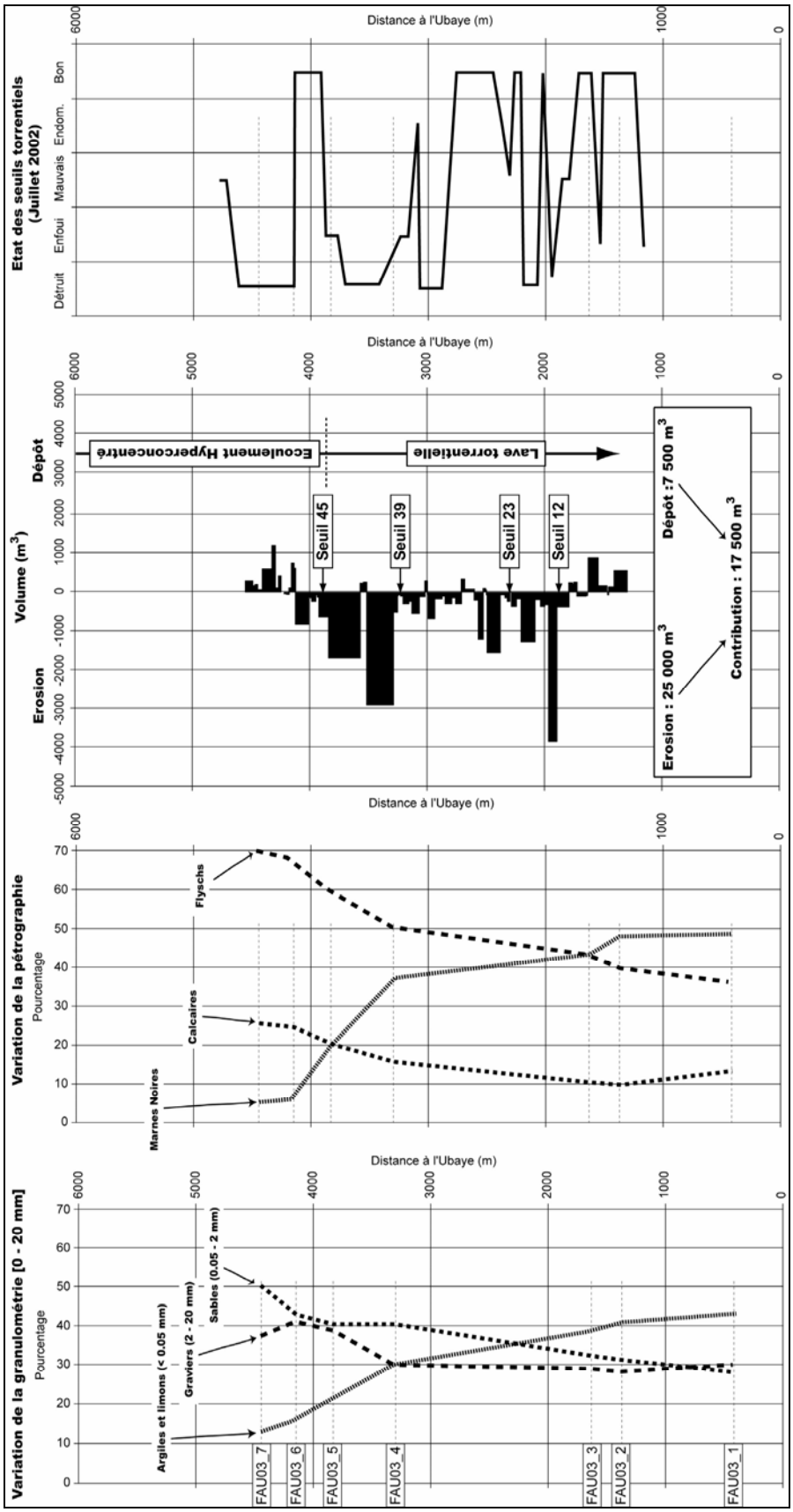


Figure 6.19 *: Comparaison entre (a) l'évolution granulométrique et (b) pétrographique des matériaux, (c) les volumes érodés/déposés et (d) l'état des seuils torrentiels pour la lave de 2003 sur le torrent de Faucon.*

Comme pour la lave de 1996, la contribution globale pendant l'événement est particulièrement importante. Entre les zones de déclenchement (10 000 – 15 000 m^3) et la zone de dépôt (60 000 – 91 000 m^3), la contribution est estimée entre 45 000 et 80 000 m^3 soit un **taux de contribution moyen estimé entre 13 et 25 $m^3.m^{-1}$**. Dans le détail, cette contribution a été variable le long du parcours de cette lave. Un bilan sédimentaire a été effectué sur l'ensemble des biefs. La contribution totale de 17 500 m^3 (soit 30 000 m^3 de lave pour ϕ=0.55), évaluée par calcul sous SIG sur la base de la cartographie fine (Chapitre 4), est légèrement inférieure à la contribution totale estimée en soustrayant le volume de départ au volume d'arrivée. Cette différence peut s'expliquer notamment par les incertitudes liées à l'estimation des volumes ou par une sous-estimation sur le terrain des profondeurs d'incision ou de l'emprise spatiale des zones d'érosion. Néanmoins, ce bilan sédimentaire permet d'identifier les grands secteurs fonctionnels (érosion ou dépôt) et de les hiérarchiser. Sur la figure 6.19c, deux grandes zones de contribution peuvent être identifiées :

- secteur compris entre les seuils 45 (bief 60) et 39 (bief 48) où sur 600 m de longueur environ, près de 10 000 m^3 de matériaux du lit ont été érodés. Les profondeurs d'incision les plus fortes ont été relevées dans ce secteur. La lave a incisé les anciens dépôts de la lave de 1996 (Fig. 6.20) ;
- secteur compris entre les seuils 23 (bief 21) et 12 (bief 11) où 7 500 m^3 de matériaux ont été érodés dans le lit sur un linéaire de 400 m environ.

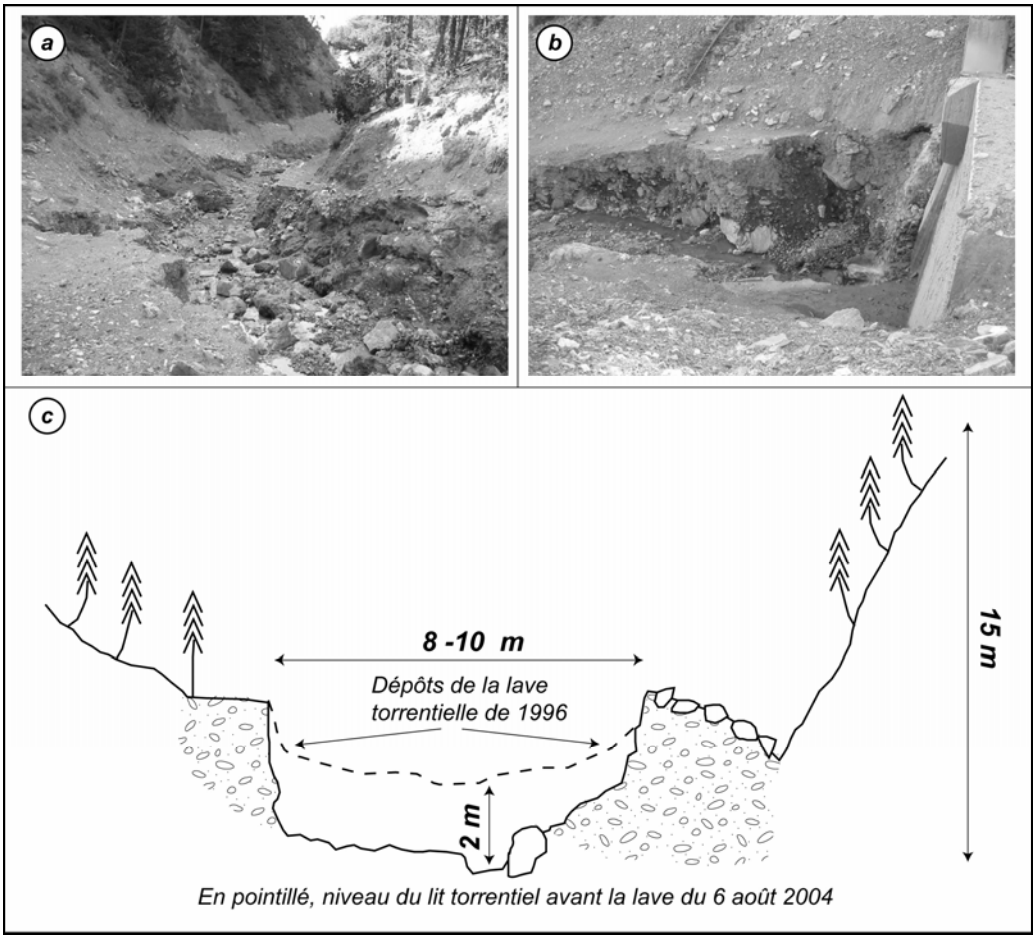


Figure 6.20 *: Morphologie de la zone d'incision principale de la lave torrentielle du 5 août 2003 sur le torrent de Faucon.*

a : Vue vers l'aval du seuil 38 (bief 48) ;
b : Vue sur la chute du seuil 38 ;
c : Coupe transversale du torrent de Faucon à l'aval immédiat de sa confluence avec le torrent de Champerousse.

Ces deux zones sont caractérisées par le mauvais état des seuils torrentiels (détruits ou fortement endommagés) et par la prépondérance des affleurements de marnes noires.

Le rôle des seuils torrentiels, ou l'absence de rôle (quand ils sont détruits ou très fortement endommagés) au cours de cet événement, a donc été particulièrement important. Les seuils localisés sur le torrent de *Champerousse* et en partie haute du torrent de *Faucon* (seuils 85, 86, 87 et 88 construits en 2002) ont semblent-ils joué leur rôle en stockant une quantité importante de matériaux et en empêchant la formation d'une « véritable » lave torrentielle plus haut dans le bassin au dessus de 1800 m d'altitude (à l'amont du seuil 45). Ce n'est qu'après le passage dans les zones moins bien protégées que la lave *stricto sensu* s'est formée par contribution.

6.1.3. Synthèse

L'ensemble des observations et des investigations menées sur le torrent de *Faucon* ont permis de mieux comprendre le type et le fonctionnement des événements torrentiels de 1996, 2002 et 2003 : ceux de 1996 et 2003 correspondent à des laves torrentielles, celui de 2002 à une crue torrentielle. La comparaison entre les laves de 1996 et 2003 est particulièrement instructive. Plusieurs éléments diffèrent à la fois dans le déclenchement, la propagation et le dépôt :

- l'orage de 1996 était localisé sur le bassin de réception (*Tête de la Frustra*, 2984 m), et de moindre extension spatiale que celui d'août 2003 qui a arrosé l'ensemble des versants hauts des *Trois Hommes* et de *Champerousse*. De plus, les conditions de sécheresse et donc de formation de croûtes structurales ont été beaucoup plus accentuées en 2003, favorisant le ruissellement au dépend de l'infiltration ;

- la lave de 1996 s'est formée à près de 2 000 m d'altitude à la suite d'une rupture d'embâcle (au niveau du seuil 54), la lave '*stricto sensu'* de 2003 se 'forme' à 1800 m par contribution des zones fonctionnelles du tablier d'éboulis des *Trois Hommes* et du torrent de *Faucon* ;

- Le torrent de *Champerousse* n'avait pas 'fonctionné' en 1996 contrairement au 5 août 2003. Les seuils ont visiblement « retardé » la formation de la lave torrentielle de 2003 ;

- les différences de comportement sont notables : (1) trois bouffées et une vitesse de l'ordre de 5 $m.s^{-1}$ en 1996 et, (2) une dizaine de bouffées et des vitesses proches de 10 $m.s^{-1}$ en 2003 ;

- Contrairement à la lave de 1996, la lave de 2003 a largement débordé en plusieurs points, alors que les volumes de ces deux laves étaient approximativement les mêmes. La crue torrentielle de 2002 a ainsi joué un rôle essentiel en comblant une partie du chenal sur une épaisseur de l'ordre de 2 m, chenal qui était d'ailleurs rétréci à l'amont immédiat du pont V.C.3 ;

- l'érosion par la lave a été particulièrement intense le 5 août 2003. Ceci est mis en évidence par les granulométries et les calculs de volume. Cette augmentation des volumes serait due : (1) à un plus grand volume d'eau précipité et à un débit liquide plus important, (2) à la survenance de la crue de 2002 qui a fourni des matériaux mobilisables supplémentaires, (3) au fonctionnement du tablier des *Trois Hommes* ;

- en 2003, les deux secteurs où l'érosion a été la plus forte avaient des seuils en très mauvais état ou déjà détruits. A l'inverse, les secteurs où les seuils étaient en bon état, ont été, plus ou moins, caractérisés par du dépôt ou par une faible érosion ;

- **Les deux laves de 1996 et 2003 sont caractérisées par une contribution particulièrement forte** : certains biefs ont été fortement érodés, augmentant sensiblement le volume de l'écoulement pendant la propagation, d'autres ont été remplis plus ou moins complètement par les dépôts de lave.

Cette synthèse montre bien les liens étroits qui peuvent exister entre des événements torrentiels successifs : les conséquences de l'un peuvent être les causes de l'autre. Afin de mieux d'identifier les facteurs contrôlant la dynamique torrentielle du torrent de *Faucon* compte tenu de la complexité marquée de la morphologie torrentielle, une approche quantitative complémentaire doit être mise en oeuvre.

6.2. Identification des facteurs contrôlant la dynamique torrentielle du torrent de Faucon

L'existence de zones fonctionnelles aux comportements différents en fonction des événements conduit à développer une méthodologie pour :

- élaborer une typologie hydrogéomorphologique fonctionnelle du chenal torrentiel en hiérarchisant les grands types de biefs selon des facteurs morphologiques ;
- identifier les facteurs morphologiques les plus influents.

La plupart des études menées sur la dynamique torrentielle s'appuie sur un maillage régulier (type raster) du bassin versant couplé à diverses matrices d'information et cartes informatisées (Thouret *et al.*, 1995 ; Li *et al.*, 2003). Le chenal torrentiel et ses environs immédiats sont découpés en cellules de même taille, chaque cellule contenant des informations caractéristiques (pente, lithologie, sols et formations superficielles, etc.). Ce découpage a comme principal inconvénient de ne pas tenir compte des spécificités du terrain. C'est pour cette raison que notre choix s'est porté sur un découpage en unités hydro-géomorphologiques homogènes (polygone type vecteur) pour chacun des 111 biefs définis (§ 4.1.1.1). Une étude statistique a été menée sur ces biefs.

6.2.1. Choix des méthodes et des variables

L'objectif des techniques d'analyse statistique est « de rendre intelligible un ensemble d'observations dont la structure profonde n'est pas immédiatement décelable » (Chadule, 1994). L'analyse des données regroupe schématiquement deux grandes familles de méthodes (Bertier et Bouroche, 1975 ; Chadule, 1994 ; Volle, 1997 ; Fig. 6.21) :

- **les analyses factorielles**, qui cherchent à réduire le nombre de variables en les synthétisant sous la forme de facteurs ou de composantes hiérarchisés. Nous avons utilisé l'Analyse en Composante Principale (ACP) ;
- **les classifications automatiques**, qui visent à regrouper les individus dont les caractères sont les plus ressemblants. Nous avons retenu la méthode de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH).

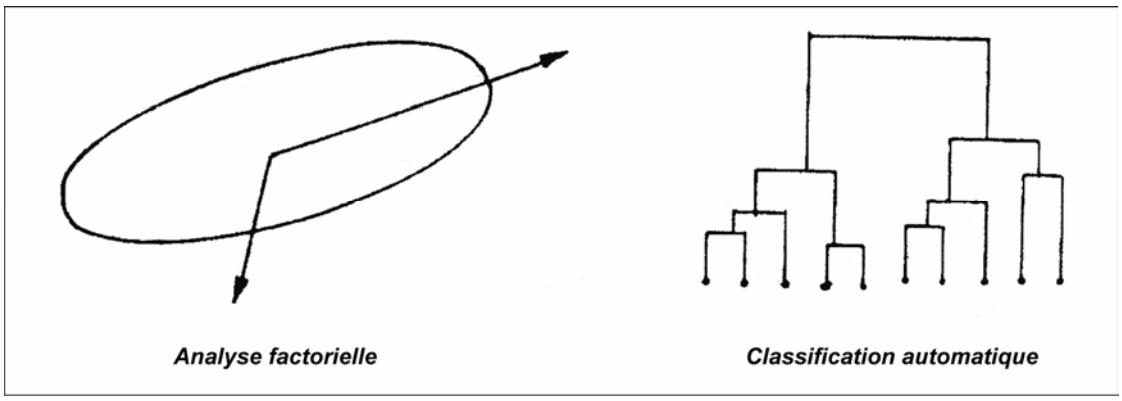


Figure 6.21 *: Les deux grandes familles de techniques statistiques d'analyse de données.*

Les traitements statistiques reposent sur les données collectées sur les 111 biefs. Les variables utilisées correspondent à des descripteurs classiques en dynamique torrentielle (Thouret *et al.*, 1995 ; Veyrat-Charvillon, 2005) et en dynamique fluviale (Schmitt, 2001). Parmi 25 variables quantitatives (Annexe 5 et 6), treize variables ont été sélectionnées pour le traitement statistique. Les douze autres ne présentaient que peu d'intérêt, parce qu'elles étaient nettement redondantes avec d'autres facteurs, ou qu'elles étaient quasi-invariantes pour les 111 biefs. Les treize variables utilisées sont :

- (1) la pente du chenal torrentiel (°) ;
- (2, 3) la pente des versants adjacents (°) ;
- (4, 5) la largeur du lit mineur et du lit majeur (m) ;
- (6, 7) les coefficients d'incision et de dissymétrie ;
- (8) la hauteur des berges (m) ;
- (9) la section mouillée (m²) ;
- (10) la hauteur du seuil aval (m) ;
- (11) la couverture végétale (%) ;
- (12, 13) la stabilité (facteur de sécurité F) des versants adjacents.

Aucune information relative au volume de matériaux n'a été insérée dans la base de donnée, car ce volume de matériaux (positif pour un dépôt ou négatif pour une érosion) est comparé aux résultats des tests statistiques en fin d'analyse. Le choix du facteur de sécurité F a été guidé par un souci de simplification car il permet de directement 'synthétiser' plusieurs informations (Chapitres 7 et 8). Enfin, la hauteur du seuil torrentiel (anthropique ou naturel) aval a été incorporée dans la base de donnée car ce seuil va jouer un rôle décisif dans la dynamique torrentielle du secteur concerné (Meunier, 1991 ; Deymier *et al.*, 1994). En définitive, le tableau de données contient 111 lignes et 13 colonnes.

6.2.2. Analyse en Composantes Principales (ACP)

Le but de cette ACP est double. Il est d'une part de synthétiser l'information contenue dans les variables descriptives des biefs en dégageant les principales composantes de la matrice de données, et d'autre part de classer les 111 biefs torrentiels du torrent de Faucon en fonction de ces composantes. Les principes et les fondements théoriques de l'ACP peuvent être trouvés en annexe (Annexe 12).

Tableau 6.7 *: Synthèse des 13 variables prises en compte et modes d'estimation correspondants.*

N°	Variable	Code	Méthode d'estimation
1	Pente du lit (°)	PL	Terrain (nivellement, topofil, tachéométrie, GPS) ; Carte
2	Pente en rive droite (°)	P_{RD}	Terrain (nivellement, topofil, tachéométrie, GPS) ; Carte
3	Pente en rive gauche (°)	P_{RG}	Terrain (nivellement, topofil, tachéométrie, GPS) ; Carte
4	Largeur du lit mineur (m)	L_{MIN}	Terrain (topofil, mètre-ruban)
5	Largeur du lit majeur (m)	L_{MAJ}	Terrain (topofil, mètre-ruban)
6	Coefficient d'incision	INCI	Terrain (profils en travers) ; Arc View (profils en travers)
7	Coefficient de dissymétrie	DISS	Terrain (profils en travers) ; Arc View (profils en travers)
8	Hauteur des berges (m)	H_{BER}	Terrain (topofil, mètre-ruban)
9	Section mouillée (m²)	SM	Terrain (topofil, mètre-ruban)
10	Hauteur du seuil (m)	H_S	Terrain (topofil, mètre-ruban)
11	Couverture végétale (%)	%Ve	Arc View (Carte d'occupation du sol)
12	Facteur de sécurité F en rive droite	F_{RD}	Arc View (profils en travers) ; laboratoire (caractéristiques physiques des matériaux)
13	Facteur de sécurité F en rive gauche	F_{RG}	Arc View (profils en travers) ; laboratoire (caractéristiques physiques des matériaux)

Pour ce travail, nous avons utilisé le logiciel SPSS pour la mise en œuvre de l'ACP et de la CAH. Comme cela est fait dans la plupart des cas, les variables sont centrées et réduites afin de leur attribuer, à priori, le même poids. La rotation est de type Varimax, ce qui permet de simplifier l'interprétation des résultats en maximisant la part d'information traduite par les différentes composantes. Les variables sont présentées dans le tableau 6.7.

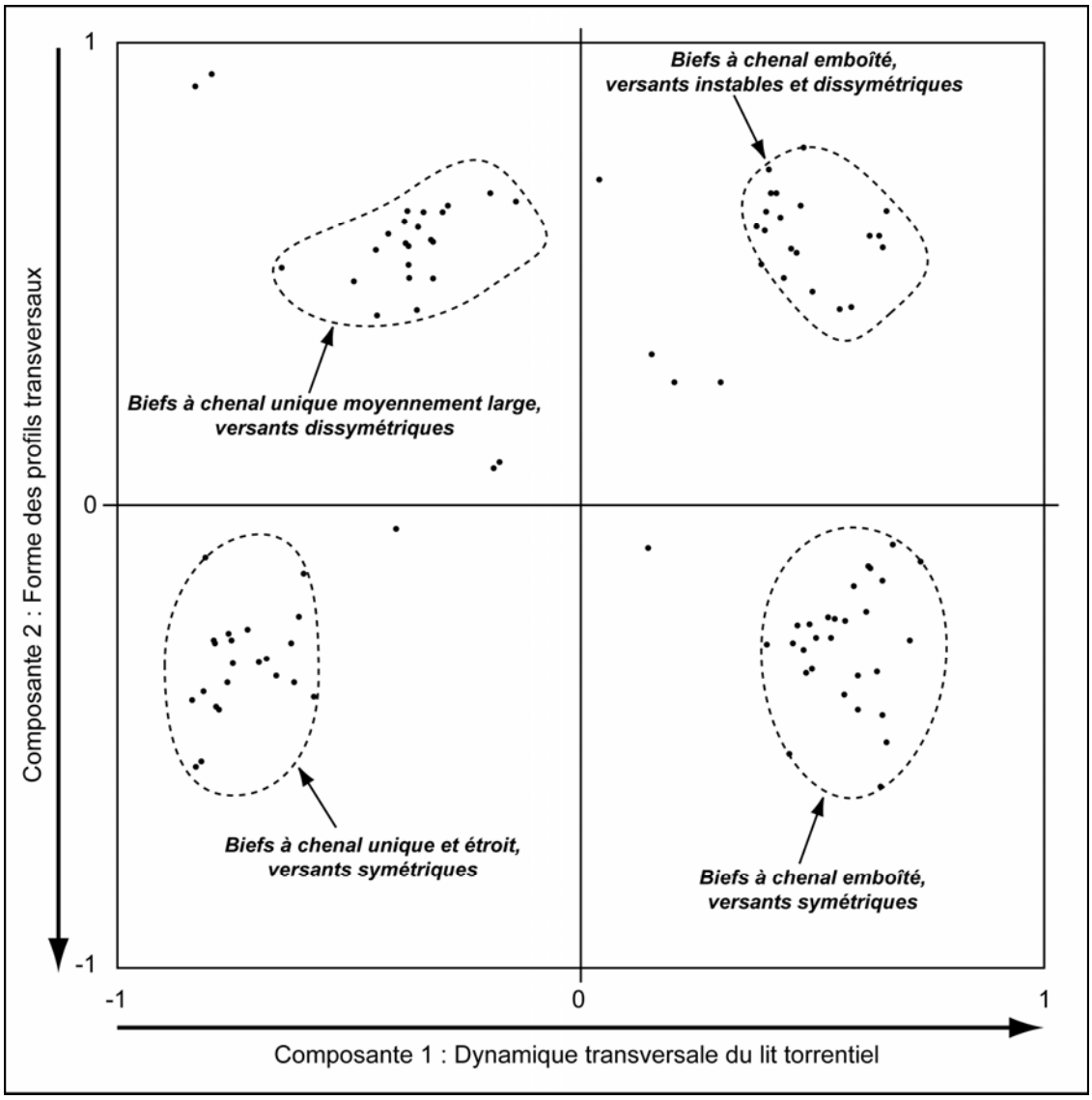


Figure 6.22 *: Interprétation des regroupements de biefs torrentiels dans le plan factoriel formé par les deux premières composantes de l'ACP.*

Les pourcentages de variance contenue respectivement dans les 5 premiers axes factoriels (12 au total, c'est à dire le nombre de variables moins une) et leur interprétation sont mentionnés dans le tableau 6.7.

Ces cinq premiers facteurs contiennent près de 81% de la variance totale. L'interprétation des facteurs à partir du 6ème axe factoriel est délicate car le pourcentage de variance expliquée par les facteurs est inférieur à la variance moyenne de chaque variable.

Tableau 6.8 *: Pourcentage de variance connue dans les 5 premiers facteurs de l'ACP et interprétation des axes factoriels.*

Facteurs	% de variance contenue dans les facteurs	Interprétation des facteurs
1er facteur	26.1	Facteur de développement transversal (largeur du lit majeur, largeur du lit mineur, section mouillée, coefficient d'incision)
2ème facteur	18.4	Facteur de forme des profils transversaux (coefficient de dissymétrie, pente en rive droite, pente en rive gauche)
3ème facteur	12.6	Facteur de stabilité des versants (F_{RD}, F_{RG})
4ème facteur	12.2	Facteur de développement longitudinal (pente du lit)
5ème facteur	11.4	Couverture végétale
	Total : 82.7 %	

Le pourcentage de variance expliquée par les cinq premiers axes factoriels est respectivement de 26.1, 18.4, 12.6, 12.2 et 11.4 % (Tab. 6.8). Les deux premiers axes résument (le premier nettement plus que le second) une proportion relativement importante (44.5 %) de la variance totale de la matrice de données. Une analyse fine des résultats montre que ces deux axes ont une signification morphodynamique concrète.

Le premier axe factoriel oppose fortement les lits torrentiels à forte dynamique latérale avec un lit majeur large aux lits torrentiels étroits fortement incisés et à faible dynamique latérale. Cette composante peut donc s'interpréter comme un ***'facteur de développement transversal'***.

Le deuxième axe factoriel oppose les lits torrentiels avec des versants pseudo-réglés et symétriques aux lits torrentiels aux profils transversaux chahutés et dissymétriques. Cette composante peut ainsi s'interpréter comme un ***'facteur de forme des profils transversaux'***.

A partir de l'interprétation des facteurs F1 et F2 (Fig. 6.22) représentant près de 45% de l'information, quatre groupes peuvent être interprétés (Fig. 6.23) :

- ***Groupe 1 : biefs à chenal emboîté et versants symétriques*** ; le lit torrentiel est généralement large et composé d'un lit mineur et d'un lit majeur. La pente du lit est fortement variable. Il est encombré de nombreux dépôts torrentiels (terrasses, levées, etc.). Les versants sont dans la plus part des cas très pentus et symétriques ;
- ***Groupe 2 : bief à chenal emboîté et versants dissymétriques*** ; le lit est large, avec un lit mineur et un lit majeur. De nombreux dépôts incisés par le torrent encombrent le fond du lit. Les versants sont dissymétriques et sont affectés par des instabilités (glissements de terrain, sapements de berge, etc.) ;
- ***Groupe 3 : biefs à chenal unique et étroit et versants symétriques*** ; le lit est constitué d'un chenal unique et très étroit (au maximum 5 m). Il est fortement incisé dans les marnes noires et les marno-calcaires. La pente du lit est toujours supérieure à 7°. Les versants sont très pentus et symétriques. Le torrent coule directement sur la roche mère ;
- ***Groupe 4 : biefs à chenal unique et versants dissymétriques*** ; le lit est pentu et relativement étroit (largeur inférieure à 8 m) et encombré par de nombreux dépôts et débris organiques pouvant former un embâcle. Les seuils à l'aval de ces biefs sont bien souvent détruits ou en mauvais état. Les versants dissymétriques sont affectés par des petits glissements de terrain superficiels. 21

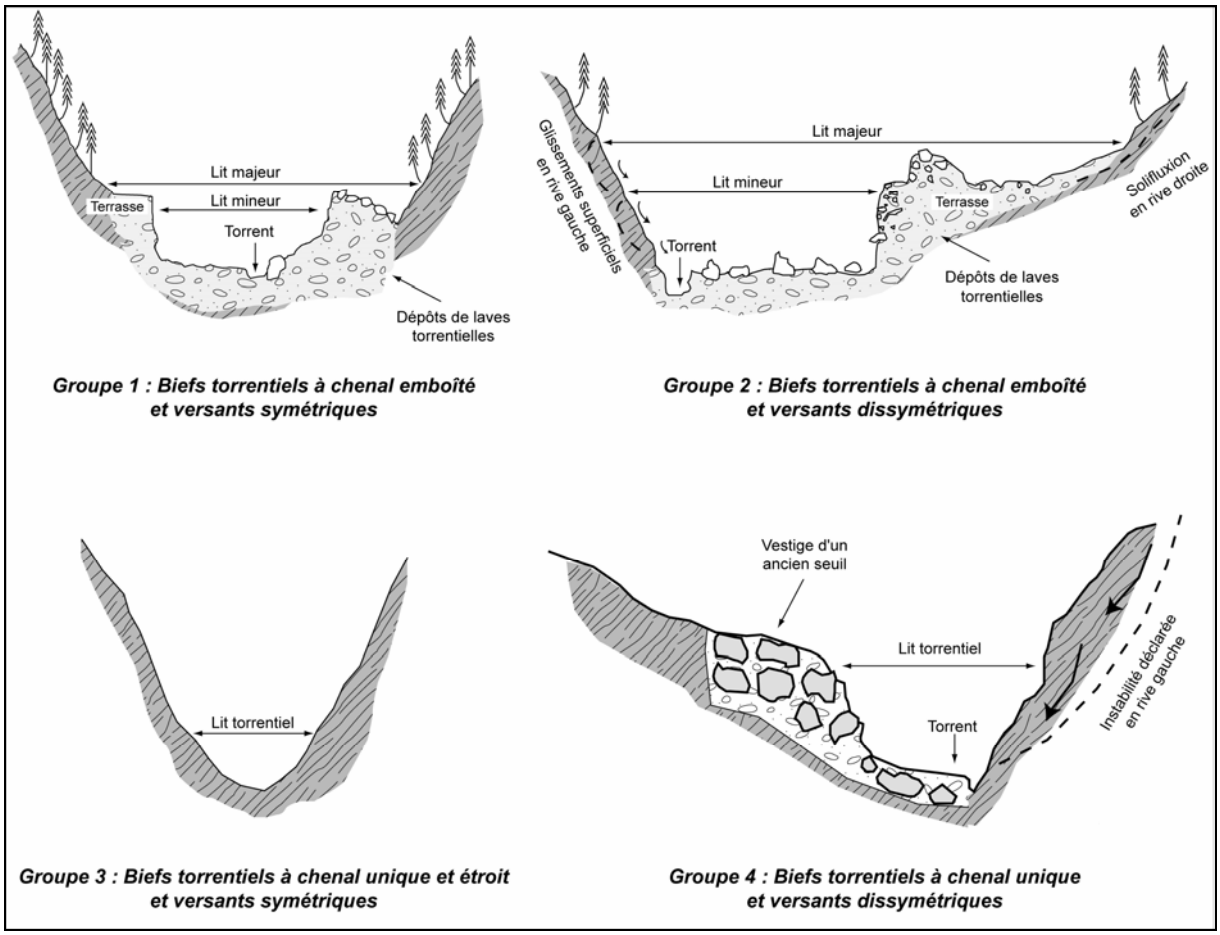


Figure 6.23 *: Coupes transversales type des quatre groupes de biefs définis par l'ACP.*

6.2.3. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

L'objectif de la CAH est de confirmer, d'affiner ou le cas échéant d'infirmer les regroupements mis en évidence par l'ACP. Les fondements théoriques de cette méthode sont disponibles en annexe (Annexe 13).

Comme le montre la figure 6.24, cette CAH permet de discriminer cinq groupes de biefs (Tab. 6.9) essentiellement à partir des caractéristiques morphométriques du chenal torrentiel :

- **Groupe A** (16 biefs) correspond aux caractéristiques du groupe 4 de l'ACP, avec une distinction en deux sous-groupes :

  - A1 (11 biefs) avec une pente moyenne du lit de 5° et une pente des versants fortes (17 à 33°) coïncide aux seuils limités par des seuils anthropiques ;
  - A2 (5 biefs) avec une pente moyenne du lit de 12° et une pente des versants modérée (20 à 25°) coïncide aux seuils limités par des seuils naturels ;

- **Groupe B** (23 biefs avec 5 seuils naturels et 18 anthropiques) correspond aux caractéristiques du groupe 1 de l'ACP, avec une distinction en deux sous-groupes :

  - B1 (10 biefs) avec un lit majeur large de 11 m en moyenne et une pente des versants très forte (30 à 35°) ;
  - B2 (13 biefs) avec un lit majeur large de 18 m en moyenne et une pente des versants forte (22 à 29°) ;

- **Groupe C** (32 biefs avec 1 seuil naturel et 30 anthropiques) correspond aux caractéristiques du groupe 1 de l'ACP, avec une distinction en deux sous-groupes :

  - C1 (17 biefs) avec un lit majeur large de 25 m en moyenne et une pente des versants forte (24 à 27°) ;
  - C2 (15 biefs) avec un lit majeur large de 20 m en moyenne et une pente des versants modérée (19 à 21°) ;

- **Groupe D** (24 biefs avec 11 seuils naturels et 13 anthropiques) correspond aux caractéristiques du groupe 4 de l'ACP, avec une distinction en deux sous-groupes :

  - D1 (10 biefs) avec un lit majeur large de 14 m en moyenne et une pente des versants modérée (17 à 22°) ;
  - C2 (14 biefs) avec un lit majeur large de 8 m en moyenne et une pente des versants modérée (26 à 31°) ;

- **Groupe E** (16 biefs avec 1 seuil naturel et 15 anthropiques) correspond aux caractéristiques du groupe 2 de l'ACP, avec une distinction en deux sous-groupes :

  - E1 (2 biefs du cône de déjection) avec un lit majeur large de 13 m en moyenne et une pente des versants faible (2 à 17°) ;
  - C2 (14 biefs) avec un lit majeur large de 5 m en moyenne et une pente des versants modérée à forte (16 à 31°).

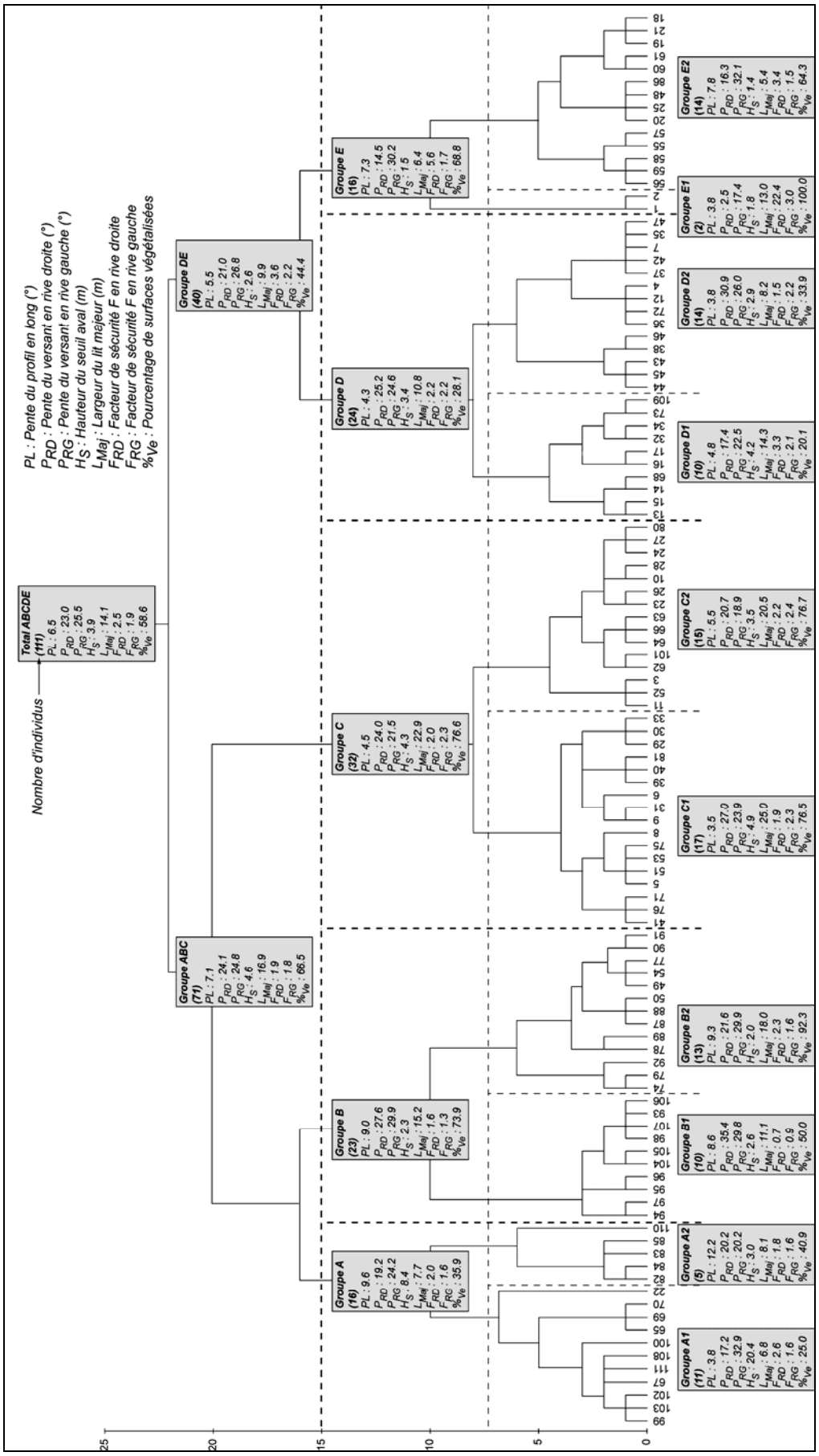


Figure 6.24 *: Arbre hiérarchique des 111 biefs torrentiels obtenus par la CAH.*

Tableau 6.9 : *Caractéristiques des variables pour les 5 groupes définis par la CAH.*

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		Pente lit (°)	Pente RD (°)	Pente RG (°)	Htr seuil (m)	Lit min. (m)	Lit maj. (m)	Inc. (m)	Dys. (m)	Htr Ber. (m)	Sec. mouil. (m^2)	Couv. veget. (%)	F RD	F RG
Gr.A	Moyenne	**9.6**	19.2	24.2	**8.4**	6.6	7.7	**3.9**	0.1	**4.6**	**113.7**	35.9	2.0	1.6
	Médiane	6.8	19.9	22.6	**3.7**	6.0	7.0	**4.0**	*0.0*	**5.0**	**120.9**	50.0	1.7	*1.3*
	Ecart-type	**12.0**	*4.8*	**8.9**	**11.1**	2.2	*3.1*	0.9	0.1	0.8	**119.5**	18.2	1.0	0.6
	Min	1.3	9.1	*10.9*	*0.0*	*3.0*	4.0	**2.8**	*-0.2*	*0.8*	154.8	*0.0*	1.1	0.9
	Max	**51.2**	*24.9*	**46.1**	**45.0**	13.0	15.0	5.7	0.3	*3.0*	**247.2**	*50.0*	4.7	2.7
Gr.B	Moyenne	9.0	**27.6**	29.9	2.3	**9.8**	15.0	*3.0*	*0.0*	4.4	344.1	73.9	*1.6*	*1.3*
	Médiane	**8.2**	**29.8**	**31.3**	2.5	**10.0**	14.5	*2.9*	*0.0*	**5.0**	321.4	**75.0**	*1.4*	1.4
	Ecart-type	4.4	**9.8**	4.8	*1.9*	**3.4**	5.4	*0.5*	0.1	0.9	110.2	23.2	1.0	*0.4*
	Min	**2.9**	12.4	**20.3**	*0.0*	4.5	5.0	2.2	-0.1	2.0	**169.5**	**50.0**	*0.5*	0.7
	Max	22.1	**43.6**	36.7	*7.0*	**18.0**	29.0	*4.1*	0.3	**5.0**	604.4	100.0	3.7	*2.1*
Gr.C	Moyenne	4.5	24.0	*21.5*	4.3	7.0	**22.9**	**3.9**	*0.0*	3.3	300.7	**76.6**	2.0	**2.3**
	Médiane	4.6	23.3	*21.3*	3.6	6.5	**23.5**	**4.0**	*0.0*	3.0	304.4	**75.0**	2.1	**2.5**
	Ecart-type	3.3	6.3	*4.3*	2.8	2.5	5.0	0.8	0.1	**1.3**	95.3	24.5	*0.6*	0.7
	Min	*0.1*	**12.9**	12.2	*0.0*	*3.0*	**13.0**	2.6	*-0.2*	1.5	125.3	25.0	0.7	**1.3**
	Max	16.1	38.4	*32.4*	9.5	14.0	**35.0**	5.6	*0.2*	**5.0**	470.3	100.0	*3.3*	**4.3**
Gr.D	Moyenne	*4.3*	25.2	24.6	3.4	5.5	10.8	3.5	*0.0*	**4.6**	170.8	*28.1*	2.2	2.2
	Médiane	*4.4*	27.4	24.8	3.1	5.0	7.0	3.2	*0.0*	**5.0**	165.1	*25.0*	2.1	2.2
	Ecart-type	*2.6*	8.0	5.6	2.6	1.4	**8.1**	0.8	0.1	0.9	*66.2*	27.9	1.3	0.8
	Min	0.2	8.9	15.0	*0.0*	*3.0*	4.0	2.4	-0.1	**2.5**	*81.1*	*0.0*	0.7	0.7
	Max	10.2	36.0	33.8	8.8	*8.0*	**35.0**	4.9	*0.2*	**5.0**	*302.2*	100.0	5.1	3.6
Gr.E	Moyenne	7.3	*14.5*	**30.2**	*1.5*	*5.0*	*6.4*	3.2	**0.2**	**4.6**	*169.3*	68.8	**5.6**	1.7
	Médiane	7.6	*14.3*	29.2	*1.0*	*4.0*	*4.1*	3.1	**0.2**	**5.0**	*163.6*	**75.0**	**3.5**	1.6
	Ecart-type	3.4	6.1	7.5	2.1	*1.8*	3.8	**1.1**	0.1	*0.7*	96.8	**28.1**	**6.0**	**0.9**
	Min	2.1	*2.3*	17.3	*0.0*	*3.0*	*3.0*	*1.9*	**0.1**	**2.5**	137.1	25.0	**2.3**	0.6
	Max	13.5	25.4	43.7	8.0	8.5	14.0	**6.6**	**0.4**	**5.0**	383.3	100.0	**22.4**	3.0

6.2.4. Discussion

Ces deux analyses statistiques multivariées (ACP et CAH) ont permis d'élaborer une typologie des biefs torrentiels, la CAH confirmant et complétant les résultats de l'ACP. Ce découpage correspond aux observations de terrain, la typologie de la CAH, très fine, traduit-elle le fonctionnement hydro-géomorphologique observé durant la lave torrentielle de 2003 ? Pour ce faire, nous avons comparé le fonctionnement de ces cinq groupes durant la lave de 2003 (Fig. 6.25).

Dans cette analyse, nous n'avons considéré que les biefs qui ont véritablement fonctionné durant la lave. Chaque bief est caractérisé par un volume de matériau, négatif si l'érosion a prédominé, positif si le dépôt a prédominé. Sur la figure 6.25, les volumes (volume moyen, minimal et maximal) de matériaux érodés ou déposés sont représentés pour chacun des cinq groupes.

Le groupe B est clairement associé avec un mode de fonctionnement. **Ces biefs sont caractérisés par une érosion du lit fortement marquée** (en moyenne, un peu moins de 2 000 m^3 par bief). Ce sont les biefs qui présentent en quelque sorte le meilleur compromis entre une pente du lit modérée à forte (9° en moyenne pour ce groupe) et une largeur du lit conséquente (15 m). Dans ces biefs, les anciens dépôts torrentiels (provenant de la crue de 2002 et de la lave de 1996) ont été fortement incisés.

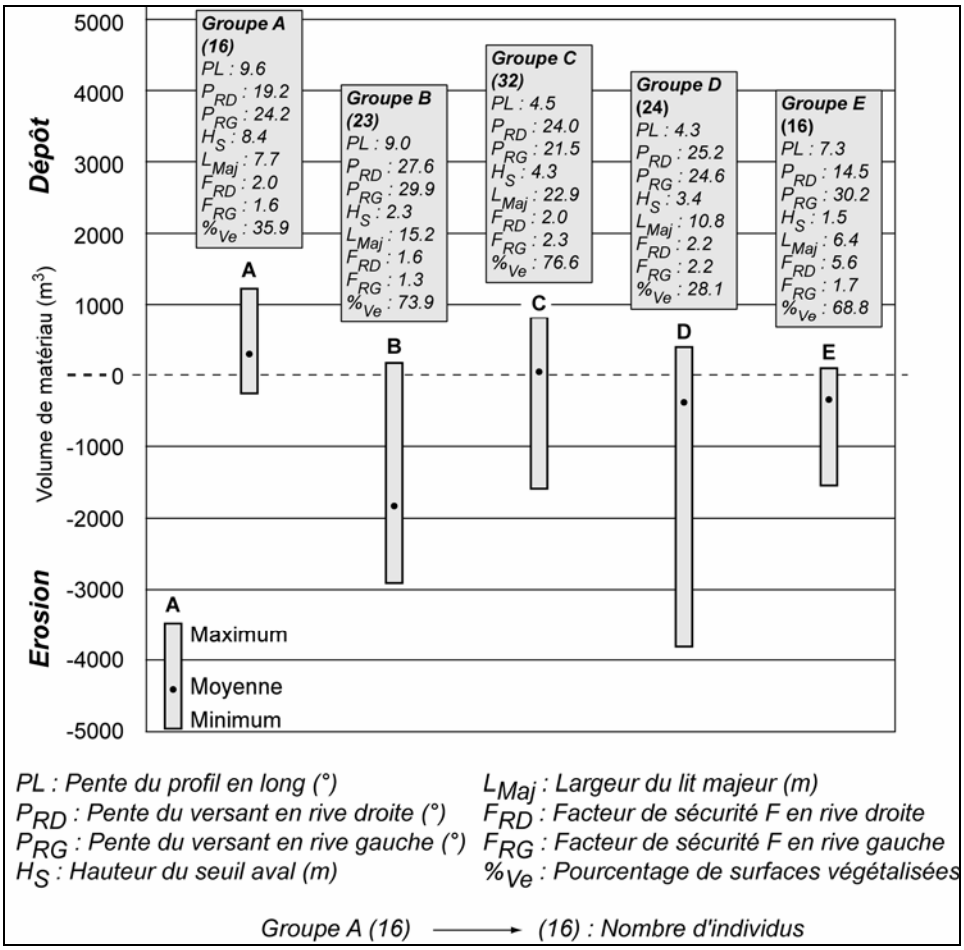


Figure 6.25 *: Caractéristiques relatives aux volumes érodés ou déposés par la lave torrentielle de 2003 pour les 5 groupes définis par la CAH.*

L'association des quatre autres groupes avec un mode de fonctionnement est beaucoup moins évidente. Toutefois, les biefs du groupe A ont globalement fonctionné comme des zones de dépôts alors que les biefs des groupes D et E ont fonctionné comme des zones d'érosion. Les biefs du groupe C sont caractérisés par un relatif équilibre entre les deux modes de fonctionnement. Il est très délicat de relier un mode de fonctionnement à une caractéristique des biefs : le groupe A (dépôt) et le groupe B (érosion) possèdent par exemple des pentes moyennes équivalentes.

6.3. Conclusion du chapitre 6

L'analyse des caractéristiques physiques des dépôts et des formations superficielles sources associée à l'étude morphologique 'fine' de trois événements torrentiels survenus dans le torrent de *Faucon* permettent de formuler les conclusions suivantes :

- les laves torrentielles du Bassin de *Barcelonnette* sont toutes caractérisées par une part relativement importante de matériaux fins. Les dépôts de ces laves sur le cône de déjection correspondent ainsi à **des laves torrentielles boueuses**. Leur composition pétrographique fait apparaître des marnes noires, des calcaires et des flyschs dans des proportions variables ;

- deux grands types de mode de déclenchement peuvent être identifiés : une **zone unique de déclenchement** (glissement de terrain, embâcle) ou **plusieurs zones de**

déclenchement (réseau de ravines ou de torrents secondaires) dont la confluence correspond au déclenchement stricto sensu ;

- l'observation des laves torrentielles sur le torrent de *Faucon* en 1996 et 2003 montre que ces deux événements ont été caractérisés par une importante différence entre le volume de départ et le volume d'arrivée : **les phénomènes de contribution ont été particulièrement intenses** puisqu'ils ont dans les deux cas fournit l'essentiel des matériaux de la lave. Cet apport de matériau pendant la propagation a été mis en évidence par l'étude granulométrique et pétrographique des dépôts : ces deux laves ont été granulaires au moment de leur déclenchement puis sont devenues boueuses très rapidement suite à l'apport de marnes noires et de moraines pendant l'écoulement ;

- le bilan sédimentaire de la lave de 2003 montre que :
  - les secteurs **où l'érosion a été la plus intense** sont caractérisés (1) par un mauvais état général des seuils torrentiels et (2) par la présence d'anciens dépôts qui ont été fortement réincisés ;
  - que les secteurs faiblement érodés et/ou présentant des dépôts sont aménagés avec des seuils en bon état.
- L'analyse morphologique souligne l'importance des dépôts des événements antérieurs. Les zones de dépôts d'un événement A vont être, la plupart des cas, les zones de contribution d'un événement B ;
- La comparaison entre la typologie réalisée à partir d'une étude statistique croisée (ACP, CAH) et le fonctionnement des biefs pendant la lave de 2003 n'a pas donné entière satisfaction : la mise en relation de tel ou tel facteur morphodynamique avec un fonctionnement précis reste difficile. Néanmoins, les secteurs où l'érosion a prédominé étaient tous caractérisés par un chenal relativement large où étaient stockés d'importants dépôts de la lave de 1996 et de la crue de 2002.

Ces résultats constituent une approche préliminaire de la caractérisation morphologique des laves torrentielles boueuses évoluant dans les '*Terres Noires*'. Ils ont permis, dans un premier temps, de définir des jeux de paramètres (morphologie des zones fonctionnelles, caractéristiques physiques des matériaux, paramètres hydrauliques, etc.) caractérisant les événements de lave. Ces données doivent être utilisées, dans un deuxième temps, pour l'établir des scénarios réalistes d'événements torrentiels à des fins de modélisation.

En prenant en compte l'ensemble de ces considérations, quelle doit être notre démarche pour adapter la complexité des événements de laves torrentielles aux modèles numériques ? Comment par exemple tenir compte de la contribution pendant la propagation ? Comment évaluer l'efficacité des seuils torrentiels sur l'écoulement ?

Pour tenter de répondre à ces questions, la troisième partie de ce mémoire se propose (1) d'exposer différents scénarios pour la modélisation et (2) d'utiliser des modèles adaptés aux trois phases de la cinématique des laves.

3EME PARTIE : CINEMATIQUE DES LAVES TORRENTIELLES : APPORT DES SIMULATIONS NUMERIQUES

La ***troisième partie*** concerne l'utilisation de techniques de simulations numériques dans l'étude des phases de déclenchement, de propagation et d'étalement (dépôt).

Le ***septième chapitre*** est consacré à la mise en place d'une stratégie pour la réalisation de simulations numériques et à la présentation des codes de calcul. Les scénarios de la modélisation numérique pour le déclenchement, la propagation et l'étalement (dépôt) sont successivement abordés. Deux codes (*SEEP / W*, *FLAC/SLOPE*) ont été sélectionnés pour la phase de déclenchement, trois codes numériques (intégrant des lois de comportement viscoplastiques) ont été sélectionnés pour la phase de propagation (*Bing*, *Cemagref 1-D*, *J-DFM 1-D*), le code numérique bidimensionnel *Cemagref 2-D* a été sélectionné pour modéliser l'étalement. Une étude de sensibilité est présentée, les données d'entrée les plus sensibles sont identifiées et les limites d'utilisation des codes numériques sont évoquées. Les modèles de propagation et d'étalement (dépôt) sont calés sur les évènements de laves du torrent de *Faucon*.

Dans le ***huitième chapitre***, des scénarios d'évènements de laves sont exposés. Ces scénarios, accompagnés d'une marge d'erreur liée aux limites d'application des codes numériques, sont proposés comme un exemple d'utilisation des codes pour une gestion de l'aléa '*lave torrentielle*'. Les résultats pour trois scénarios de modes de déclenchement (deux par un glissement de terrain, un par des ruptures de berges) sont présentés. Plusieurs scénarios de propagation, suivant la localisation du déclenchement et le type de matériaux sources, sont ensuite analysés et discutés. L'introduction de la contribution dans les simulations de la propagation (selon trois méthodes) est réalisée pour les codes *Cemagref 1-D* et *DFM-Janbu*. Un essai de quantification du rôle des seuils sur la dynamique des écoulements (scénarios en fonction du nombre de seuils et de leur positionnement dans le chenal torrentiel) est proposé à l'aide des codes numériques. Enfin, les volumes minimaux pour atteindre les zones à fort enjeu (cône de déjection) sont estimés et l'étalement des matériaux sur ces espaces sont estimés par les codes numériques et discutés.

Chapitre 7 : SIMULATIONS NUMERIQUES DES LAVES TORRENTIELLES : STRATEGIE, CHOIX et VALIDITE DES CODES

Contrairement aux outils disponibles pour les crues hydrologiques (Wicks *et al.*, 1996 ; Poesen et Hooke, 1977 ; Luckey *et al.*, 2000 ; Mathys *et al.*, 2003), les outils de la modélisation des laves torrentielles ne sont pas à l'heure actuelle suffisamment généralisés et calés sur des événements réels et bien renseignés pour être utilisés systématiquement comme outil prévisionnel. La complexité du phénomène et la très grande rareté d'observations fines de laves sont les principaux freins au développement de ces modèles. Quelques études sur des sites locaux ont permis de proposer des formules d'estimation des volumes écoulés ou du pic de crue (Zimmerman, 1987 ; D'Agostino, 1996 ; Rickenmann, 1999), mais il est toujours très délicat de calculer une occurrence temporelle et spatiale.

L'état de l'art des modèles numériques de laves torrentielles présenté dans le premier chapitre de ce mémoire (§ 1.4.) a permis d'indiquer qu'il n'existait pas, à l'heure actuelle, de code numérique performant capable de modéliser l'ensemble des trois différentes phases d'une '*lave torrentielle*' : déclenchement, propagation et étalement (dépôt). En effet, résoudre les différentes équations du mouvement en combinant dans le même code, un versant, le chenal et le cône de déjection est très délicat d'un point de vue numérique (Takahashi, 1991 ; Hungr, 1995 ; Laigle et Marchi, 2000) ; l'application d'un tel modèle est limitée à des torrents aux pentes très faibles où la transition topographique entre les unités 'chenal' et 'cône' est très peu marquée (O'Brien *et al.*, 1993). Il est donc nécessaire de faire une analyse numérique pour chacune des trois phases de la cinématique des laves torrentielles selon des scénarios réalistes (§ 7.1), fondés sur l'observation de la morphologie du chenal et la caractérisation des matériaux (Crosta, 2001 ; Malet, 2003). Ce chapitre a donc pour objectif de présenter et de vérifier la validité des modèles numériques qui seront utilisés pour analyser le phénomène '*lave torrentielle*' sur le torrent de *Faucon*. L'analyse et la modélisation numérique sont réalisées à l'échelle temporelle et spatiale de l'événement.

Pour le déclenchement, une analyse couplée *SEEP/W & FLAC/SLOPE* (calcul d'un coefficient de sécurité) a été menée sur trois sites pour étudier leur stabilité pour différentes configurations hydrologiques et hydro-mécaniques. La stratégie est présentée, les paramètres apparents des matériaux sont calculés par une analyse à rebours, et une analyse de sensibilité est discutée (§ 7.2). Pour les phases de propagation et d'étalement (dépôt), le choix des modèles (§ 7.3) dans ce travail a été suggéré essentiellement par le comportement viscoplastique de type *Herschel-Bulkley* des matériaux (§ 5.5.). Le calage des codes est présenté et discuté.

7.1. Proposition de scénarios de laves torrentielles

A partir des résultats présentés dans la deuxième partie de ce travail (observations morphologiques et caractérisation des matériaux), l'objectif de cette section est de proposer des scénarios '*réalistes*' et d'identifier les paramètres géomécaniques à utiliser pour les simulations du Chapitre 8.

Ainsi, trois scénarios de déclenchement, trois scénarios de propagation et deux scénarios d'étalement (dépôt) de laves torrentielles sont proposés.

- **Pour le déclenchement :**

Les trois scénarios sont fondés sur la mobilisation des matériaux issus de glissements de terrain et sur la déstabilisation des berges du chenal torrentiel le long d'une zone instable (Fig. 7.1). Ces scénarios concernent :

- (A) la mobilisation du glissement de terrain des ***Trois-Hommes*** (§ 4.2.1.5.) ;
- (B) la mobilisation du glissement de terrain de ***Champerousse*** (§ 4.3.) ;
- (C) la déstabilisation des berges de la rive droite du glissement de terrain ***Les Clots*** (§ 4.3.1.4.).

Ces trois cas ne sont pas réellement des scénarios au sens strict du terme, puisque ce sont des cas réels. Mais dans un souci de simplification et de clarté pour le lecteur, nous avons gardé le terme de scénario. Le scénario A correspond à un cas avéré de rupture ayant pu contribuer à la genèse de la lave de 1996 (§ 6.1.2.1.). Les scénarios B et C correspondent à des cas avérés de glissements très lents, mais pour lesquels une rupture catastrophique n'est pas à exclure (Chapitre 6).

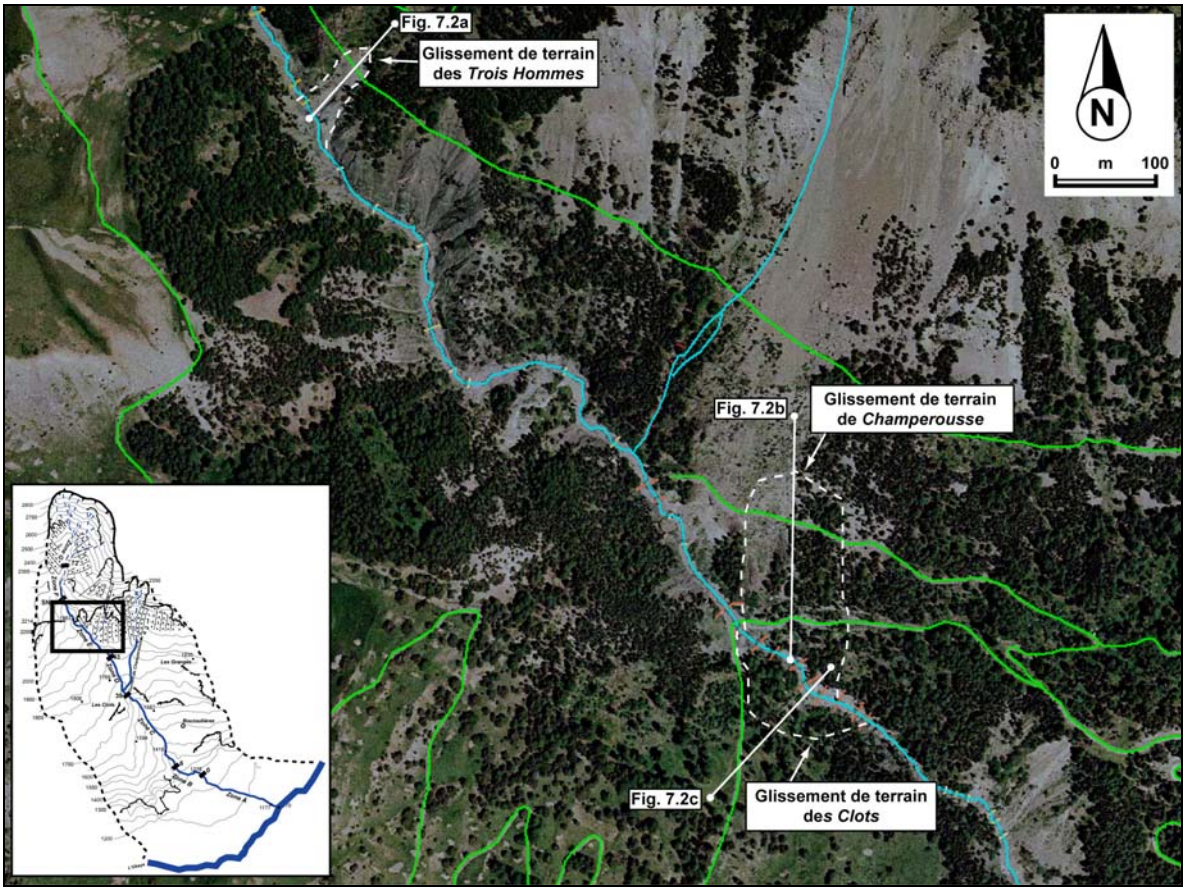


Figure 7.1 *: Localisation des trois zones potentielles de déclenchement : glissement de Champerousse en rive gauche, glissement des Trois Hommes et glissement de berges Les Clots.*

En dehors du profil topographique du versant, le coefficient de sécurité des versants est évalué en fonction des caractéristiques physiques et géomécaniques des matériaux impliqués et de l'existence dans les massifs étudiés de niveaux saturés ou d'une nappe phréatique connaissant des variations piézomètriques en fonction des saisons (conditions climatiques).

- **Pour la propagation :**

Pour la propagation, plusieurs scénarios sont proposés pour tester différentes configurations. Pour certains scénarios, les conditions initiales sont les mêmes (volume, vitesse, matériaux, etc.) afin d'évaluer l'impact de certaines configurations à partir d'une étude de sensibilité. La propagation est notamment caractérisée en termes de hauteurs et de vitesses d'écoulement à certains points du chenal. Les scénarios testés sont les suivants :

- (A) **propagation avec variations de volumes**. La propagation avec contribution est simulée par des lois empiriques. Trois méthodes d'intégration de la contribution dans le code numérique sont présentées et confrontées : la **contribution linéaire** (invariante pendant la propagation), les **sections d'érosion** où la contribution est estimée à partir de nos observations et la contribution calculée à partir de la **formule analytique de Rickenmann** (Rickenmann *et al.*, 2003) ;
- (B) : **influence du nombre et de la localisation des seuils torrentiels** sur la hauteur et la vitesse d'écoulement des matériaux dans le chenal ;
- (C) définition du **volume minimal de matériaux pour atteindre le cône** de déjection et localisation des **points de débordements** pour différents volumes et différentes rhéologies. Pour ce scénario, la propagation est simulée sans variations de volume.

- **Pour l'étalement (dépôt) :**

L'étalement sur le cône de déjection est simulé pour différents volumes avec les valeurs de débit et de hauteur d'écoulement au point d'entrée :

- (A) définition du **volume minimal de matériaux pour provoquer un débordement et un étalement** ;
- (B) évaluation de l'**étalement pour le volume maximal (120 000 m^3).**

Avant d'utiliser les différents codes numériques de propagation et d'étalement disponibles pour ces scénarios, il convient de vérifier si leur modèle conceptuel et leur résolution numérique sont adaptés à la représentation des phénomènes observés. Pour ce faire, nous avons comparé les résultats obtenus avec ces modèles avec nos observations pour différents paramètres et différentes configurations.

7.2. Déclenchement des laves torrentielles par rupture de versant : l'approche par calcul de stabilité

L'approche classique pour estimer la stabilité d'un versant est de calculer un coefficient de sécurité (F) pour différents mécanismes de rupture potentielle (Malet, 2003). L'instabilité est provoquée quand le moment moteur est supérieur au moment résistant.

Ne disposant que de peu d'informations (1) sur la géométrie des surfaces de glissement et (2) sur des niveaux d'eau ou champs de pressions interstitielles[18], la stratégie de modélisation a été la suivante pour plusieurs configurations successives :

▪ *évaluation de la géométrie d'une surface de rupture potentielle* avec le code bidimensionnel *FLAC/SLOPE* (*Fast Lagrangian Analysis of Continua* ; Cundall, 1993, 1995) qui permet d'évaluer un coefficient de sécurité dynamique, et de proposer des géométries potentielles de surface de rupture. L'évaluation de la géométrie d'une surface de rupture potentielle, correspondant sensiblement à une courbe enveloppe des zones de plus fortes contraintes de cisaillement (ou de plus grandes déformations) ***en conditions sèches,*** c'est à dire pour un massif considéré 'sec' (sans eau), a été réalisée pour identifier les paramètres hydrologiques et géomécaniques apparents par une analyse à rebours des conditions de stabilité des massifs et estimer un facteur de sécurité maximal du massif (Chapitre 7). L'intérêt de *FLAC/SLOPE* réside dans la non nécessité de définir à l'avance une série de surfaces potentielles de rupture, car l'algorithme de résolution numérique permet à n'importe quel mode de rupture de se développer naturellement.;

▪ *évaluation de la sensibilité du coefficient de sécurité* pour différentes combinaisons de caractéristiques géomécaniques des formations superficielles et du substratum marneux et de champs de pressions interstitielles (Chapitre 7) ;

▪ *simulation du champ de pressions interstitielles* à long-terme à l'aide du code bi-dimensionnel *SEEP/W* (Geoslope Inc, 1998) qui permet de simuler un champ de pressions interstitielles en conditions non saturées et en régime transitoire. Le champ de pressions interstitielles est construit à partir de la simulation d'un front d'infiltration dans les massifs (correspondant à 25 années de pluie, période 1980-2005, du poste météorologique de *Barcelonnette*) et à l'écoulement latéral lent de l'eau au sein du versant. La configuration du champ de pression est représentée par une surface de pression nulle, (*ie*. surface piézométrique). Cette configuration hydrologique correspond à la position moyenne d'une '*nappe d'eau*' au cours des 25 dernières années (Chapitre 8).

▪ *introduction des champs de pressions interstitielles ou des différents niveaux d'eau simulés* par *SEEP/W* dans le calcul de stabilité avec le logiciel *FLAC/SLOPE* pour estimer la variation du coefficient de sécurité en fonction des apports d'eau et d'évaluer les volumes de matériaux libérés (Chapitre 8).

18 Pour les glissements de *Champerousse* et *des Clots*, le suivi, entre 2001 et fin 2003, par deux limnigraphes Orphymèdes OTT installés dans deux forages situés à proximité (§ 4.1. ; Fig. 4.8) n'a révélé aucune nappe et aucune circulation d'eau durant cette période.

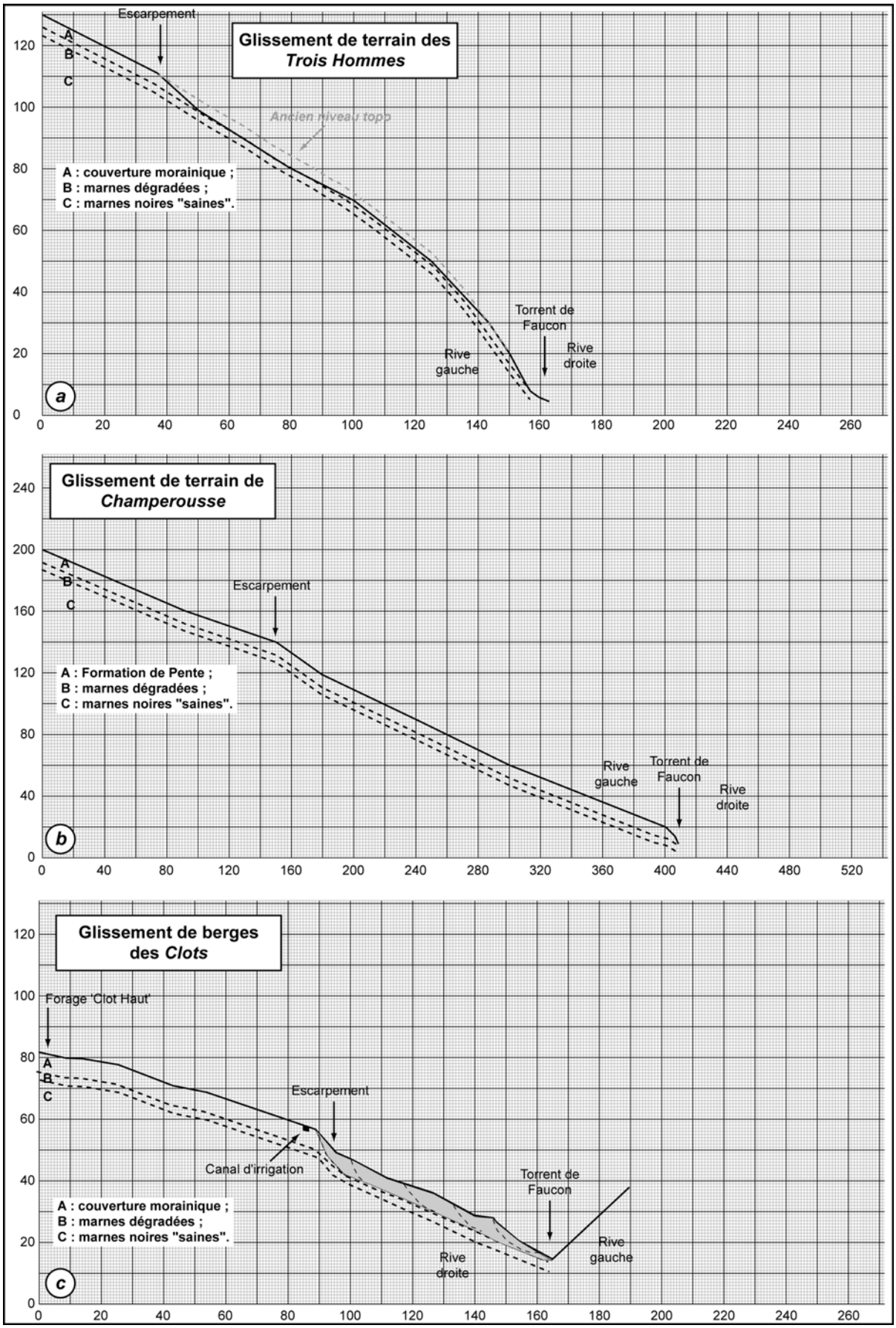


Figure 7.2 *: Modèles géologiques simplifiés des trois zones potentielles de déclenchement, (a) glissement des Trois Hommes, (b) glissement de Champerousse, (c) glissement des Clots.*

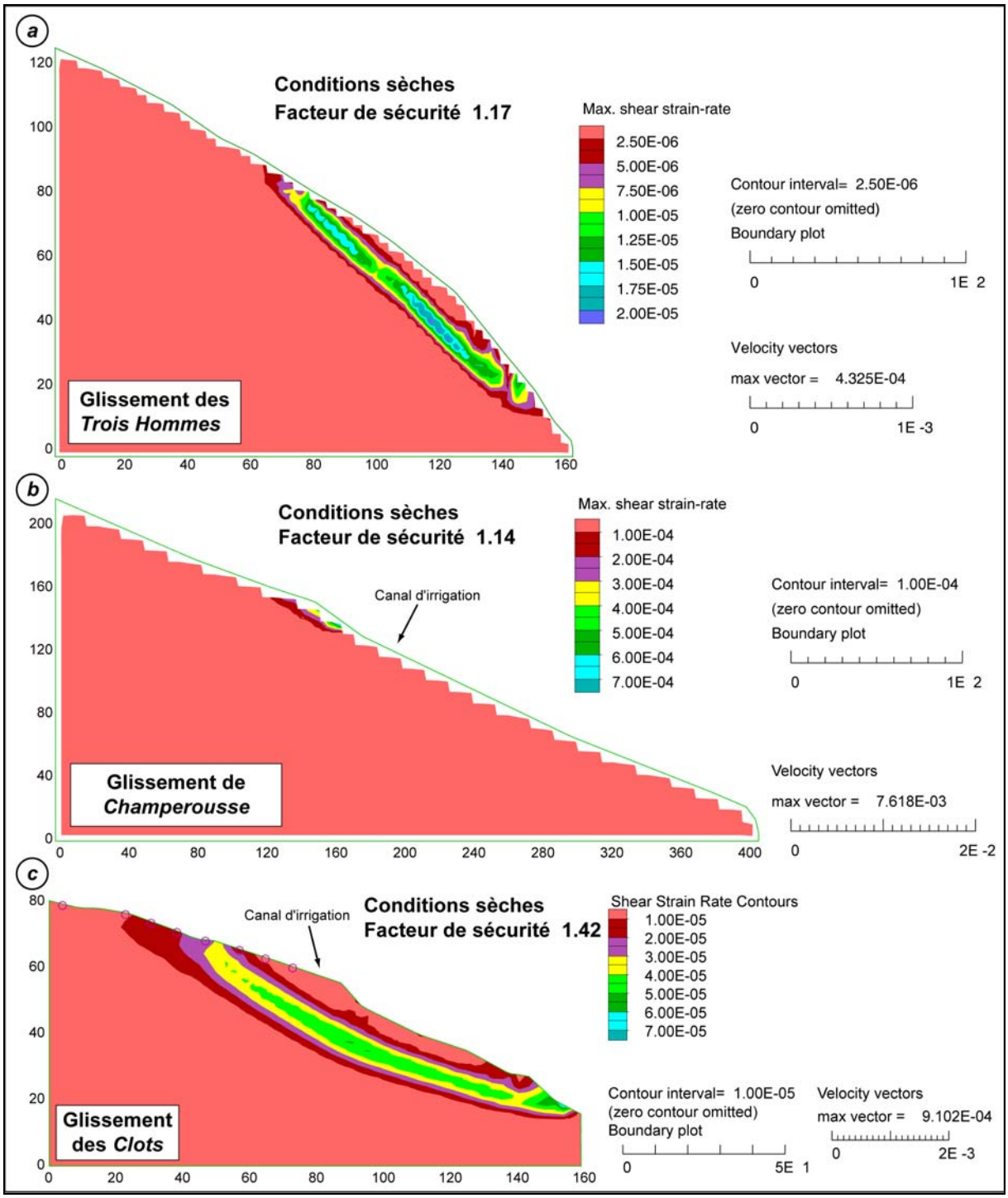


Figure 7.3 *: Résultats des calculs par le code FLAC en conditions sèches pour (a) le glissement des Trois Hommes, (b) le glissement de Champerousse et (c) le glissement des Clots.*

Les trois '*modèles géologiques simplifiés'* sont présentés à la figure 7.2. Les épaisseurs de formations superficielles ont été estimées à partir des observations ou des résultats des forages réalisés dans les environs immédiats. Ces épaisseurs sont considérées comme constantes le long des profils, en effet les observations à partir de coupes naturelles, les forages légers et profonds suggèrent une relative homogénéité des épaisseurs des formations : les interfaces sont ainsi sensiblement parallèles à la topographie de surface.

Les profils topographiques ont été choisis de façon à prendre en considération l'intégralité des mouvements étudiés. Les limites inférieures et supérieures sont suffisamment éloignées

pour que les résultats soient affectés le moins possible par un effet de bord (la base du modèle et la limité latérale amont sont fixes ; seuls des déplacements verticaux et horizontaux sont autorisés sur la limite latérale aval).

Ne disposant que de peu d'informations sur les valeurs apparentes des paramètres hydrologiques et géomécaniques à l'échelle du versant, ces derniers ont été déduits d'une analyse à rebours sur la géométrie de rupture du versant, puis sont comparés aux valeurs obtenues sur échantillons (laboratoire, *in-situ* ; § 5.7). Le matériau est supposé élasto-plastique avec une loi de comportement de type *Mohr-Coulomb*. La stratégie est la suivante :

- Dans un premier temps, les caractéristiques apparentes de résistance des matériaux (cohésion, angle de frottement) ont été déduites d'une analyse à rebours en calant au mieux la géométrie supposée de la rupture du versant en conditions sèches sur les observations afin d'estimer des valeurs de résistance maximales (valeurs de pic). Dans ce cas, les poids volumiques utilisés ont été ceux déduits des analyses de laboratoire.

Tableau 7.1 *: Paramètres hydrologiques et géomécaniques apparents ((*) calculés par analyse à rebours) et comparaison avec les valeurs obtenues sur échantillons ((**) laboratoire ou in-situ).*

	γ_d ($kg.m^{-3}$)	γ_{sat} ($kg.m^{-3}$)	Porosité	K_{sat} ($m.s^{-1}$)	ϕ^* (°)	c* (Pa)	ϕ^{**} (°)	c** (Pa)
Moraines	1370	1710	0.34	7.10^{-4}	*38*	*5 000*	34	12 000
Formation de pente sur flyschs	1320	1720	0.39	2.10^{-4}	*31*	*2000x*	31	14 000
Marnes noires dégradées	1600	1870	0.27	7.10^{-5}	*34*	*2 000*	30	16 000
Marnes noires saines	1770	1980	0.21	4.10^{-8}	*32*	*2 000*	31	18 000

Les valeurs apparentes par calcul à rebours sont en italiques, les valeurs laboratoires sont en style normal.

La comparaison entre les paramètres apparents (représentatifs à l'échelle du massif) calculés à rebours et les paramètres définis en laboratoire (représentatifs à l'échelle de l'éprouvette) montre une très bonne correspondance pour l'angle de frottement interne ; par contre les cohésions apparentes sont plus faibles que les cohésions laboratoires (d'un ordre de grandeur environ). La cohésion semble plus sensible aux effets d'échelle (Tab. 7.1).

Les résultats des calculs de stabilité obtenus avec *FLAC/SLOPE* en configuration initiale 'sèche' montrent que :

- **pour le glissement des *Trois Hommes*** (Fig. 7.3a), le versant est relativement stable (facteur de sécurité F du versant est de **1.17**) ;

- **pour le glissement *de Champerousse*** (Fig. 7.3b), le versant est relativement stable (facteur de sécurité F du versant est de **1.14**) ;

- **pour le glissement *des Clots*** (Fig. 7.3c), le versant est 'hautement' stable (facteur de sécurité F du versant est de **1.42**).

- Dans un deuxième temps, une analyse paramétrique a été réalisée sur les caractéristiques hydrologiques et de résistance des matériaux pour les marnes noires dégradées (FS02) et les moraines (FS01), qui sont les matériaux les plus présents sur le bassin versant du *Faucon*. Cette analyse a été réalisée sur le profil de glissements de berge *des Clots* (7.2c, 7.3c). Le calcul est réalisé en conditions sèches, avec les valeurs de paramètres indiquées dans le tableau 7.1, et un facteur de sécurité initial de 1.42.

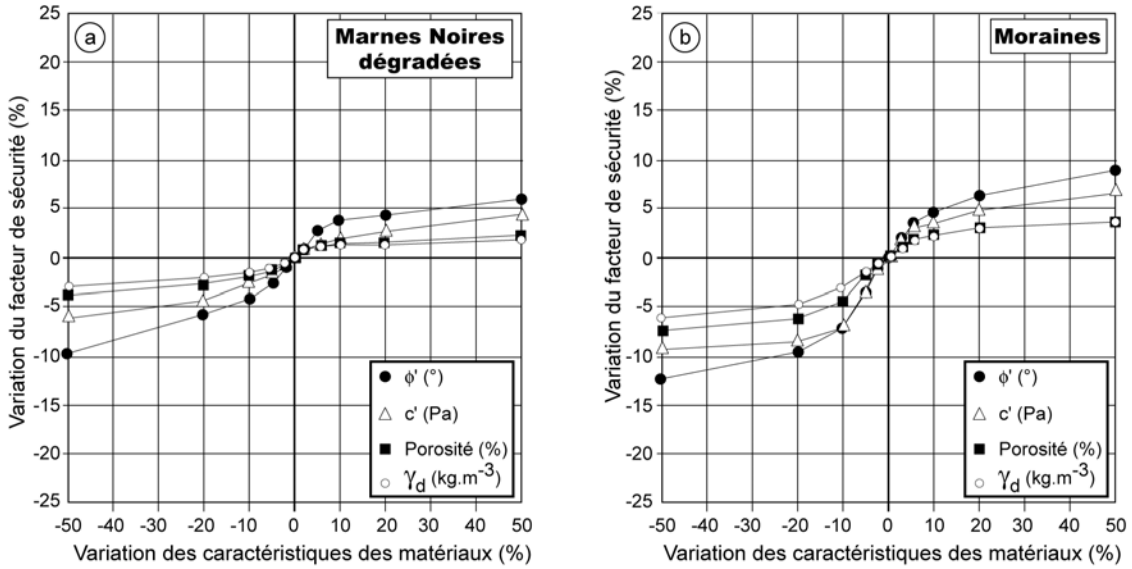


Figure 7.4 *: Analyse de sensibilité des paramètres des matériaux (angle de frottement interne, cohésion, porosité et poids volumique sec) pour (a) les marnes noires dégradées et (b) les moraines.*

L'analyse paramétrique (Fig. 7.4) indique que :

- pour les deux matériaux, l'angle de frottement et la cohésion du matériau sont les deux paramètres les plus sensibles sur la valeur du coefficient de sécurité ;
- le matériau '*moraines*', situé sur la couche supérieure du versant, présente une plus grande sensibilité dans la valeur du coefficient de sécurité global (Fig. 7.4b). Pour des variations de ±50% des paramètres, l'amplitude des variations du facteur de sécurité est de l'ordre de 25% pour le matériau '*moraines*', contre 15% pour le matériau '*marnes dégradées*' (Fig. 7.4a) ;

Ainsi, pour les caractéristiques des matériaux, la diminution du coefficient de sécurité est essentiellement contrôlée par l'angle de frottement interne. Néanmoins, ce contrôle reste modéré, puisqu'une variation de ±50% correspond à une variation de ±10 à 15% du facteur de sécurité.

Dans le chapitre 8, l'influence des conditions hydrologiques et hydro-mécaniques sur la stabilité des trois versants sera plus spécifiquement étudiée. L'influence de venues d'eau par la fuite de drains (Champerousse) ou par la présence d'écoulement superficiel intermittent (*Les Clots*), sera plus particulièrement évoquée.

Devant les incertitudes liées à notre manque de connaissance approfondie sur la présence ou non d'eau et sur la géométrie précise des surfaces de ruptures, il s'agit de prendre les résultats des simulations numériques avec précaution. Ces calculs restent avant tout indicatifs.

7.3. Analyse numérique de la propagation et de l'étalement (dépôt) des laves torrentielles boueuses

La modélisation de la propagation et de l'étalement des laves torrentielles est un travail de recherche exploratoire. Il convient donc de rester prudent quant à l'interprétation des résultats obtenus. La modélisation de l'écoulement et de l'étalement des laves torrentielles a pour principaux objectifs :

- l'évaluation de la performance et de la sensibilité des modèles numériques en fonction de l'évolution des paramètres liés au fluide lui-même (rhéologie) et de son environnement (pente du profil en long, hauteur et emplacement des seuils torrentiels) ;
- l'estimation des caractéristiques d'écoulement (vitesse de propagation, hauteur d'écoulement, débit, distance de parcours, points de débordement et étalement) pour des scénarios réalistes.

Les modèles numériques pour simuler l'écoulement et l'étalement ont été choisis en fonction des caractéristiques rhéologiques des laves torrentielles boueuses observées dans le torrent de *Faucon* et sur l'ensemble des torrents du bassin de *Barcelonnette* (§ 5.5., Malet *et al.*, 2003a ; Remaître *et al.*, 2005b). La granulométrie et la rhéologie des formations sources et des dépôts des laves du *Faucon* indiquent un comportent viscoplastique dans une large gamme de concentration volumique solide ($0.30 < \phi < 0.60$), bien représenté par les lois empiriques de *Herschel-Bulkley* et dans une moindre mesure de *Bingham* (§ 5.5.). Ainsi, nous avons choisi des codes numériques validés à la fois par expérimentation sur modèles réduits (canal, plan incliné) et sur des événements réels. Pour la propagation, les codes numériques *Bing* (Imran *et al.*, 1999, 2001 ; Locat *et al.*, 2004 ; Locat et Lee, 2004), *Cemagref 1-D* (Laigle et Coussot, 1994) et *J-DFM 1D* (van Asch *et al.*, 2004) ont été utilisés ; pour l'étalement, nous avons utilisé le code numérique *Cemagref 2-D* (Laigle, 1996 ; Hector, 2003). Les différentes hypothèses retenues pour les modèles de propagation sont décrites et détaillées dans Malet (2003).

7.3.1. Présentation et validité des codes

Une partie du travail de modélisation a été menée avec Jean-Philippe Malet, dans le cadre des projets *MOTE* et *ECLAT* (cf Introduction générale), ces travaux ont donné lieu à de nombreuses publications (Malet *et al.*, 2003a, 2004a et b, 2005 ; Remaître *et al.*, 2003b, 2005b). La présentation des codes *Bing*, *Cemagref 1-D et 2-D*, les hypothèses et leur formalisation numérique (détails des algorithmes, discrétisation des équations de conservation, conditions aux limites de la surface libre) et données d'entrée seront trouvées en annexe (Annexe 14).

Nous ne présenterons ici que le code *J-DFM 1-D* et les résultats de calage sur le torrent de *Faucon*, le lecteur pourra trouver des informations supplémentaires sur l'erreur relative, la sensibilité et les opérations de calage/validation sur le glissement-coulée de *Super-Sauze* avec les codes *Bing*, *Cemagref 1-D et 2-D* dans Malet (2003).

7.3.1.1. Le code de propagation J-DFM 1D : hypothèse, algorithme et données d'entrée

Le code numérique *J-DFM 1D* a été développé par van Asch *et al.* (2004) pour la propagation d'écoulements concentrés viscoplastiques. La formalisation numérique du code peut être trouvée en annexe (Annexe 14). La géométrie du code numérique est une

géométrie 1D filaire où le chenal d'écoulement est subdivisé en mailles de tailles équivalentes.

Le code utilise les équations classiques de la mécanique des sols où le bilan des forces est décrit en termes de *force motrice* (ou moment moteur) et de *force résistante* (ou moment résistant). Le code numérique est programmé dans une macro (Fig. 7.5) en Visual Basic du logiciel *Excel* (Microsoft Inc.).

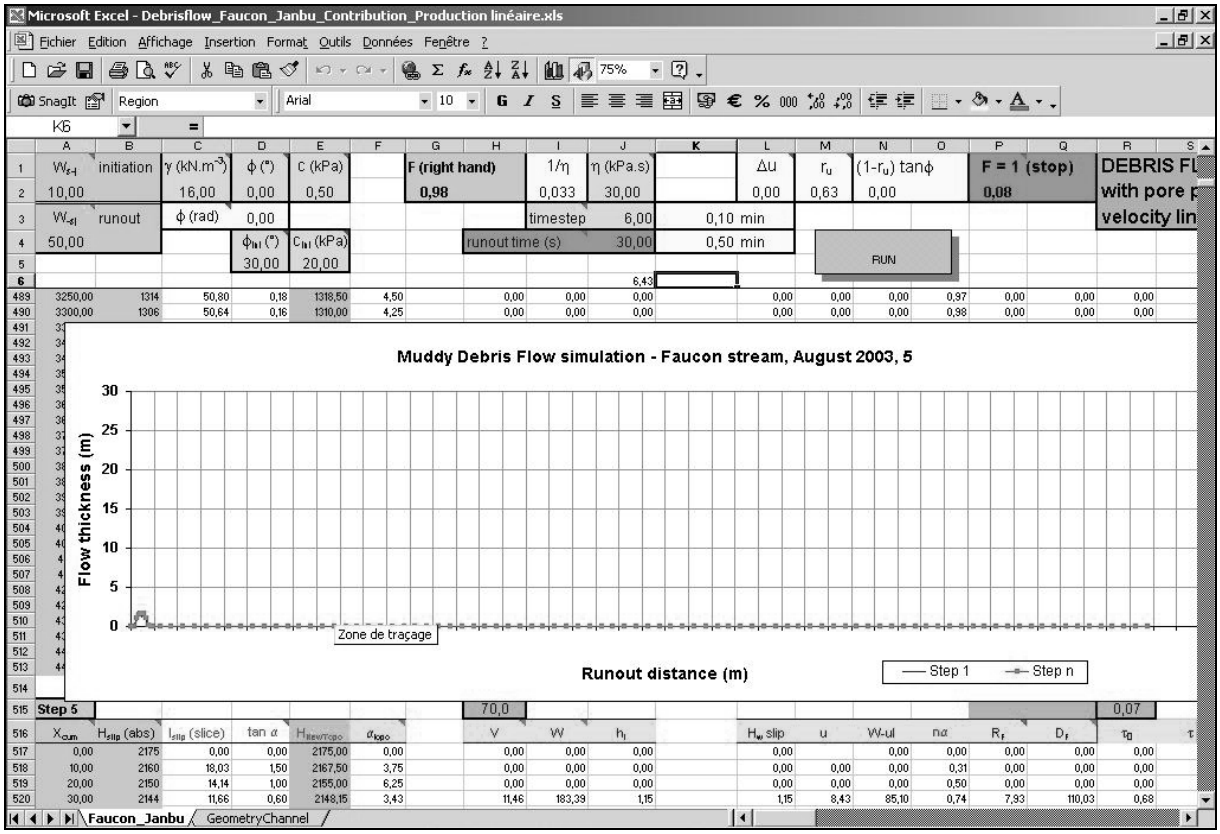


Figure 7.5 *: Interface utilisateur du code J-DFM 1-D.*

a) Equations constitutives et résolution numérique

Le bilan des forces est calculé selon l'équation de *Janbu* où les forces inter-tranches ne sont pas symétriques comme dans le modèle de pente infinie. Ce bilan de forces satisfait l'équation de conservation de la masse pour chaque tranche et l'équation de conservation de la quantité de mouvement sur toute la surface de rupture (Duncan et Wright, 1980).

Les contraintes de cisaillement et le seuil d'écoulement sont également calculés à partir de la formulation de *Janbu* (Janbu, 1954 ; Nash, 1987, Eq. 28, Eq. 29). Dans l'équation 28, puisque le terme F apparaît des deux cotés de l'équation, celui ci est calculé par itération durant le premier pas de temps. Pour les pas de temps suivants, le F de gauche (28) est calculé à partir du F^{t-1} obtenu au pas de temps précédent ; le F^{t-1} est ensuite soustrait pour chaque tranche (Eq. 29) pour calculer le terme de droite de l'équation 28. La force résistante correspond à la rhéologie du matériau assimilée à un corps de *Bingham* où la vitesse est calculée linéairement à partir des contraintes de cisaillement (Bingham, 1922). Dans le modèle de *Bingham* (Eq. 30), les contraintes de cisaillement augmentent linéairement avec le taux de cisaillement après que le seuil de contrainte ait été dépassé. Ainsi, le déplacement de la masse en $m^3.m^{-1}$ est calculé pour chaque pas de temps (Eq. 31, Eq. 32, Eq. 33 et Eq. 34) en considérant un profil de vitesse qui décroît linéairement avec la hauteur d'écoulement.

L'effet des pressions interstitielles (Eq. 35) sur l'écoulement est intégré pour chaque tranche (Eq. 36). Ces pressions interstitielles peuvent être constantes au cours de la simulation ou variables et correspondre à des surpressions interstitielles (Eq. 37). La dissipation des pressions interstitielles en excès est estimée à partir de la théorie de consolidation de Terzaghi (Whitlow, 1995, Eq. 38, Eq. 39 et Eq. 40).

Le modèle avait été utilisé en particulier sur des coulées de boue déclenchées à partir du glissement-coulée de *Super-Sauze* (van Asch *et al.*, 2004).

b) Données d'entrées, conditions initiales et conditions aux limites

Le profil en long du chenal d'écoulement est la seule donnée d'entrée géométrique ; la largeur du chenal est considérée comme constante. Les caractéristiques des matériaux utilisés comme données d'entrée sont le poids volumique, l'angle de frottement interne, la cohésion et la viscosité dynamique. Les conditions initiales correspondent à la géométrie du massif initial à l'instant t_0.

7.3.1.2. Sensibilité et analyse paramétrique

Les modèles numériques sont censés représenter au plus près la réalité. Pour vérifier leurs performances et leurs validités de nombreux tests ont été développés à partir des années 80 (MacKeown et Newman, 1987 ; Gould et Tobochnik, 1988 ; Heermann, 1990 ; Coussot, 1992 ; Hector, 2003).

La présentation détaillée du calcul de l'erreur relative et de l'étude de sensibilité pour les codes *Bing*, *Cemagref 1-D et 2-D* est disponible dans Malet (2003), nous apportons quelques compléments pour ces codes et discutons les résultats des analyses paramétriques pour le code *J-DFM 1-D*.

La performance et la validité des codes de calculs ont été évaluées à partir de la solution théorique proposée par Coussot (1992, 1994) pour définir la vitesse et la hauteur d'un écoulement de type *Herschel-Bulkley*, à l'abscisse X d'un chenal. Pour les modèles de propagation, les simulations sont réalisées sur un profil 'type' représentant les grandes caractéristiques morphologiques des torrents du bassin de *Barcelonnette* ;et sur un plan 2-D, représentatif d'un cône de déjection (pente de 2 à 6°, surface de 2 km² , Malet, 2003).

Les caractéristiques correspondant aux valeurs moyennes de paramètres de laves torrentielles boueuses observées dans les Alpes (Rickenmann et Zimmermann, 1993 ; Bardou, 2002) et dans le bassin de *Barcelonnette* (Malet *et al.*, 2002 ; Remaître *et al.*, 2005b ; § 5.5.) ont été utilisées comme données d'entrée. Les paramètres spécifiques à certaines simulations sont indiqués sur les figures correspondantes.

a) Erreur relative

- **Influence du maillage et de la résolution**. Pour les quatre codes, l'erreur relative sur la hauteur et la vitesse d'écoulement augmente logiquement avec la taille des mailles. Pour **les codes de propagation**, l'erreur relative est faible pour les hauteurs d'écoulement (entre 2 et 5%) pour les trois codes, l'erreur relative sur la hauteur pour le code *J-DFM 1-D* est indiquée sur la figure 7.5b.

Par contre des différences importantes sont identifiées pour la vitesse d'écoulement, l'erreur relative moyenne est satisfaisante pour le code *Cemagref 1-D* (9% environ) et très élevée pour les codes *J-DFM 1-D* (> 100%, Fig. 7.6a) et *Bing* (> 1000%). *J-DFM 1-D* sous-estime la vitesse de deux à trois ordres de grandeur, *Bing* surestime les vitesses de trois à quatre ordres de grandeur.

Pour le code d'étalement, l'erreur relative sur les hauteurs d'écoulement passe de 13% à 3% quand la résolution passe de 5 m à 0.25 m.

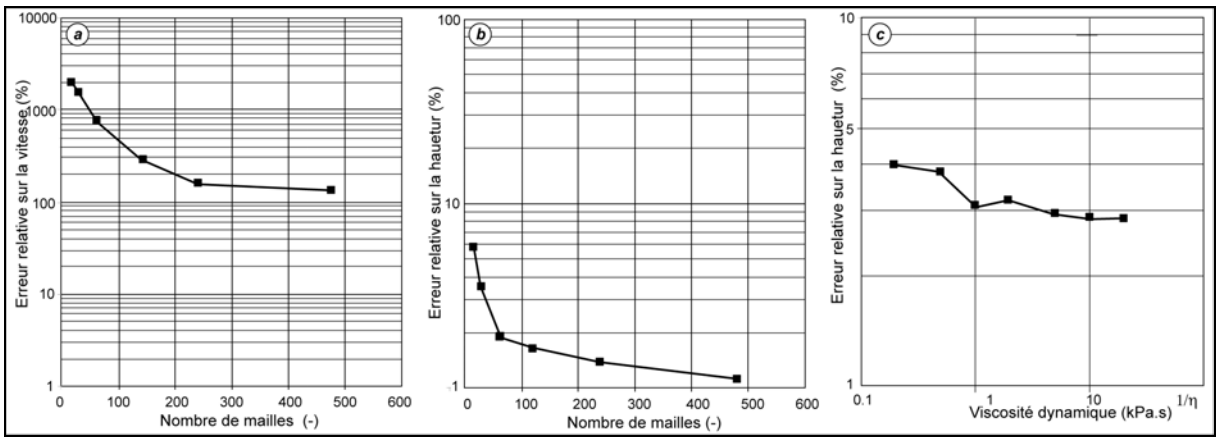


Figure 7.6 *: Erreur relative du code numérique J-DFM 1-D.*

a : influence du nombre de mailles sur l'erreur relative de la vitesse d'écoulement ;
b : influence du nombre de mailles sur l'erreur relative de la hauteur d'écoulement ;
c : influence de la viscosité dynamique sur l'erreur relative sur la hauteur d'écoulement.

Pour des torrents dont la longueur est comprise entre 2 et 5 km, un maillage de 100-200 nœuds est requis pour la propagation avec les codes *Cemagref 1-D* et *J-DFM 1-D (Fig. 7.6b)*. Une vingtaine de nœuds est suffisant pour garantir une bonne précision pour le code *Bing* (Fig. 7.7). Pour l'étalement, un maillage infra-métrique est nécessaire. Ces valeurs rejoignent les observations de Laigle *et al.* (2003) et de Rickenmann *et al.* (2006).

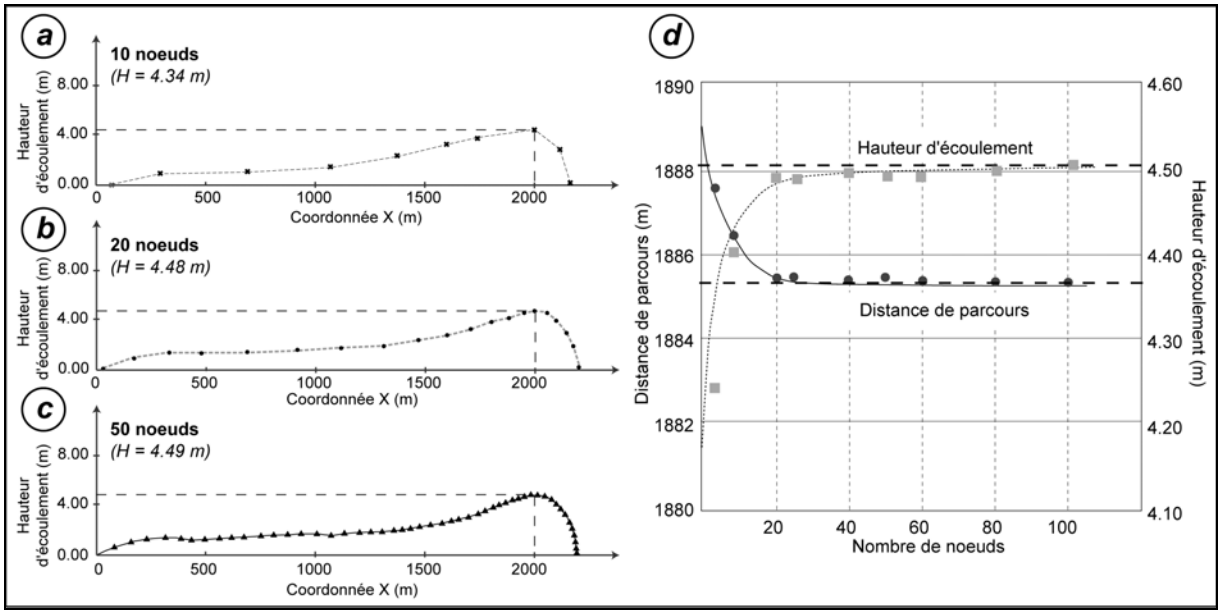


Figure 7.7 *: Hauteur d'écoulement simulée par Bing à l'abscisse X=2000 m pour (a) 10 nœuds, (b) 20 nœuds et (c) 50 nœuds ; et (d) influence du nombre de nœuds sur la hauteur d'écoulement et la distance de parcours.*

- **Influence des paramètres rhéologiques** : l'influence des paramètres rhéologiques sur la hauteur d'écoulement est globalement identique pour les codes *Bing*, *Cemagref 1-D* et *2-D*. L'erreur relative est faible, elle augmente légèrement quand le seuil d'écoulement et le poids volumique du matériau augmentent, pour des écoulements à concentration volumique plus forte (Malet, 2003). Pour le code *J-DFM 1-D*, les résultats sont analogues. L'erreur relative reste en deçà de 5% quelque soit la valeur de la viscosité dynamique (Fig. 7.6c).

Les résultats numériques montrent une très bonne concordance avec les résultats analytiques pour la hauteur d'écoulement et les vitesses pour les codes *Cemagref 1-D/2-D* ; par contre, la vitesse est très nettement surestimée par le code *Bing* par les hypothèses de calcul du modèle, alors que le modèle *J-DFM 1-D* sous-estime la vitesse. Pour le code *Bing*, cette surestimation est liée à sa structure numérique, qui intègre une couche limite basale où l'eau est piégée et va alors jouer un rôle de lubrifiant (phénomène d'hydroplanning, Assier *et al.*, 1997 ; Mohrig *et al.*, 1999).

Comme les vitesses sont largement exagérées ou sous-évaluées pour certains codes et que les hauteurs d'écoulement et les distances de parcours sont par contre bien représentées, le travail de calage ne sera pas réalisé pour les vitesses, mais uniquement pour les hauteurs d'écoulement.

b) Analyse de sensibilité

Avant d'utiliser les codes numériques pour des scénarios, il convient de vérifier au préalable leur sensibilité. L'analyse de sensibilité des paramètres géométriques rhéologiques et hydrauliques (volume, débit) pour les codes *Bing, Cemagref 1-D et 2-D* est disponible dans Malet (2003). Pour ces trois codes et pour des laves torrentielles boueuses, au comportement viscoplastique, les paramètres les plus influents par ordre décroissant d'influence sont :

- le **volume de matériau libéré** par la zone de déclenchement ;
- les caractéristiques **rhéologiques** ;
- la **topographie** du chenal et du cône de déjection.

L'analyse de sensibilité a été réalisée pour le code *J-DFM 1-D* et complète les résultats obtenus sur les trois autres codes :

- **Sensibilité des paramètres rhéologiques** (Fig. 7.8a). Pour le modèle *J-DFM 1-D*, une variation positive de +50% de la viscosité dynamique entraîne une augmentation de la hauteur d'écoulement de +50% et une diminution de –35% ;

- **Sensibilité du volume de matériau mobilisé** (Fig. 7.8b). Le volume mobilisé a une forte influence sur l'écoulement, une variation du volume de ±50%, conduit à une variation de la hauteur de ±60%. Ces résultats vont dans le sens de l'analyse de sensibilité des trois autres codes, pour les codes *Cemagref 1-D/2-D*, pour des paramètres rhéologiques constants, le volume est plus sensible que le débit sur les hauteurs d'écoulement (Laigle et Marchi, 2000 ; Rickenmann *et al.*, 2006) ;

Sensibilité de la pression interstitielle (Fig. 7.8c et d). L'influence du paramètre r_u est relativement importante : une variation de ±50% de la pression interstitielle conduit à une variation de la hauteur d'écoulement de ±40% (Fig. 7.8c) et de la vitesse de ±10% (Fig. 7.7d). Ces résultats confirment les remarques de Iverson (1997a, 2003) et de Major et Iverson (1999) qui indiquent que les pressions interstitielles au sein de la masse en mouvement ont une plus forte influence sur les hauteurs d'écoulement que sur les vitesses de propagation.

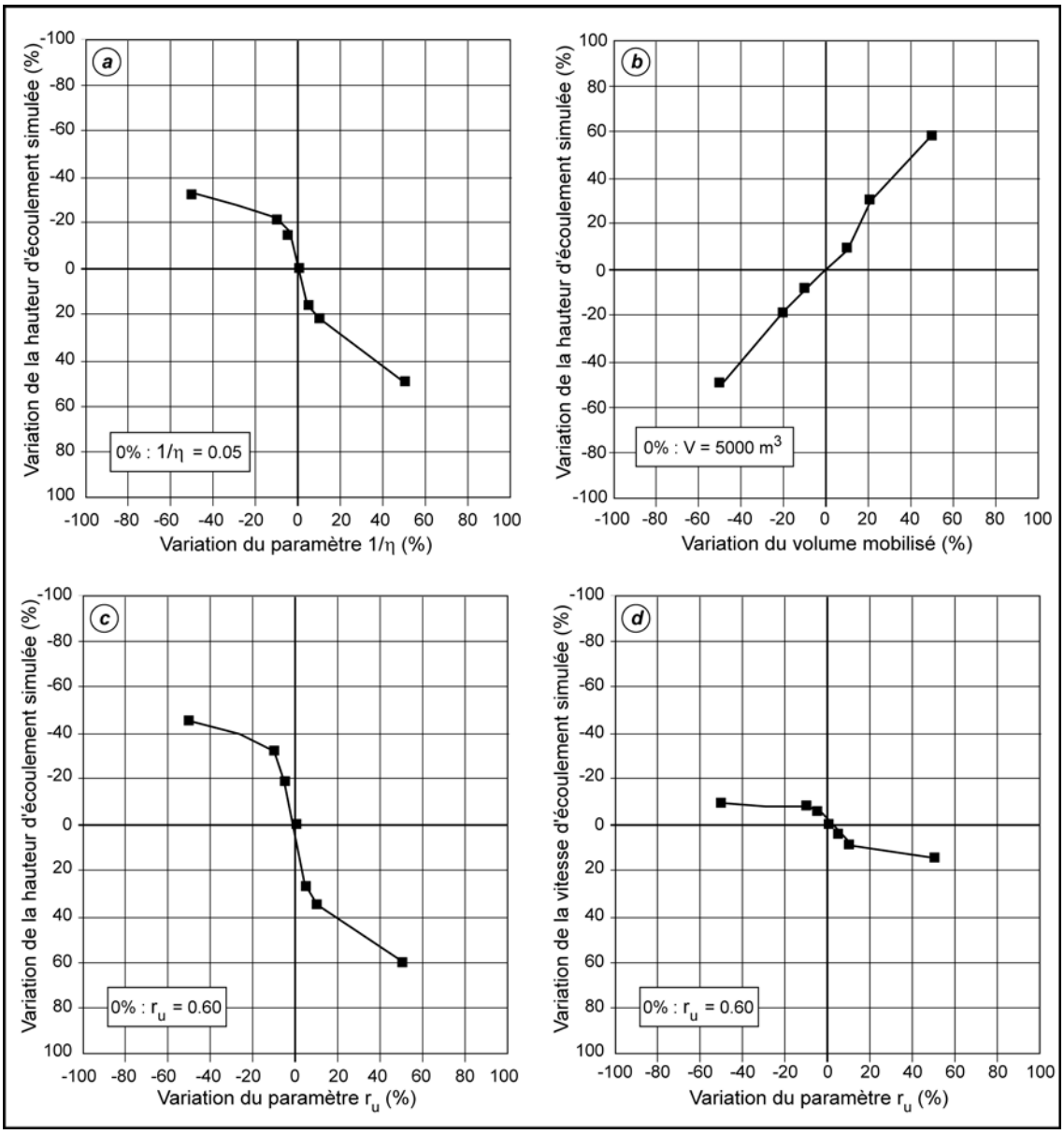


Figure 7.8 *: Analyse de sensibilité pour le code J-DFM 1-D.*

a : sensibilité de la viscosité dynamique sur la hauteur d'écoulement ;
b : sensibilité du volume sur la hauteur d'écoulement ;
c : sensibilité de la pression interstitielle sur la hauteur d'écoulement ;
d : sensibilité de la viscosité dynamique sur la vitesse d'écoulement.

Avant de pouvoir utiliser les codes numériques comme outil de prévision et de zonage de l'aléa torrentiel sur le cône de déjection, il est nécessaire au préalable de vérifier leur capacité à reproduire les caractéristiques d'un événement torrentiel en termes de distance de parcours, de vitesse d'écoulement et de hauteur d'écoulement. Cette opération de calage, sur des événements réels, est maintenant présentée.

7.3.2. Calage aux événements observés sur le torrent de Faucon en 1996 et en 2003

Pour le torrent de *Faucon*, une tentative de calage des codes est réalisée sur les deux événements de laves torrentielles survenus en 1996 et en 2003 ; un exemple de calage est présenté pour ces deux événements avec les trois codes. Rappelons tout de même que l'événement de 1996 n'a pas été observé directement par nos soins quelques jours après son déclenchement. Néanmoins, sur la base de nos observations de terrain et des différents indices relevés, il est possible de caler les modèles sur les hauteurs d'écoulement déterminées a posteriori.

Si les débordements ont été particulièrement importants en 2003, ils ont été très limités en 1996 rendant inintéressant un calage des modèles d'étalement sur cet événement. Le modèle d'étalement a donc uniquement été calé sur la lave de 2003.

7.3.2.1. Calage des modèles de propagation

Les modèles de propagation ont été calés en considérant uniquement la hauteur d'écoulement. La distance de parcours n'a pas été utilisée comme critère de calage, car pour les deux laves de 1996 et 2003, les écoulements ont parcouru l'ensemble du chenal du *Faucon* pour rejoindre *l'Ubaye* (Chapitre 3). Les hauteurs d'écoulement simulées par les codes *Bing*, *Cemagref 1-D* et *J-DFM 1-D* sont comparées aux observations de terrain des deux laves. L'origine du repère (X=0) se situe au point source de la zone de déclenchement ; le domaine de calcul s'étend sur 4 500 m environ pour les deux laves. Pour le code *Cemagref 1-D*, 60 profils transversaux (un profil transversal par bief concernés) ont été utilisés. Les paramètres de la loi de frottement sont déduits des essais rhéologiques (§ 5.5.) à la concentration volumique solide estimée de l'événement. Considérant que pour ces simulations, il n'est pas tenu compte de la contribution, le volume libéré choisi est de 100 000 m^3 pour la lave de 1996 et de 60 000 m^3 pour la lave de 2003 selon :

- une géométrie de parallélépipède (*Bing*) ;
- une géométrie de lobe (*code J-DFM 1-D*) ;
- un hydrogramme triangulaire avec un débit de pointe de 100 $m^3.s^{-1}$ (*Cemagref 1-D*).

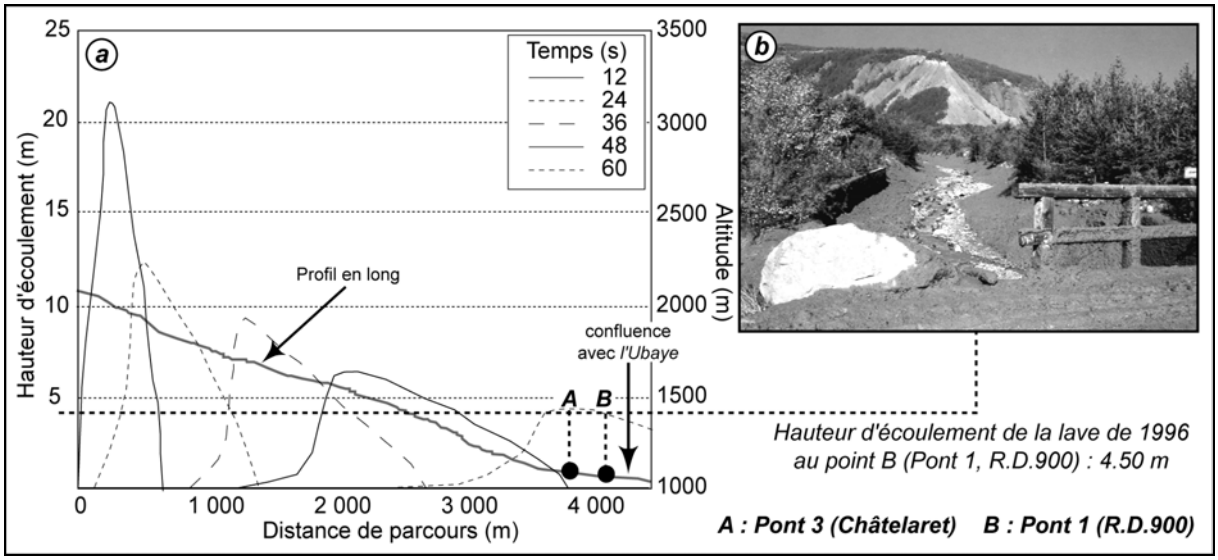


Figure 7.9 *: Calage du modèle Bing sur la lave du 19 août 1996 sur le torrent de Faucon.*

a : comparaison entre les hauteurs d'écoulement simulées et observées sur deux points de contrôle ;
b : vue sur le pont 1 après la lave torrentielle (photographie de N.Masselot, in Sivan, 2000).

Les codes *Cemagref 1-D* et *Bing* ont été calés sur les deux laves. Deux points de calage ont été utilisés, le premier à hauteur du pont 3 (*Châtelaret*), le deuxième à hauteur du pont 1 (*R.D.900*). Pour ces deux points, nous disposions de mesures de la hauteur d'écoulement grâce notamment à des traces et des projections sur les ponts (Chapitres 3 et 4).

Tableau 7.2 *: Calage du code Bing sur les laves torrentielles de 1996 et de 2003 sur le torrent de Faucon au pont 1 (modifié de Remaître et al., 2003b).*

	Paramètres rhéologiques laboratoire et observations de terrain		Résultats du code *Bing*	
	FAU96	FAU03	FAU96	FAU03
ρ (kN.m^{-3})	16.5	18.5	16.5	18.5
τ_c (Pa)	105	195	*223*	*264*
κ (Pa.s$^{-1/3}$)	53	72	*98*	*117*
Volume (m^3)	110 000	60 000	*125 000*	*70 000*
H (m) Pont 3	4.8	5.2	*4.7*	*5.1*
H (m) Pont 1	4.6	5.0	*4.5*	*4.3*
V_{max} (m.s^{-1}) Pont 3	5.1	7.6	*67.5*	*55.8*
V_{max} (m.s^{-1}) Pont 1	4.9	6.8	*70.6*	*51.6*
ε – H Pont 3 (%)			***-2.1***	***-1.9***
ε – H Pont 1 (%)			***-2.2***	***-14.0***
ε – V_{max} Pont 3 (%)			***1223.5***	***634.2***
ε – V_{max} Pont 1 (%)			***1340.8***	***658.8***

ρ est la densité du matériau, τ_c est le seuil d'écoulement de Herschel-Bulkley, κ est le paramètre de forme de la loi de Herschel-Bulkley, H est la hauteur d'écoulement, V_{max} est la vitesse maximale, ε est l'erreur relative.

Avec le code *Bing*, le calage sur les hauteurs d'écoulement est très bon pour la lave torrentielle de 1996, avec des différences inférieures à 0.10 m aux deux points de contrôle (Fig. 7.9 ; Tab. 7.2). Le calage est légèrement moins bon pour la lave de 2003, la hauteur d'écoulement est supérieure de 0.70 m au pont 1. Il est probable que cette différence soit la conséquence du fait que le rôle de bouchon du pont 1 ne peut pas être pris en compte par le modèle. Dans les deux cas, les vitesses sont logiquement largement surestimées.

Tableau 7.3 *: Calage du code Cemagref 1-D sur les laves torrentielles de 1996 et de 2003 sur le torrent de Faucon.*

	Paramètres rhéologiques laboratoire et observation de terrain		Résultat *Cemagref 1-D*	
	FAU 96 ϕ=0.45	FAU03 ϕ=0.53	FAU 96 ϕ=0.45	FAU03 ϕ=0.53
ρ (kN.m^{-3})	16.5	18.5	16.5	18.5
τ_c (Pa)	105	195	*323*	*404*
κ (Pa.s$^{-1/3}$)	53	72	*98*	*122*
Débit$_{max}$ (m^3.s^{-1})	105	115	*119*	*125*
H (m) Pont 3	4.8	5.2	*4.5*	*5.0*
H (m) Pont 1	4.6	5.0	*4.3*	*5.3*
V_{max} (m.s^{-1}) Pont 3	5.1	7.6	*5.8*	*8.4*
V_{max} (m.s^{-1}) Pont 1	4.9	6.8	*5.5*	*7.3*
V_{moy} (m.s^{-1})	/	/	*5.9*	*8.2*
ε – H (%) Pont 3	/	/	***-6.2***	***-3.8***
ε – H (%) Pont 1	/	/	***-6.5***	***6.0***
ε – V_{max} (%) Pont 3	/	/	***13.7***	***10.5***
ε – V_{max} (%) Pont 1	/	/	***12.2***	***7.3***

ϕ est la concentration volumique solide, ρ est la densité du matériau, τ_c est le seuil d'écoulement de Herschel-Bulkley, κ est le paramètre de forme de la loi de Herschel-Bulkley, Débit$_{max}$ est le débit de pointe de la lave, H est la hauteur d'écoulement, V_{max} est la vitesse maximale, V_{moy} est la vitesse moyenne, ε est l'erreur relative.

Les résultats des calages avec le modèle *Cemagref 1-D* sont présentés dans le tableau 7.3. Qualitativement, les simulations et les mesures présentent une bonne concordance. La forme des écoulements est généralement bien respectée ; les ordres de grandeur des hauteurs d'écoulement et des distances de parcours sont tout à fait cohérents avec les observations. Néanmoins, un décalage de 6% environ est observé pour les hauteurs et de 10% pour les vitesses d'écoulement.

Pour le modèle *J-DFM 1-D*, le calage a été réalisé uniquement sur la lave torrentielle de 2003, mais sur une trentaine de points le long du profil en long. Un exemple de comparaison entre les hauteurs d'écoulement observées et simulées est présenté sur la figure 7.10. Un exemple particulier de calage du modèle sera discuté dans le chapitre 8 pour un scénario tenant compte de la contribution pendant la propagation.

Les hauteurs d'écoulement sont correctement représentées, les différences entre hauteurs observées et simulées varient entre 2 et 10% pour les meilleurs calages. Nous y reviendrons plus en détail dans le chapitre 8.

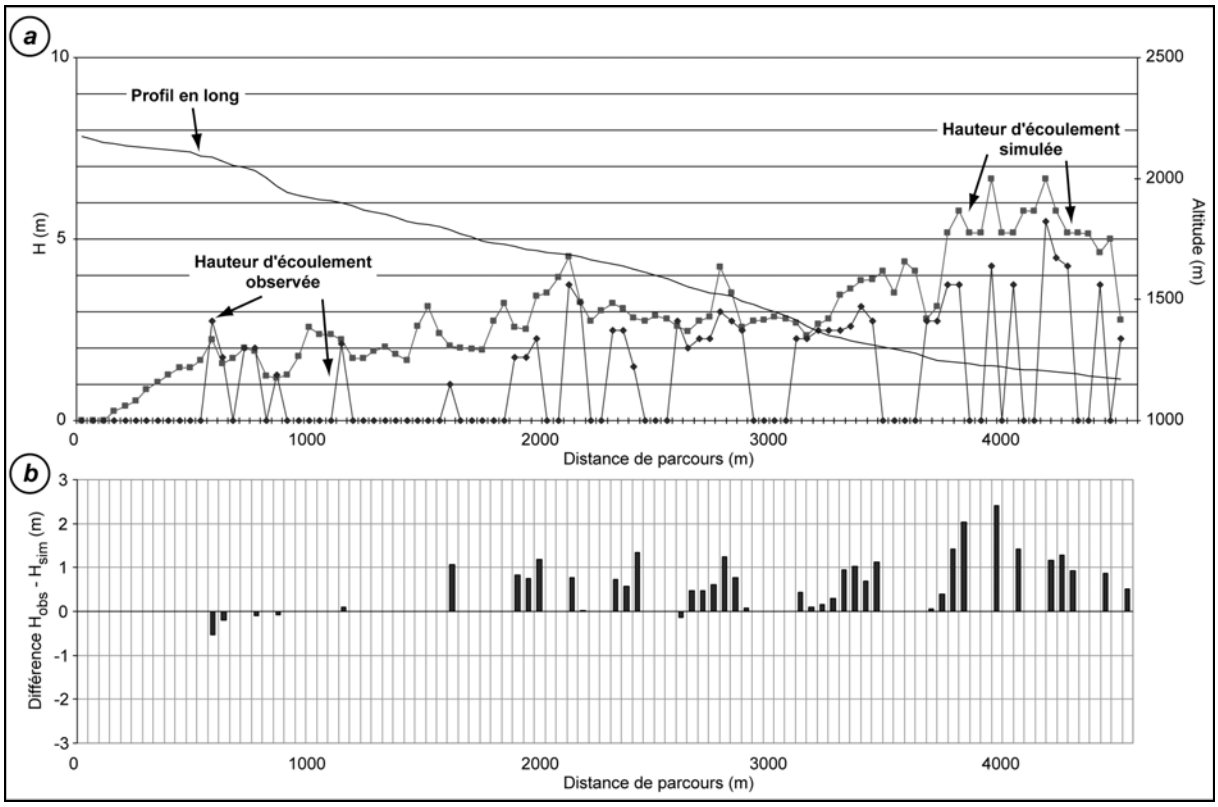


Figure 7.10 *: Comparaison entre la hauteur d'écoulement simulée et observée pour la lave de 2003 sur le torrent de Faucon avec le code J-DFM 1-D.*

a : profil en long, hauteurs d'écoulement observées et hauteur simulées ;
b : différences entre les hauteurs d'écoulement observées et simulées.

Ces trois modèles viscoplastiques permettent de représenter fidèlement les écoulements boueux observés. Pour les trois modèles, la plupart des différences observées restent à l'intérieur de la fourchette de précision que l'on peut raisonnablement attendre des mesures. Les incertitudes liées à l'estimation des différents paramètres (rhéologiques, topographiques, observations, vitesses, etc.) sont suffisamment élevées pour expliquer les différences entre calculs, mesures et observations. Elles peuvent masquer les éventuelles imprécisions du modèle (Malet, 2003). Les opérations de calage ont confirmé les problèmes liés à la vitesse. Il paraît donc plus approprié de travailler sur les hauteurs d'écoulement pour les scénarios (Chapitre 8).

7.3.2.2. Calage du modèle d'étalement

Le code *Cemagref 2-D* est calé uniquement sur l'événement du 5 août 2003, la lave de 1996 n'ayant pratiquement pas débordé. De plus, les informations pour la lave de 2003 sont nombreuses, suffisamment pour faire une bonne comparaison entre le modèle et les observations de terrain. La zone de dépôt de la lave de 2003 correspond essentiellement à la partie basse du cône de déjection (Fig. 7.11). Les paramètres hydrauliques retenus pour ces simulations correspondent aux caractéristiques d'écoulement (débit de pointe et hydrogramme) du meilleur calage obtenu avec le code *Cemagref 1-D*. Les paramètres rhéologiques sont déduits des essais en laboratoire et des mesures 'terrain' (§ 5.5).

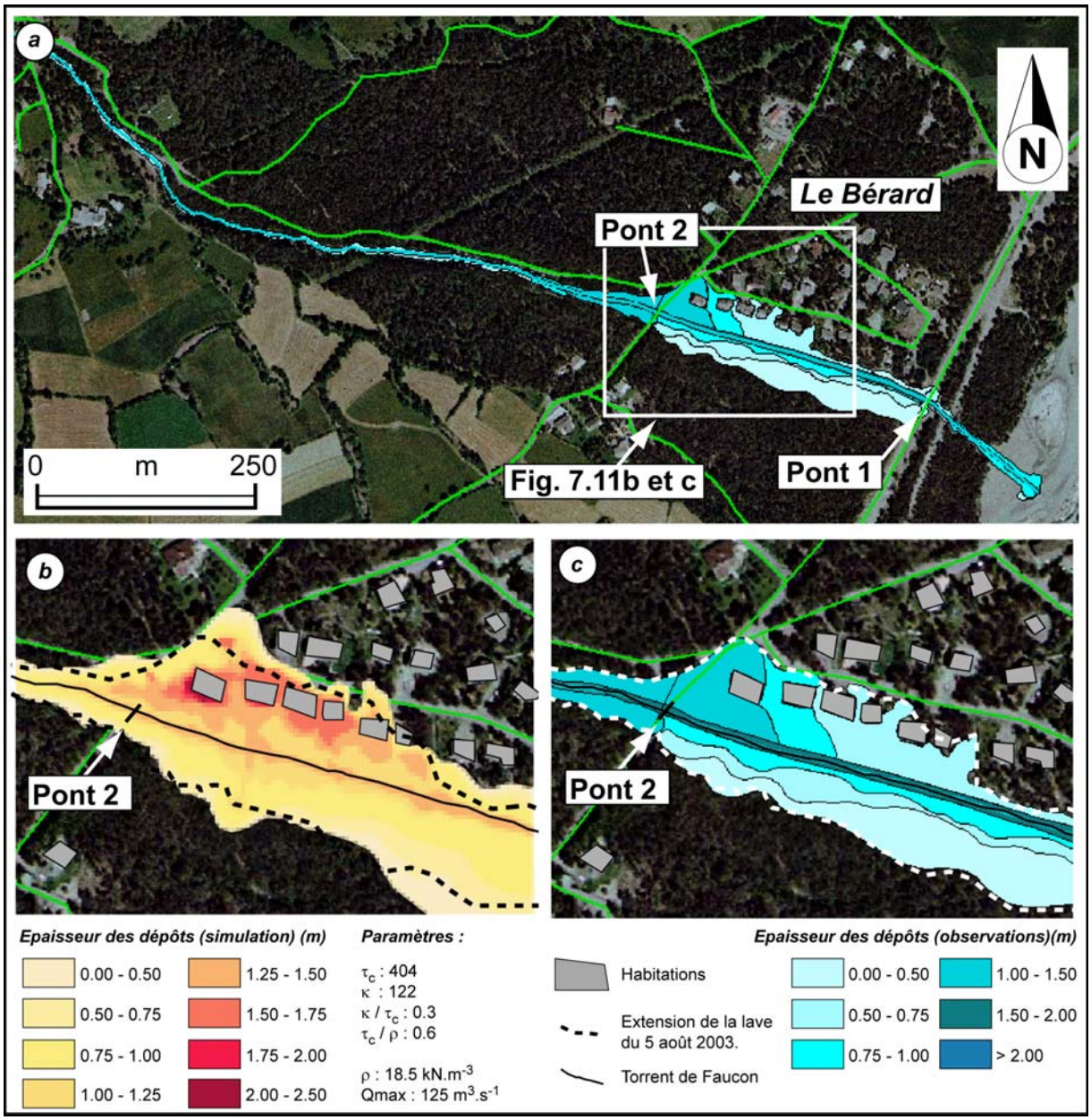


Figure 7.11 *: Comparaisons entre l'étalement simulé et observé pour la lave torrentielle de 2003 sur le torrent de Faucon (secteur du lotissement du Bérard).*

Le calage a été réalisé pour le secteur du lotissement du *Bérard*, essentiellement pour l'importance des débordements à cet endroit. Pour la meilleure simulation (Fig. 7.11 ; Tab. 7.4), la différence entre l'extension des étalements simulés et observés est satisfaisante (10% environ). Le décalage est un peu plus important pour l'épaisseur maximale des dépôts

(22%) et le volume de lave étalée (18%). La forme générale et les dimensions (longueur, largeur) sont bien respectées. En considérant ces résultats, le code *Cemagref 2-D* peut être utilisé pour les scénarios envisagés.

Tableau 7.4 *: Calage du code Cemagref 2-D sur la lave torrentielle du 5 août 2003 sur le torrent de Faucon.*

	Paramètres rhéologiques laboratoire et observations de terrain	Résultats pour le code Cemagref 2-D
ρ (kN.m^{-3})	18.5	18.5
τ_c (Pa)	195	*404*
κ (Pa.s$^{-1/3}$)	72	*122*
Volume (m^3)	60 000	*60 725*
Surface (m²)	16 183	*17 911*
E_{max} (m)	2.00	*2.45*
Vol. étale (m^3)	24 274	*28 582*
ε – Surf (%)		***10.7***
ε – E_{max} (%)		***22.5***
ε – Vol (%)		***17.7***

ρ est la densité du matériau, τ_c est le seuil d'écoulement de Herschel-Bulkley, κ est le paramètre de forme de la loi de Herschel-Bulkley, E_{max} est l'épaisseur maximale des dépôts, vol.étalé est le volume étalé, ε est l'erreur relative.

Des informations supplémentaires sur le calage du modèle *Cemagref 2-D* sur des étalements observés peuvent être trouvées dans Hector (2003), Laigle *et al.* (2003), Malet *et al.*, (2005) et Rickenmann *et al.* (2006).

7.4. Conclusion du chapitre 7

Le déclenchement, la propagation et l'étalement des laves torrentielles boueuses sont modélisés. L'analyse paramétrique a permis d'identifier les paramètres les plus sensibles pour les différents modèles.

Pour le déclenchement, les codes *SEEP/W* et *FLAC* sont utilisés pour définir la susceptibilité de trois sites ayant ou pouvant déclencher une lave torrentielle. L'analyse paramétrique a montré que ce sont les caractéristiques des matériaux (angle de frottement interne, puis cohésion) qui influencent le plus le facteur de sécurité.

Pour la propagation et l'étalement, la performance des codes de calculs *Bing*, *Cemagref 1-D*, *J-DFM 1-D* et *Cemagref 2-D* est testée par calage sur les caractéristiques rhéologiques et géométriques (hauteur, extension et épaisseur) des dépôts. Les codes apparaissent performants pour représenter les hauteurs d'écoulement, les distances de parcours et l'extension des matériaux au point de débordement ; la vitesse de propagation est relativement bien représentée par les codes *Cemagref 1-D/2-D* mais largement surestimée par le code *Bing*, et sous-estimée par le code *J-DFM 1-D*. Il est donc plus approprié de considérer les hauteurs d'écoulement et l'extension des dépôts pour estimer l'aléa '*lave torrentielle*' à partir des codes numériques. A partir des modèles calés, les scénarios définis en § 7.1. peuvent être testés pour chacune des phases de la cinématique des laves torrentielles.

Chapitre 8 : ANALYSE ET SIMULATION DE LAVES TORRENTIELLES : APPLICATION A DES SCENARIOS SUR LE TORRENT DE FAUCON

Une analyse fondée sur des scénarios suppose de définir un intervalle de valeurs plausibles pour chacun des facteurs (volume, débit, paramètres rhéologiques, etc.) (Laigle, 1997). Un problème à résoudre est la définition des paramètres d'écoulement d'un événement. Les caractéristiques rhéologiques d'une lave torrentielle ne sont pas les mêmes d'un bassin versant à l'autre, et même au cours d'un événement, en fonction des variations de la concentration volumique solide, de pertes de charge (dépôt) ou d'apports extérieurs post-déclenchement (contribution des versants, des berges, du chenal) et des variations de pressions interstitielles (Iverson, 2003). Le cas est encore plus complexe lorsque le matériau est mobilisé par liquéfaction d'un glissement de terrain ; dans ce cas, aucun débit de crue n'est disponible.

L'intérêt des modèles numériques pour ces scénarios réside dans la possibilité de modifier les paramètres, ce qui peut autoriser un nombre important de calculs. Les codes numériques ayant été validés en laboratoire et sur des évènements caractéristiques bien documentés, ils peuvent être appliqués de façon prospective à des cas concrets. Ce dernier chapitre a donc comme objectif de présenter et de commenter les résultats de ces applications pratiques pour les trois phases (déclenchement, propagation, étalement), obtenus avec les outils numériques validés et dont les incertitudes et les performances sont connues.

C'est dans cet état d'esprit que les modèles numériques calés sur les événements de laves torrentielles du *Faucon* de 1996 et 2003 vont maintenant être utilisés pour tester des scénarii d'aléas 'réalistes' susceptibles de se réaliser dans le futur. Ces scénarii (§ 7.1., Fig. 8.1) s'appuient sur les observations pratiquées sur les événements torrentiels survenus sur le *Faucon* entre 1996 et 2003. L'utilisation en chaîne de ces codes numériques est adaptée pour l'étude des laves torrentielles, plusieurs scénarii sont testés, pour les trois phases de la lave (§ 7.1., Fig. 8.1).

Trois scénarii de déclenchement sont testés à partir de l'utilisation croisée des codes *SEEP/W et FLAC* (§ 8.1.) pour définir les conditions d'une diminution du facteur de sécurité et pour déterminer des volumes potentiellement mobilisables à partir de l'interprétation de la surface de rupture potentielle.

La modélisation de la propagation est réalisée selon trois scénarii (§ 8.2.). Le premier scénario est une tentative d'intégration de la contribution (en volumes) selon trois méthodes (avec le code *J-DFM 1-D*). Le deuxième scénario concerne l'étude de l'influence des seuils torrentiels sur l'écoulement, en termes de hauteur et de vitesse d'écoulement (avec le code *Cemagref 1-D*) Le troisième et dernier scénario cherche à déterminer le volume minimal de matériau pour qu'une lave atteigne le cône, puis provoque des débordements (avec les codes *Bing* et *Cemagref 1-D*).

Enfin, l'étalement est modélisé (§ 8.3.) avec le code *Cemagref 2-D* pour évaluer (1) les volumes minimaux de laves pour provoquer un étalement et (2) la distribution des dépôts sur le cône de déjection pour différents volumes de laves.

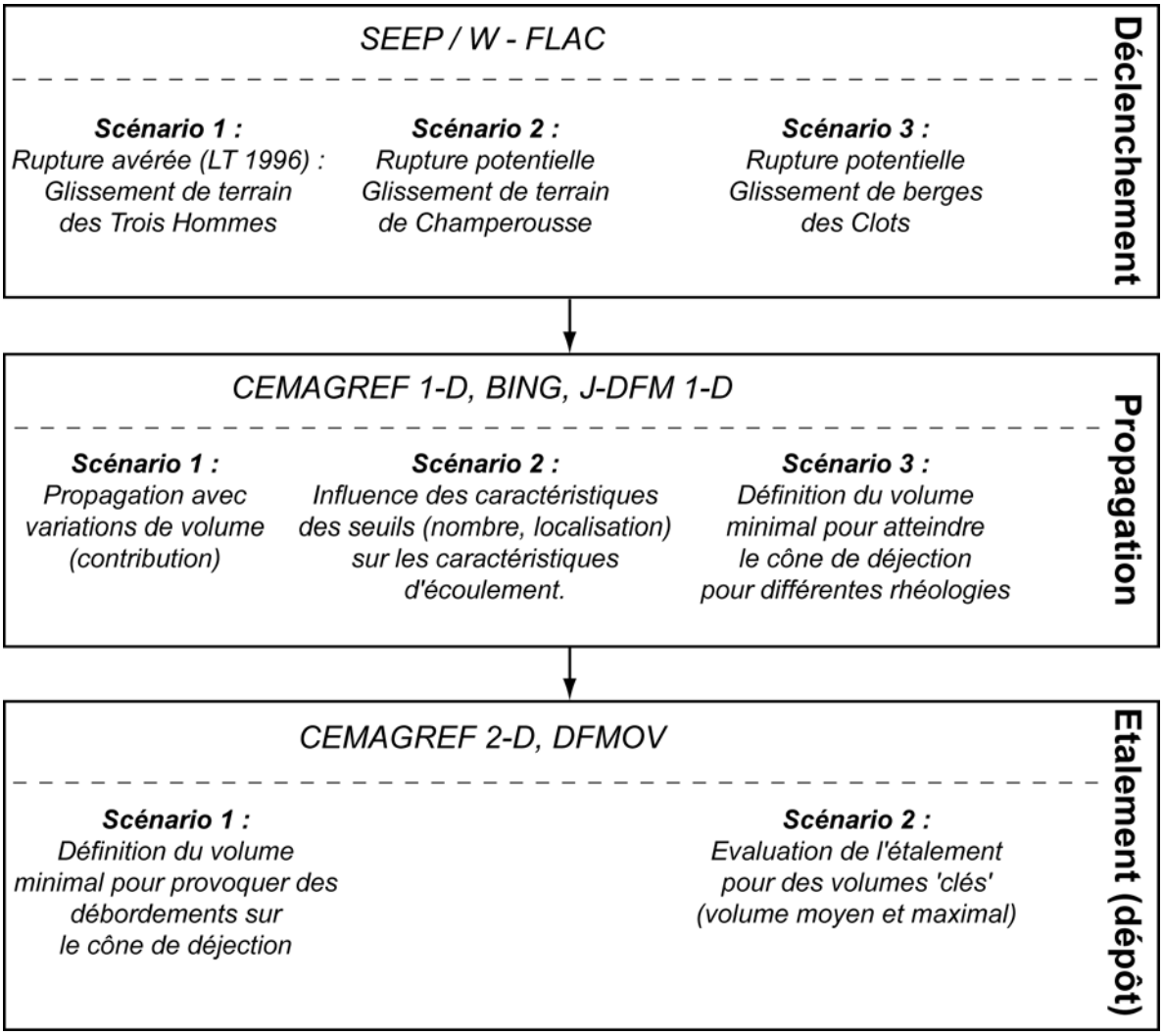


Figure 8.1 : *Scénarios de modélisation pour les trois phases des laves torrentielles.*

8.1. Scénarios de déclenchement

Sur la base des observations de terrain, trois zones de déclenchement ont été analysées (§ 7.1.), une zone de déclenchement qui déjà fonctionné (*Les Trois Hommes*) et deux glissements (*Champerousse* et *Les Clots*) qui peuvent déclencher ou alimenter une lave torrentielle, soit par une déstabilisation de tout ou partie du massif, soit en formant un embâcle qui en cédant peut déclencher une lave. Pour chacun des sites, une ou deux configurations ont été testées :

- **1ère configuration** : en condition de pressions interstitielles long-terme où un niveau de nappe phréatique est simulé avec *SEEP/W* en utilisant comme entrée les pluies du poste de *Barcelonnette* sur la période 1980 à 2005 ; Ce niveau de nappe phréatique correspondrait à un équilibre des conditions hydrogéologiques pour les trois versants pour les 25 dernières années ;
- **2ème configuration** : en condition d'apports en eau supplémentaires où, à partir des conditions hydrogéologiques long-terme, des entrées d'eau localisées sont simulées (fuite d'un canal d'irrigation ou d'un réseau de drainage fuyard).

8.1.1. Déclenchement par glissement de terrain (Trois Hommes)

Le premier cas analysé correspond à la zone de déclenchement supposée de la lave torrentielle du 19 août 1996 (§ 6.1) : le glissement de terrain des *Trois Hommes*.

L'état initial des contraintes, en conditions sèches, a été calculé (§ 7.2.). Même si le versant est stable, le code de calcul *FLAC* évalue la géométrie d'une rupture potentielle. Nous ne parlerons des déplacements que dans le cas où le facteur de sécurité F est inférieur à l'unité, dans le cas contraire, nous évoquerons la forme de la rupture potentielle.

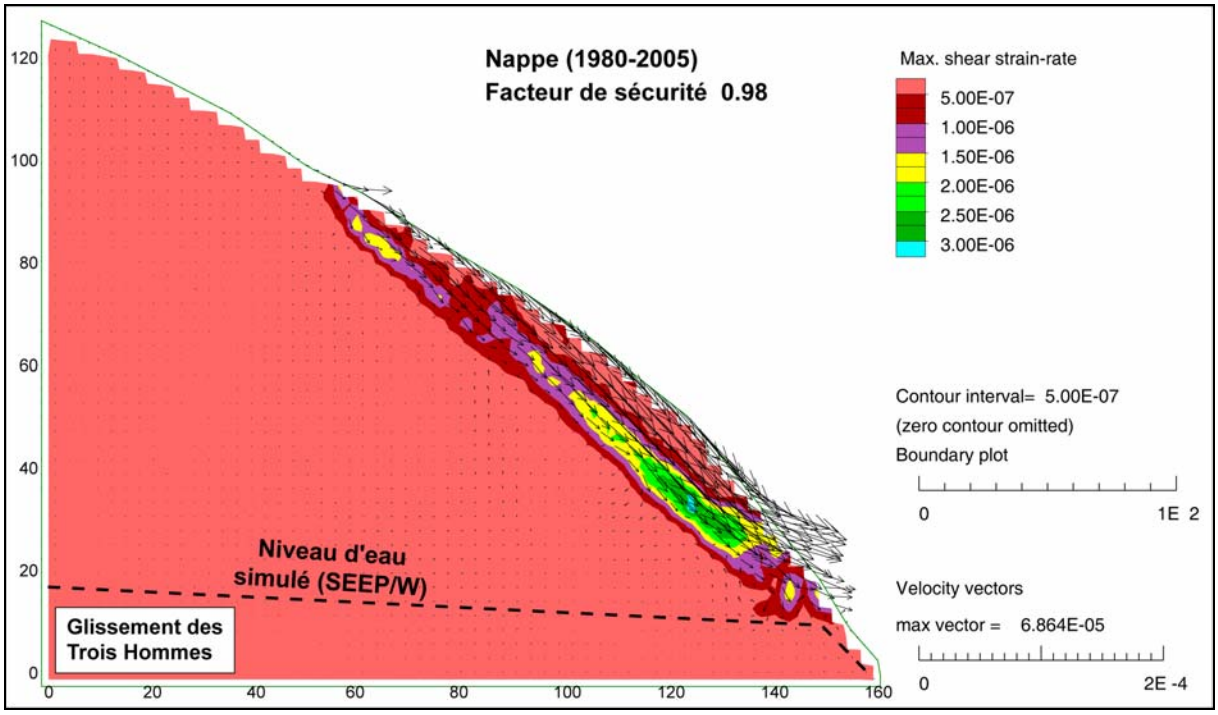


Figure 8.2 *: Etude numérique couplée (SEEP/W et FLAC) de stabilité du glissement de terrain de Trois Hommes avec une nappe liée aux précipitations 1980-2005.*

Le niveau de nappe simulé par *SEEP/W* est relativement conforme aux observations de terrain (§ 4.2.1.5.), en effet des suintements et des traces d'un écoulement intermittent ont été observés dans la partie inférieure des versants, là où la nappe simulée est sub-affleurante. Ces traces étaient localisées légèrement plus en altitude que le niveau simulé (d'une vingtaine de mètres environ), néanmoins la correspondance est relativement satisfaisante en considérant toutes les incertitudes.

L'analyse numérique en condition sèche a montré que ce versant des *Trois Hommes* est en **équilibre très limite** (F = 1.17, § 7.2.). En appliquant un niveau de nappe 'simulé' par *SEEP/W*, le calcul de stabilité indique une aggravation logique des conditions de stabilité, le facteur de sécurité F est inférieur à l'unité (0.98). Comme pour la configuration sèche, la surface de rupture reste localisée grossièrement au contact entre les marnes saines et les marnes dégradées. La forme de la surface de rupture est plane et sa profondeur varie entre 10 et 25 m environ (Fig. 8.2). Les observations de terrain semblaient indiquer que la rupture était moins profonde, de l'ordre d'une dizaine de mètres au maximum (§ 4.1.2.5.). Les déplacements les plus importants (de 0.02 à 0.05 m) se localisent dans la partie aval du profil (Fig. 8.2b).

En considérant une bande de cisaillement localisée au contact entre les marnes saines et les marnes dégradées, le volume potentiellement libérable est compris entre 30 000 et 40 000 m^3. Cette valeur est supérieure aux 15 000 m^3 libérés par ce glissement en 1996 (§ 6.1.1.), mais rappelons que la surface de rupture potentielle déterminée par *FLAC* est plus profonde que la surface de rupture observée.

8.1.2. Déclenchement par glissement de terrain (Champerousse)

Le deuxième site analysé est le glissement de terrain de *Champerousse*.(§ 4.3). Deux configurations ont été testées.

- **Configuration 1** : le niveau de la nappe simulé par le logiciel *SEEP/W* est profond dans les parties hautes et médianes du profil (la profondeur varie entre -130 m et -30 m), et très proche de la surface topographique en partie basse (-10 m environ). Les niveaux en partie haute et médiane sont conformes aux relevés piézométriques sur le glissement de *Champerousse* (pas d'eau enregistrée pendant deux ans). Néanmoins, avec l'apparition de cette nappe, le facteur de sécurité F baisse, mais légèrement (1.08). Il est situé juste au dessus de l'état d'équilibre (F=1). Une surface de rupture potentielle apparaît sur l'ensemble du profil (Fig. 8.3a), elle est de forme curviligne et sa profondeur varie entre 5 et 35 m ;

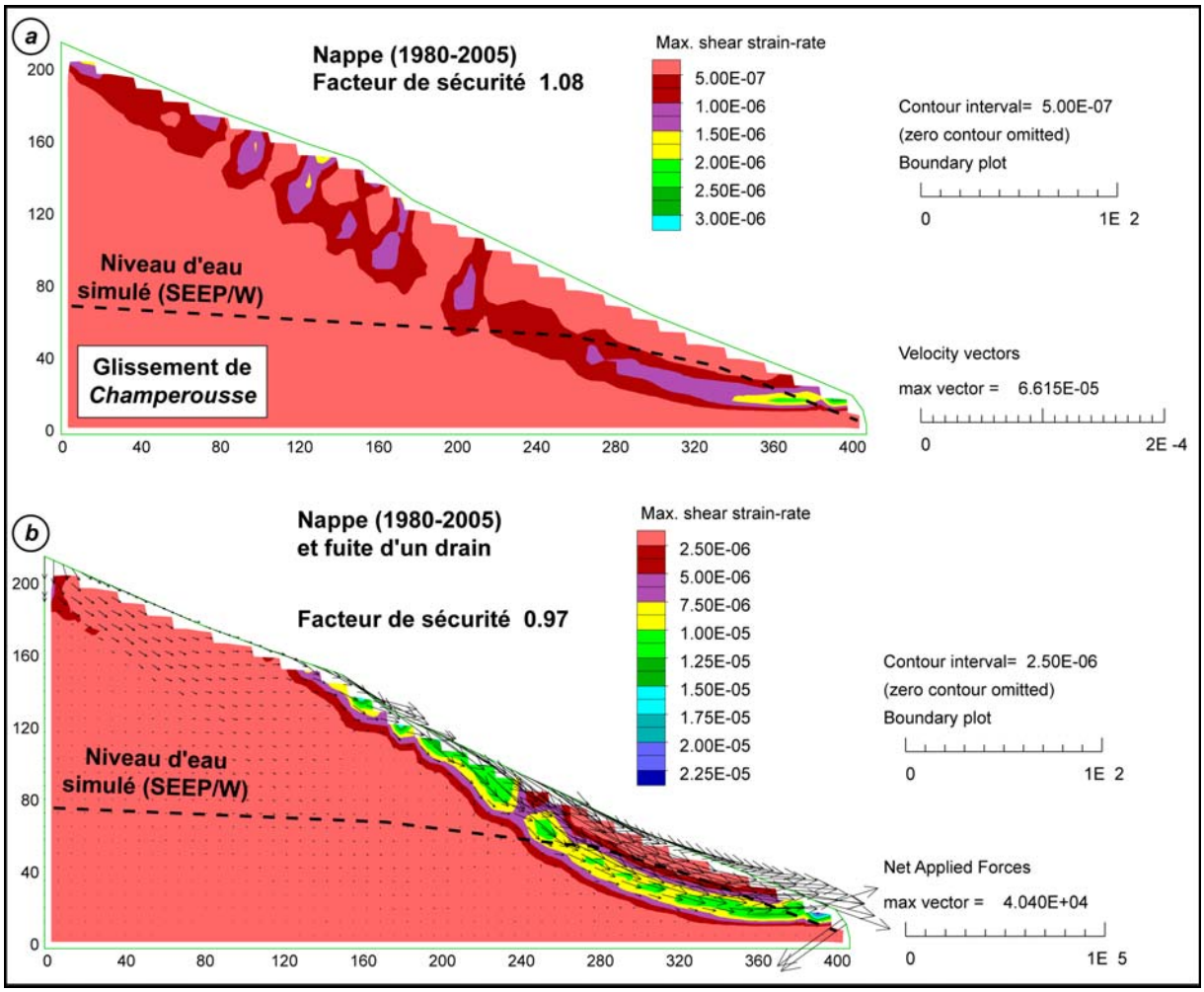


***Figure 8.3** : Etude numérique couplée (SEEP/W et FLAC) de stabilité du glissement de terrain de Champerousse avec (a) une nappe liée aux précipitations 1980-2005, et (b) avec nappe et fuite sur un réseau de drainage.*

▪ **Configuration 2** : les observations de terrain ont mises en évidence la fuite d'un drain qui longe le chemin du haut, il relie le torrent de *Faucon* à la citerne DFCI (§ 4.3., Fig. 4.45). Pour cette simulation, on considère que le drain fuit pendant un an à un débit de 2 litres par heures soit un volume total de 18 m^3 environ qui s'infiltre. Le niveau de la nappe est plus haut d'une dizaine de mètres environ par rapport à la configuration 1. La fuite localisée du drain aggrave considérablement les conditions de stabilité. Les déformations et l'extension des zones en déplacement prennent de l'ampleur, aggravant la situation de l'apparition d'une nappe (Configuration 1). Le facteur de sécurité chute en dessous de l'unité (0.97). La surface de rupture potentielle gagne en profondeur du haut vers le bas du profil ; en partie haute, les déplacements sont concentrés dans la formation de pente sur flyschs, en partie basse, la zone de rupture s'élargit aux marnes dégradées (Fig. 8.3b). Les déplacements maximaux (0.05 à 0.08 m) sont localisés en amont immédiat de la conduite, et dans la partie inférieure du profil. Ces déplacements centimétriques sont dans une gamme analogue aux déplacements déduit des mesures de nivellement (§ 4.3.).

La profondeur de la surface de rupture varierait entre 5 et 25 m environ selon une forme curviligne. Le volume potentiellement mobilisable serait donc évalué entre 75 000 et 100 000 m^3 environ.

8.1.3. Déclenchement par rupture de berges (Les Clots)

Le dernier cas analysé est le glissement des *Clots*. Ce glissement affecte les versants et les berges, localisés en rive droite du torrent de *Faucon* (§ 4.3.). Les configurations testées sont les mêmes que pour le glissement de *Champerousse*.

▪ **Configuration 1** : la position de la nappe simulée varie entre -50 m (partie haute) et -5 m (partie basse). La rupture de pente du niveau de la nappe est localisée au niveau de l'escarpement. Comme dans le cas du glissement de *Champerousse*, la profondeur de la nappe est conforme aux relevés piézométriques (pas d'eau enregistrée pendant deux ans), elle reste localisée dans les marnes noires en place sur la quasi totalité du profil. Malgré la formation d'une nappe, le facteur de sécurité F reste quasiment inchangé (1.41), le versant reste 'hautement stable'. Par rapport à la configuration 'sèche' (§ 7.2.), la forme de la surface de rupture potentielle reste similaire, ceci est vraisemblablement à mettre en relation avec la localisation de la nappe, qui reste cantonnée dans les marnes saines. Néanmoins cette surface s'étend un peu plus vers l'amont (Fig. 8.4a). ;

▪ **Configuration 2** : plusieurs drains parcourent la zone instable (§ 4.3.), des pertes ont été détectées à plusieurs reprises et à plusieurs endroits. Dans ce cas, une arrivée d'eau de l'ordre de 1 litre par minute est simulée pendant une période de 1 an (comme dans le cas de *Champerousse* on ne change rien sur la position de la nappe), le volume total infiltré est de l'ordre de 500 m^3. La position de la nappe augmente sensiblement par rapport à la 1ère configuration, elle varie entre -35 m en partie haute et -2 m en partie basse. Comme dans le cas du glissement de *Champerousse*, les arrivées d'eau provenant de la fuite aggravent les conditions de stabilité, mais le versant reste stable (F=1.14). Néanmoins, cette forte diminution du facteur de sécurité F (par rapport à la configuration 2 où le facteur de sécurité est resté quasiment inchangé) est instructive, elle suggère que ces fuite ont une influence beaucoup plus forte que les pluies. La forme de la rupture potentielle évolue elle aussi : une première zone, d'ampleur modérée, se localise dans la partie haute du profil ; une deuxième zone, plus étendue, affecte les parties médianes et basses du profil (Fig. 8.4b).

L'analyse numérique de stabilité du glissement des *Clots* démontre la stabilité générale de ce secteur, malgré l'adjonction d'une nappe et de pertes. Néanmoins, dans ce dernier cas, la

forte diminution du facteur de sécurité F (de 1.41 à 1.14) doit nous amener à rester prudent. Le volume potentiellement libérable, serait compris entre 20 000 et 30 000 m^3.

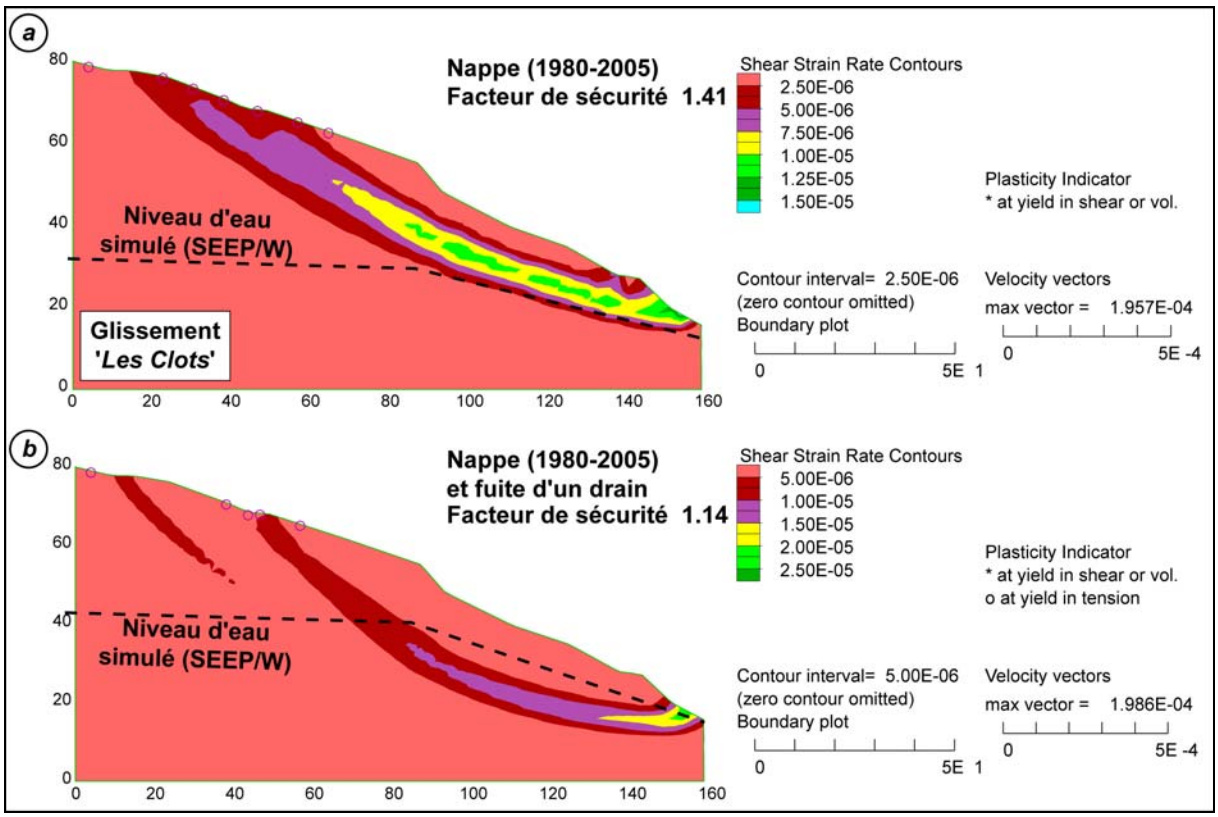


Figure 8.4 *: Etude numérique couplée (SEEP/W et FLAC) de la stabilité du glissement de terrain des Clots. (a) avec une nappe liée aux précipitations 1980-2005, et (b) avec nappe et pertes des réseaux de drainage.*

8.1.4. Synthèse

L'analyse numérique de la stabilité de trois sites susceptibles de déclencher ou d'alimenter une lave torrentielle dans le bassin versant du torrent de *Faucon* a fourni des informations intéressantes (Fig. 8.5, Tab. 8.2).

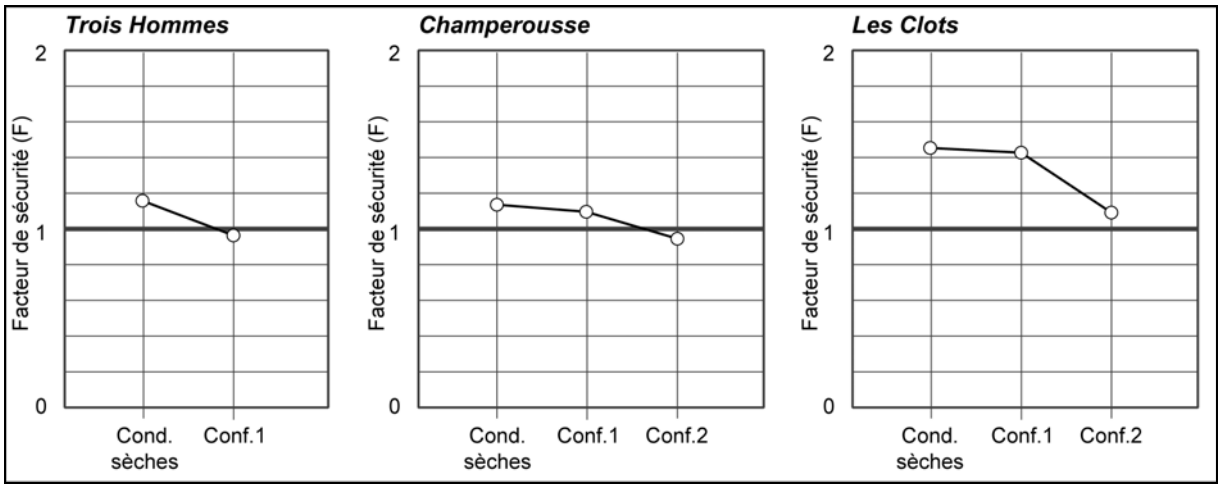


Figure 8.5 *: Variation du facteur de sécurité pour les trois sites et pour les différentes configurations.*

Tableau 8.2 *: Résultats de l'analyse numérique de la stabilité pour les trois secteurs étudiés.*

	Pente moyenne (°)	F (config. 1)	F (config. 2)	F (config. 3)	Volume potentiellement Libérable (10^3 m^3)
Les *Trois Hommes*	39°	1.17	0.98	-	30 à 40
Champerousse (RG)	23°	1.14	1.08	0.97	75 à 100
Les Clots	24°	1.42	1.41	1.14	20 à 30

Pour le glissement des *Trois Hommes*, l'analyse de stabilité a révélé la grande instabilité de ce secteur, même en condition quasi sèche. La forte pente de ce secteur (entre 35 et 40°) semble expliquer en partie sa forte susceptibilité à l'instabilité. En effet la pente est légèrement supérieure à l'angle de frottement interne des matériaux (§ 5.4., §7.2.). De plus, sa localisation, à proximité immédiate du torrent et dans la partie terminale d'un couloir d'avalanches, sont autant de facteurs aggravants.

Pour le glissement des *Clots*, l'analyse établit que le secteur est globalement stable pour une surface de glissement curviligne assez profonde. Néanmoins, le facteur de sécurité F diminue fortement avec l'adjonction de venues d'eau liées à une perte du canal d'irrigation et du réseau de drainage ancien situé à l'amont immédiat de la zone instable. Il faudrait donc entreprendre les travaux de drainage et de réparation du canal pour éviter qu'un jour une déstabilisation du versant puisse être déplorée. Concernant l'instabilité superficielle de la partie basse du profil, les quelques tranchées de drainage réalisées semblent efficaces (pas d'évolutions importantes relevées ces dernières années) d'autant plus que l'érosion torrentielle par sapement est maintenant réduite du fait de la présence des nouveaux seuils construits en 2001 et en 2002 (§ 4.2.2.) qui ont favorisé la constitution d'une butée de pied par l'engraissement des plages de dépôt avec d'importants volumes de matériaux.

Cette butée de pied doit être également efficace pour le glissement de *Champerousse*, en améliorant sensiblement son facteur de sécurité. De plus, la surveillance durant trois années a montré que l'activité de ce glissement était réduite. Toutefois dans le cadre de ce travail, nous n'avons pas pu vérifier par le calcul l'influence de cette butée sur le gain de la valeur de F. Pour s'assurer définitivement de la stabilité de ce secteur, ces calculs seront réalisés prochainement pour donner un diagnostic définitif sur la stabilité de ce secteur.

8.2. Scénarios de propagation

Trois scénarios de propagation ont été testés avec les différents codes numériques :

- Propagation avec contribution (*J-DFM 1-D*) ;
- Influence des seuils torrentiels sur la propagation (*Cemagref 1-D*) ;
- Définition du volume minimal de matériau pour atteindre le cône de déjection et des points de débordements associés (*Bing*, *Cemagref 1-D*).

8.2.1. Propagation avec contribution

Dans le chapitre 6, il a été démontré que les laves torrentielles de 1996 et de 2003 sur le torrent de Faucon ont été caractérisées par une forte contribution pendant la propagation (§ 6.1.2.2.). Comme les codes numériques ne tiennent pas suffisamment compte ou pas du tout de la contribution pendant la propagation, le code *J-DFM 1-D* a été modifié pour tenir compte de cette contribution (Fig. 8.6). La contribution est prise en compte quand une hauteur critique est atteinte (0.50 m ; Rickenmann *et al.*, 2003)

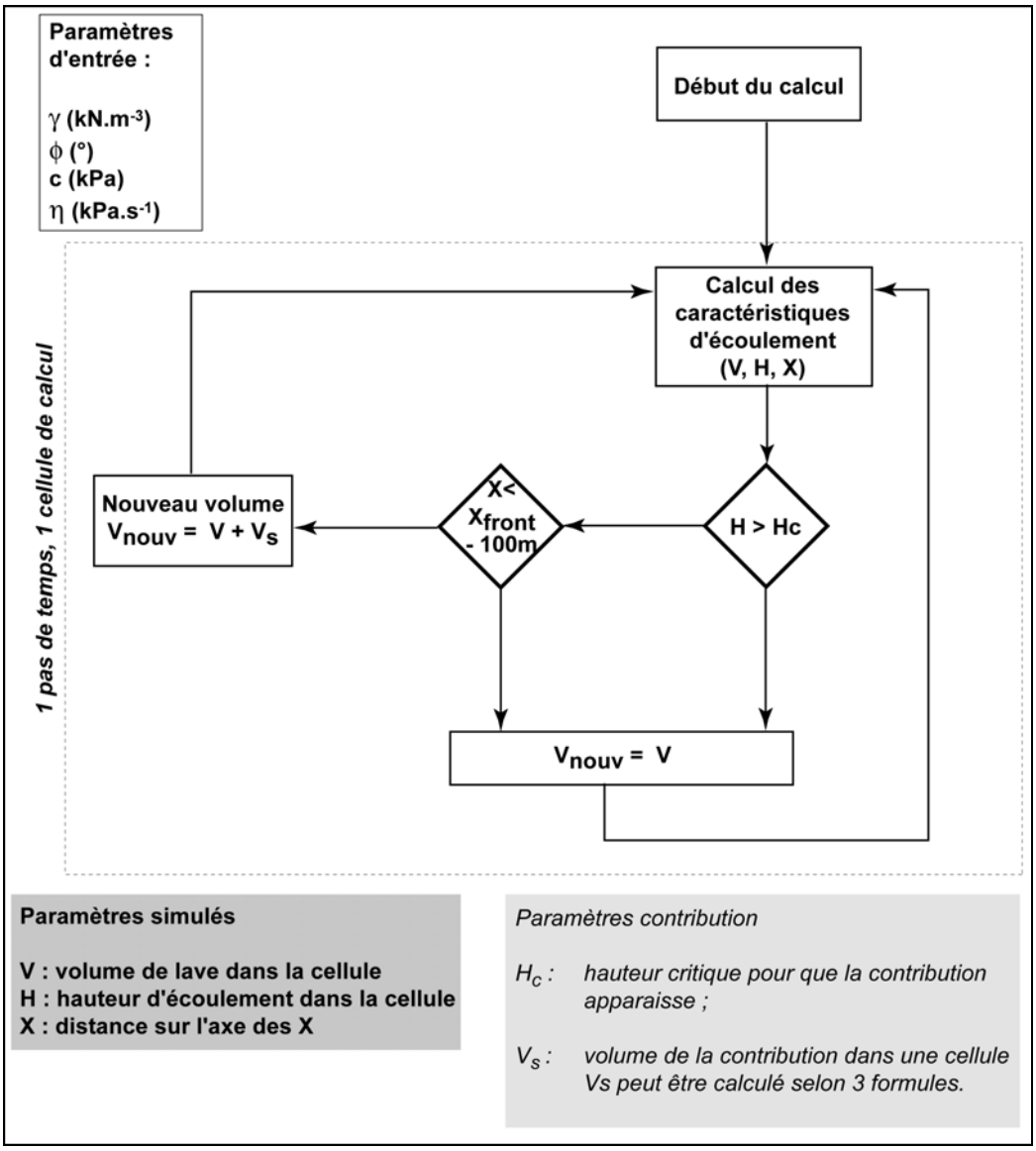


Figure 8.6 : *Schéma conceptuel d'intégration de la contribution dans le modèle J-DFM 1-D.*

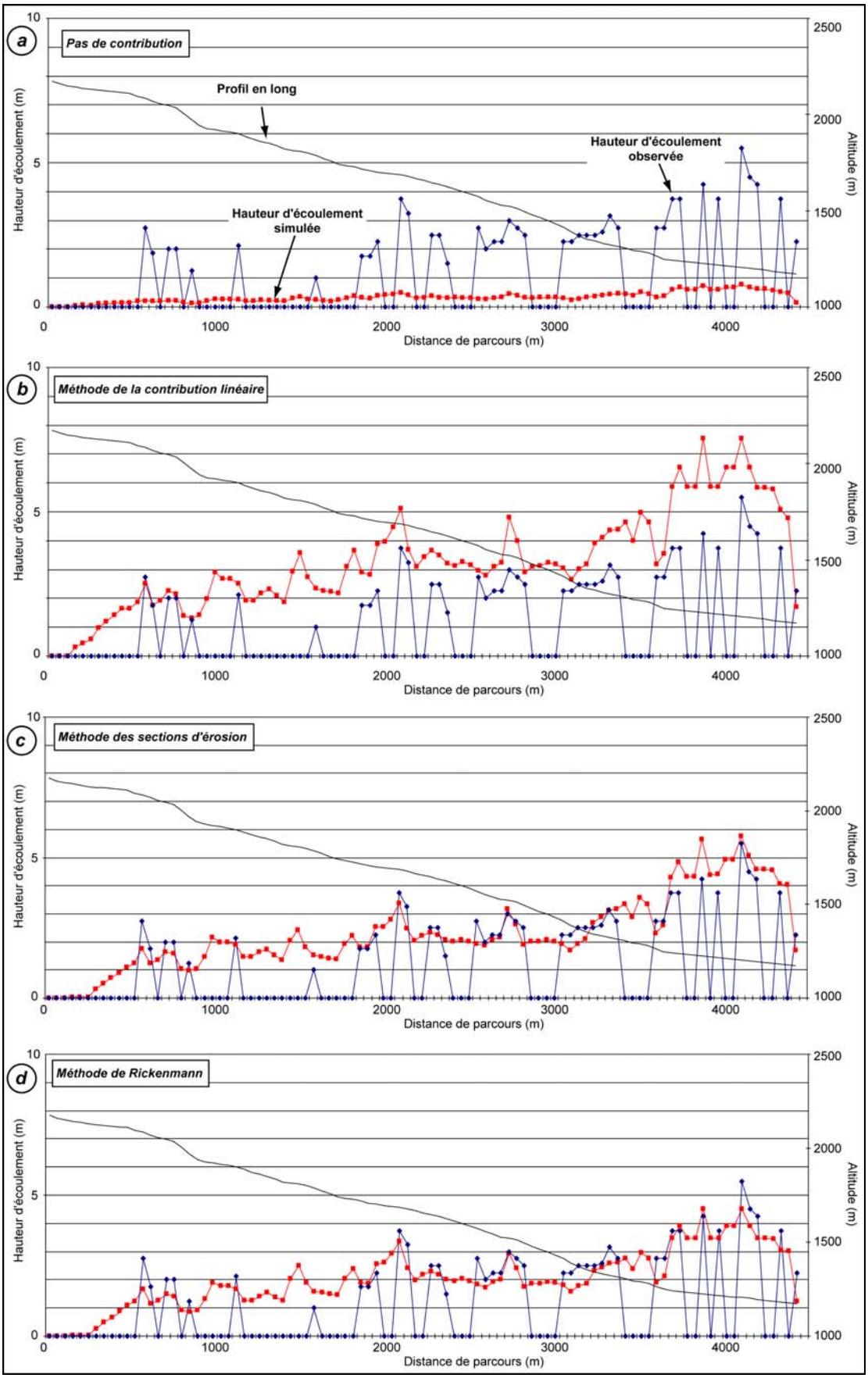


Figure 8.7 : *Hauteurs d'écoulement simulées avec le modèle J-DFM 1-D et observées. (a) pas de contribution, (b) méthode de la contribution linéaire, (c) méthode des sections d'érosion et (d) méthode de Rickenmann et al. (2003).*

Les simulations ont été réalisées avec le profil en long du torrent de Faucon (Chapitre 4) et les caractéristiques rhéologiques de la lave de 2003 (Chapitre 5). Trois méthodes pour estimer les volumes issus de la contribution ont été utilisées :

- la **contribution linéaire** consiste à appliquer une contribution (en $m^3.m^{-1}$), qui reste constante sur l'ensemble du parcours. Un taux de contribution linéaire de 15 $m^3.m^{-1}$ a été appliqué, il se situe dans la fourchette estimée pour la lave de 2003 (§ 6.1.2.3.) ;
- la méthode des **sections d'érosion** consiste à appliquer une contribution correspondant aux observations de terrain (Fig. 6.19). Les volumes de matériaux sont 'artificiellement' insérés dans le volume total dans les biefs où la contribution a été réellement observée ;
- la **méthode de Rickenmann** *et al.* (2003) calcule un taux de contribution en fonction du volume et de la densité de la lave et de la pente du chenal (Eq.41) :

$$V_{erosion} = V_{entrant} * (\gamma_{mat} / \gamma_{eau}) * (\sin \alpha)^{\beta} * a_0 \qquad (41)$$

où $V_{erosion}$ est le volume de matériau érodé incorporé à la lave dans le bief (m^3), $V_{entrant}$ est le volume de lave rentrant dans le bief (m^3), γ_{mat} est le poids volumique de la lave ($kN.m^{-3}$), γ_{eau} est le poids volumique de l'eau ($kN.m^{-3}$), α est la pente du chenal (°), β et a_0 des paramètres d'ajustement locaux.

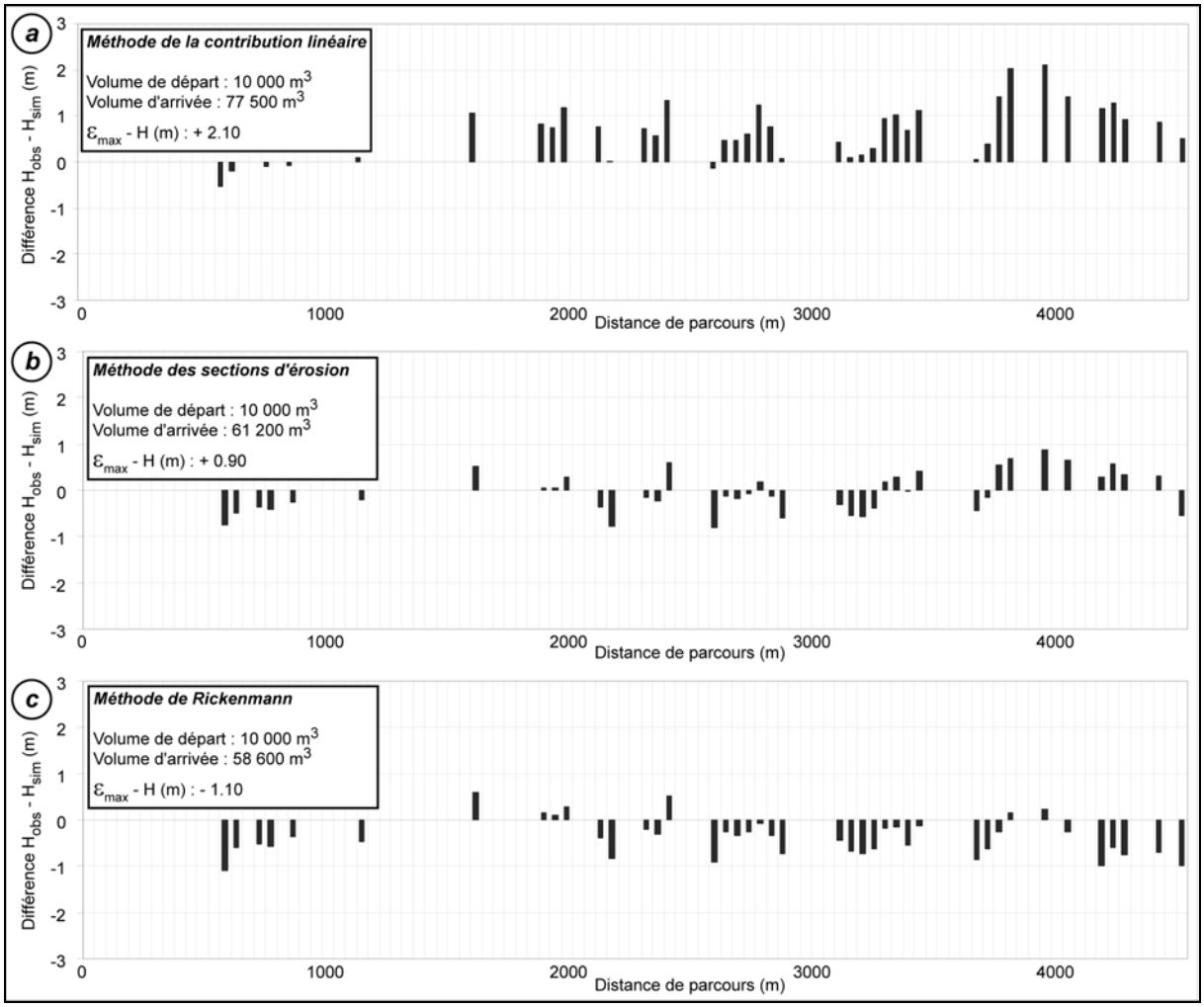


Figure 8.8 : *Comparaison des performances des trois méthodes d'intégration de la contribution avec le modèle J-DFM 1-D. (a) méthode de la contribution linéaire, (b) méthode des sections d'érosion et (c) méthode de Rickenmann.*

Les performances des trois méthodes ont été comparées en confrontant leurs résultats aux observations de la lave de 2003 en terme de hauteur d'écoulement (Fig. 8.7 et 8.8). Le volume initial libéré est de 10 000 m^3, volume qui correspond à la fourchette basse de l'estimation du volume de la zone de déclenchement de la lave torrentielle de 2003 (§ 6.1.2.1).

- La méthode de **la contribution linéaire** surestime les hauteurs d'écoulement. L'erreur moyenne est de 0.72 m, l'erreur maximale atteint un peu plus de 2 m (en surestimation) dans la partie centrale du profil et sur le cône de déjection (Fig. 8.8a).

- La méthode **des sections d'érosion** donne des résultats intéressants (erreur moyenne de 0,36 m) : elle sous-estime légèrement (erreur moyenne de 0,44 m, pour une erreur maximale de -0.85 m) la hauteur dans la partie supérieure et centrale du profil ; elle surestime légèrement les hauteurs dans la partie basse du profil (erreur moyenne de 0,27 m, pour une erreur maximale de +0.80 m) (Fig. 8.8b). Le secteur où les hauteurs sont surestimées débute grossièrement à l'apex ; le changement de pente du profil dans ce secteur suggère peut être une mauvaise gestion de la transition chenal-cône par le code numérique.

- La méthode de calcul de la contribution avec **la formule de Rickenmann *et al.*** (2003), comme la méthode des sections d'érosion, sous-estime la hauteur d'écoulement (erreur moyenne de 0,46 m), mais cette sous-estimation est répartie régulièrement sur l'ensemble du profil (Fig. 8.8c). Seuls quelques secteurs surestiment légèrement la hauteur d'écoulement.

Dans l'ensemble, les résultats des simulations numériques sont encourageants. Sauf pour la méthode de la contribution linéaire, les hauteurs d'écoulement simulées sont proches des hauteurs observées. Néanmoins, on observe que pour les trois méthodes, un changement (de la surestimation à la sous-estimation ou l'inverse) s'opère au niveau de l'apex. Ce changement est surtout perceptible pour les méthodes de la contribution linéaire et de la méthode des sections d'érosion. La méthode utilisant la formule de Rickenmann *et al.* (2003) peut être certainement améliorée, en progressant sur l'ajustement des paramètres locaux sur des événements de laves torrentielles bien renseignés.

8.2.2. Influence des seuils torrentiels sur la propagation

Parmi les outils disponibles pour lutter contre les laves torrentielles, la mise en place d'un réseau de seuils torrentiels est très souvent adoptée. Ces seuils torrentiels vont agir sur la dynamique de l'écoulement, en réduisant la vitesse, le débit et les hauteurs d'écoulement. Si la taille, la forme ou bien encore la structure des seuils ont été étudiés depuis des décennies, aucune étude numérique n'avait été engagée pour définir leur nombre nécessaire et leur répartition le long du chenal torrentiel.

Dans le chapitre 6, il a été évoqué que lors de la lave de 2003, les secteurs armés de seuils détruits ou en mauvais état ont été caractérisés par une forte contribution. Cette observation renforce l'intérêt d'étudier le rôle des seuils à partir d'une modélisation numérique. Ainsi, ce scénario tente de montrer l'intérêt des modèles numériques d'écoulement de laves torrentielles pour évaluer l'impact du nombre et de la localisation des seuils sur les caractéristiques d'écoulement d'une lave torrentielle.

Ce scénario a été réalisé avec le code *Cemagref 1-D*, sur la base d'une étude de sensibilité des caractéristiques du profil en long sur l'écoulement en terme de vitesse et de hauteur d'écoulement (Fig. 8.9).

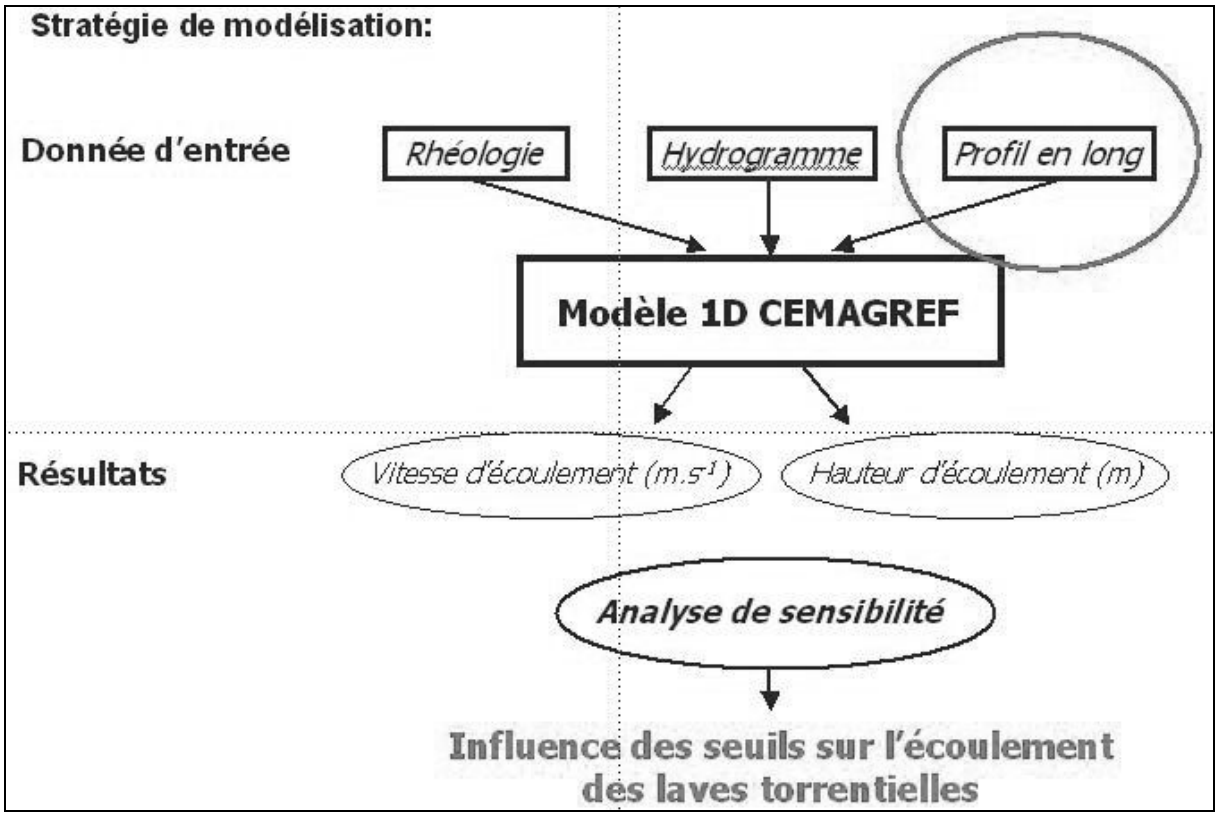
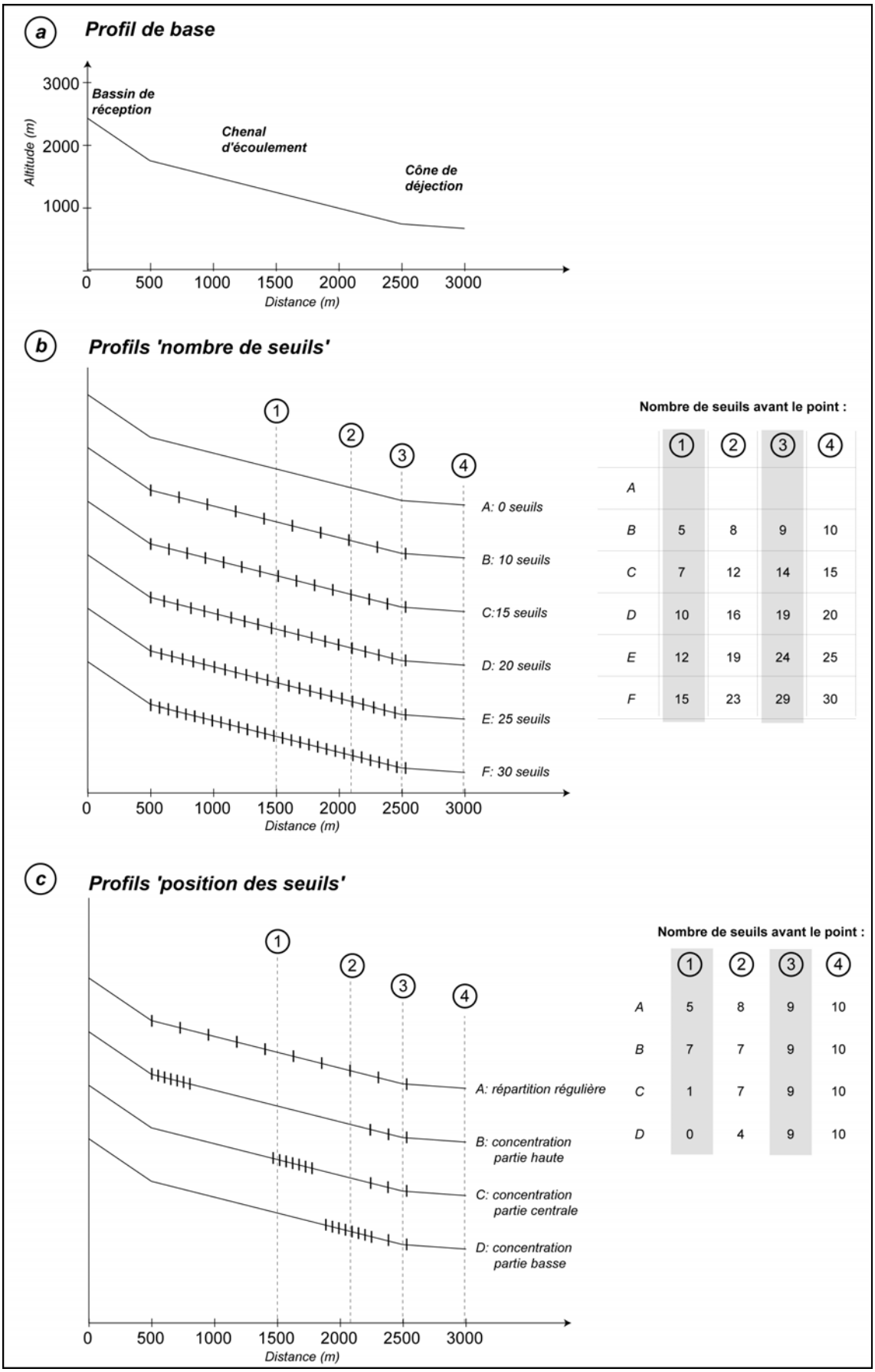


Figure 8.9 : *Stratégie de l'étude de sensibilité avec le code Cemagref 1-D pour quantifier le nombre et la répartition des seuils sur les caractéristiques d'écoulement.*

Pour évaluer l'influence du nombre de seuils et de leur répartition sur les caractéristiques d'écoulement, plusieurs profils topographiques ont été étudiés. Un profil de base (sans seuils) a été dessiné (Fig. 8.10a). Les caractéristiques du profil (longueur de chaque unité morphologique) reflètent les caractéristiques des torrents à lave du bassin de *Barcelonnette*. Deux rhéologies ont été testées : une rhéologie visqueuse et une rhéologie plus fluide.



	1	2	3	4
A				
B	5	8	9	10
C	7	12	14	15
D	10	16	19	20
E	12	19	24	25
F	15	23	29	30

	1	2	3	4
A	5	8	9	10
B	7	7	9	10
C	1	7	9	10
D	0	4	9	10

Figure 8.10 : *Profils utilisés dans le code Cemagref 1-D pour l'étude de sensibilité : profil de base (a), profils pour l'étude du nombre de seuils (b) et profils pour l'étude de la répartition des seuils (c).*

8.2.2.1. Influence du nombre de seuils torrentiels sur les caractéristiques d'écoulement

Cinq cas ont été testés, avec 10, 15, 20, 25 et 30 seuils torrentiels (Fig. 8.10b). La hauteur et la vitesse d'écoulement ont été mesurés sur quatre points de contrôle durant la totalité de l'événement. La comparaison de l'évolution temporelle des caractéristiques d'écoulement au point de contrôle n°3 révèle que :

- Pour **la hauteur d'écoulement**, on observe pour les deux rhéologies, une diminution des hauteurs avec l'augmentation du nombre de seuils. Entre le cas '0 seuil' et le cas '30 seuils', cette diminution de la hauteur est de l'ordre de 25% pour la rhéologie 'visqueuse' (Fig. 8.11a) et de 20% pour la rhéologie 'fluide' (Fig. 8.11b). La diminution est très forte entre le cas '0 seuil' et le cas '10 seuils' (18-20%) et plus modérée entre les cas '10 seuils' et '15 seuils' (7-10%) ; l'ampleur de la diminution de la hauteur d'écoulement faiblit avec l'augmentation du nombre de seuils (passage de 15 à 20, 20 à 25 seuils, etc.) ;

- Pour **la vitesse d'écoulement**, on observe pour les deux rhéologies (Fig. 8.11c et d) une diminution significative des vitesses avec l'augmentation du nombre de seuils. Entre le cas 'seuil 0' et le cas '30 seuils', cette diminution est de l'ordre de 50%. Comme pour les hauteurs d'écoulement, l'ampleur de cette diminution est très forte lorsque l'on passe du cas '0 seuils' au cas '10 seuils', elle va s'atténuer avec l'augmentation du nombre de seuils.

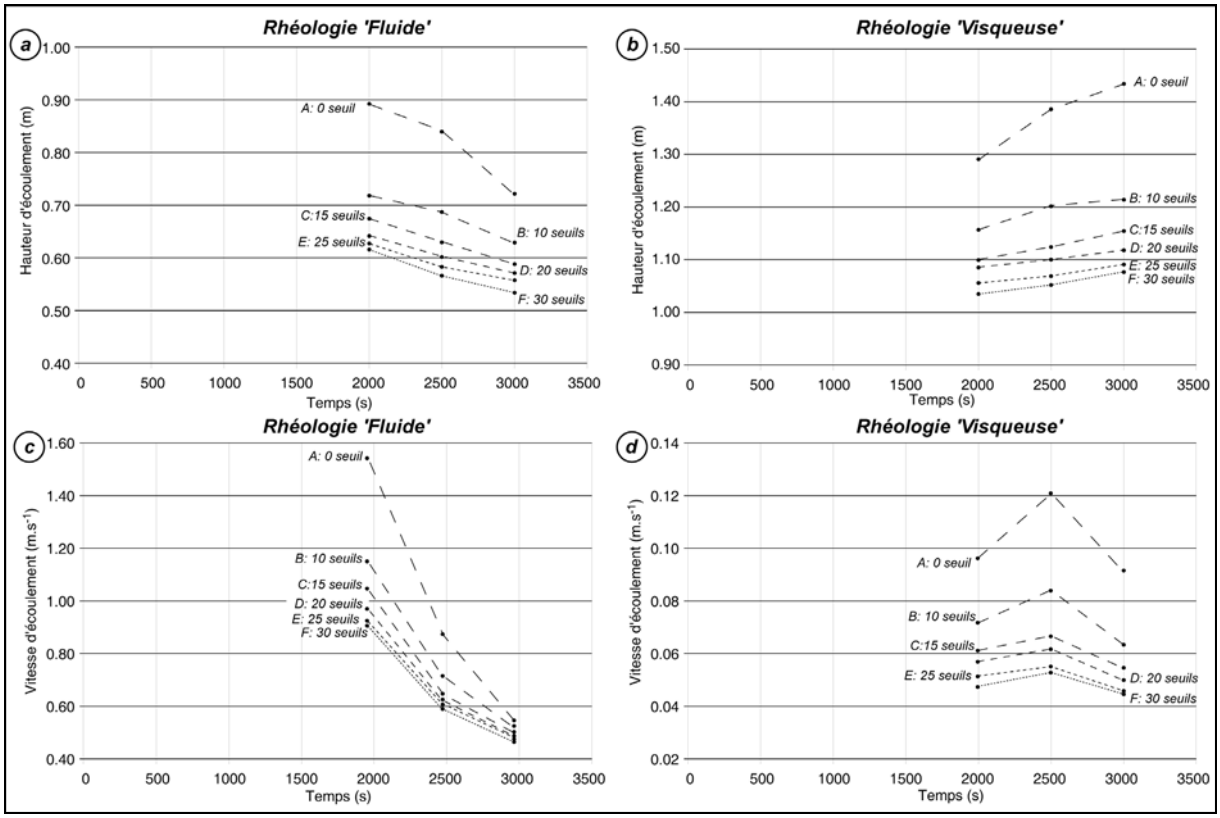


Figure 8.11 : *Influence du nombre de seuils sur les caractéristiques d'écoulement d'une lave.*

a : influence sur la hauteur d'écoulement pour une rhéologie fluide ;
b : influence sur la hauteur d'écoulement pour une rhéologie visqueuse ;
c : influence sur la vitesse d'écoulement pour une rhéologie fluide ;
d : influence sur la vitesse d'écoulement pour une rhéologie visqueuse ;

8.2.2.2. Influence de la répartition spatiale des seuils torrentiels sur les caractéristiques d'écoulement

L'étude de la répartition spatiale a été réalisée avec dix seuils torrentiels ; quatre cas de répartition spatiale ont été testés (Fig. 8.10c) :

- (A) répartition régulière des seuils sur l'ensemble du profil ;
- (B) répartition préférentielle en partie haute du profil ;
- (C) répartition préférentielle dans la partie centrale du profil ;
- (D) répartition préférentielle dans la partie basse du profil.

La comparaison de l'évolution temporelle des caractéristiques d'écoulement au point de contrôle n°3 révèle que :

▪ Pour **la hauteur d'écoulement**, on observe pour les deux rhéologies, que les hauteurs les plus faibles correspondent à la répartition dans la partie haute du profil. Entre le cas D (répartition dans la partie basse) et le cas B (répartition dans la partie haute), les différences son remarquables : (1) pour la rhéologie 'fluide', les hauteurs simulées pour le cas D sont entre 30 et 50% supérieures aux hauteurs du cas B (Fig. 8.12a), (2) pour la rhéologie visqueuse, cette diminution est plus modérée (entre 30 et 20%, Fig. 8.12b) ;

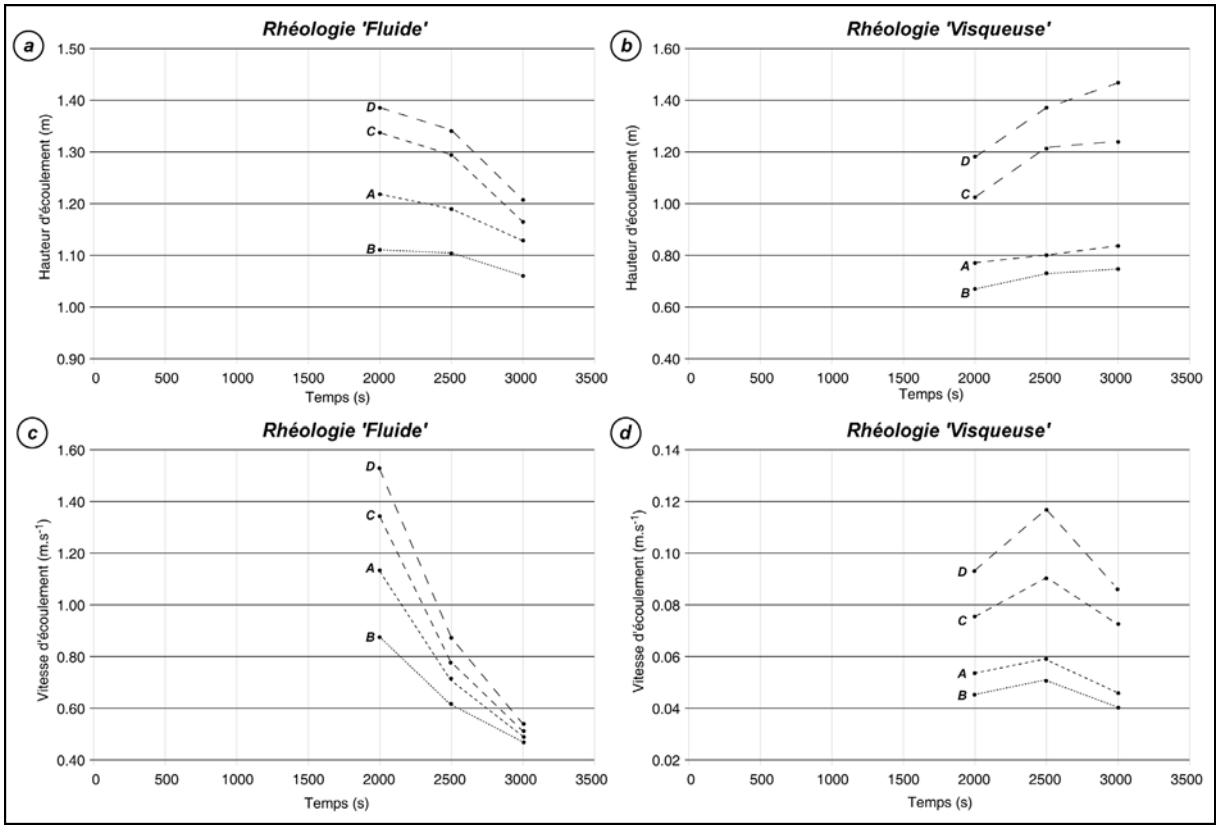


Figure 8.12 : *Influence de la répartition spatiale des seuils sur les caractéristiques d'écoulement d'une lave.*

a : influence sur la hauteur d'écoulement pour une rhéologie fluide ;
b : influence sur la hauteur d'écoulement pour une rhéologie visqueuse ;
c : influence sur la vitesse d'écoulement pour une rhéologie fluide ;
d : influence sur la vitesse d'écoulement pour une rhéologie visqueuse ;

- Pour **la vitesse d'écoulement**, comme pour les hauteurs, on observe pour les deux rhéologies, que les vitesses les plus faibles correspondent à la répartition dans la partie haute du profil. Entre le cas D (répartition dans la partie basse) et le cas B (répartition dans la partie haute), les différences son remarquables. Pour les deux rhéologies (Fig. 8.12c et d), les vitesses simulées pour le cas D sont 40% supérieures aux hauteurs du cas B.

8.2.2.3. Conclusion

Les résultats de l'analyse de sensibilité menée avec le code *Cemagref 1-D* sur les variations topographiques du profil en long d'un torrent liées au nombre et à la répartition spatiale des seuils torrentiels montrent que :

- logiquement, le nombre de seuils va faire diminuer sensiblement les caractéristiques d'écoulement (de l'ordre de 20% pour la hauteur d'écoulement) ;
- la position des seuils, encore plus que le nombre, agit fortement sur les caractéristiques d'écoulement (entre 30 et 50% pour la hauteur d'écoulement). Les caractéristiques les plus faibles correspondent à la configuration où les seuils sont localisés préférentiellement en amont du profil.

A la vue de ces résultats, la répartition spatiale des seuils semble être plus influente que le nombre de seuils. Ainsi, un nombre restreint de seuils, mais placés au plus près des zones potentielles de déclenchement (dans les parties hautes des bassins versants), réduirait très efficacement les caractéristiques d'écoulement.

8.2.3. Définition des volumes minimaux de matériaux libérés lors du déclenchement pour atteindre le cône de déjection et identification des points de débordement

Les modèles *Cemagref 1-D* et *Bing* ont été utilisés pour définir :

- un volume de lave torrentielle pour atteindre le cône de déjection pour différentes rhéologies et pour différentes concentrations volumiques solides ;
- les points de débordement potentiels sur le cône de déjection en comparant la hauteur d'écoulement simulée pour différentes configurations à la hauteur des berges torrentielles.

Les points de débordement n'ont été recherchés qu'à l'aval de l'apex, en effet le chenal très encaissé du torrent de Faucon ne permet aucun débordement avant ce point. Par contre, à l'apex, la configuration du chenal peut autoriser le débordement car le pont peut créer un obstacle à l'écoulement, comme cela a été observé en août 2003 (§ 3.2.3.2.).

8.2.3.1. Définition des volumes minimaux de matériaux à libérer pour atteindre le cône de déjection

Des simulations ont été réalisées pour définir les volumes minimaux de matériaux à libérer pour atteindre l'apex et la confluence avec l'*Ubaye*. Les simulations ont été réalisées à partir du profil en long du torrent de *Faucon*, pour trois mélanges artificiels théoriques représentatifs des gammes granulométriques des écoulements observés sur le torrent de *Faucon* (Chapitre 5) : la rhéologie et le volume sont constants pendant la propagation. La figure 8.13 montre l'estimation des volumes à libérer par les zones sources pour les trois mélanges. L'incertitude sur l'estimation de la distance de parcours et sur la hauteur d'écoulement à l'apex pour les deux codes est estimée à 25% (Malet, 2003).

Pour qu'une lave atteigne l'apex, les volumes à libérer à l'amont varient entre 19 000 m^3 (mélange M4) et 28 000 m^3 (mélange M3) de mélange '*eau+sédiments*'. A titre de comparaison, les volumes à libérer sur le torrent du *Sauze*, définis par Malet (2003) varient entre 41 000 et 53 000 m^3. Cette différence de volume minimal s'explique, en partie, par les différences morphologiques observées sur les deux torrents (Malet *et al.*, 2005).

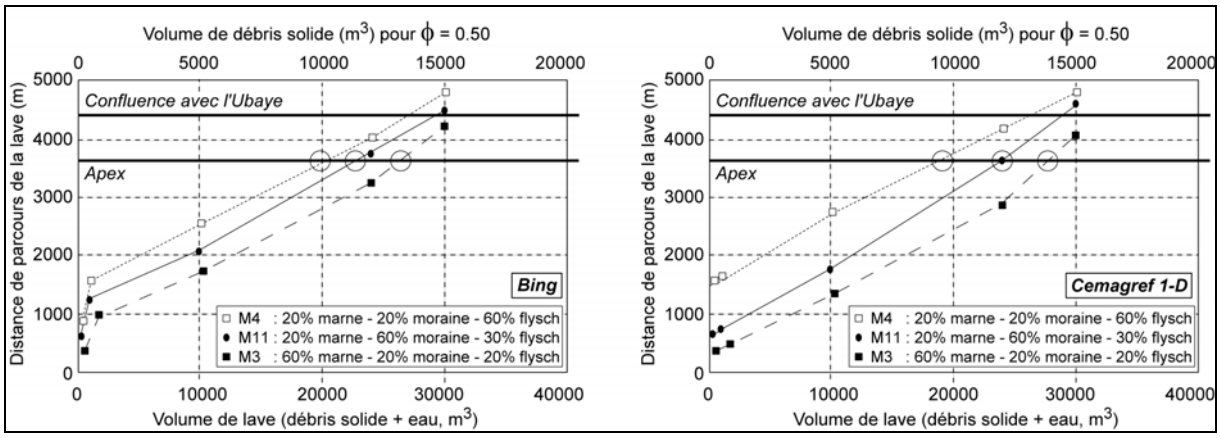


Figure 8.13 *: Estimation des volumes à libérer pour atteindre l'apex du torrent de Faucon pour trois mélanges artificiels.*

a : estimation avec le code Bing
b : estimation avec le code Cemagref 1-D

Ainsi, en prenant en compte l'incertitude associée aux deux codes, le volume de matériau solide à libérer est de 9 000 à 14 000 m^3 (sans contribution) pour les trois mélanges. Cette valeur se situe dans les ordres de grandeur des volumes identifiés dans les zones de déclenchement des événements de 1996 et de 2003 sur le torrent de *Faucon* (Chapitre 6). Par contre, ils sont bien inférieurs aux volumes potentiellement libérables déterminés par l'analyse de stabilité numérique pour les trois glissements (§ 8.1.4.), ceci suggère que la mobilisation de la totalité des matériaux de ces glissements (ce qui est peu probable) n'est pas nécessaire pour qu'une lave atteigne le cône, ils peuvent contribuer 'facilement' à l'écoulement, en se désagrégeant. Ceci est particulièrement vrai pour des glissements qui mobilisent des flyschs et des moraines (plus favorables à l'écoulement, Fig. 8.13). Il faut néanmoins rappeler que ces volumes sont suffisants pour atteindre le cône, mais pas forcément pour provoquer des débordements. Ceci sera vérifié dans l'analyse de l'étalement.

8.2.3.2. Identification des points de débordement

Pour identifier les points de débordement, il est nécessaire d'établir un profil en long du torrent précisant :

- le niveau du fond du lit sur le cône de déjection ;
- le niveau des deux berges ;
- la hauteur d'écoulement simulée pour une configuration donnée.

Les calculs ont été réalisés pour trois volumes de matériaux représentatifs des volumes observés sur le torrent de *Faucon* depuis 1996 et proches des volumes théoriques moyens et maximaux (Chapitre 6), avec les caractéristiques rhéologiques de la lave de 2003..

La comparaison entre les résultats (Fig. 8.14) des simulations (hauteurs d'écoulement), les hauteurs d'écoulement observées en 2003 et les hauteurs des berges en rive droite et en rive gauche indiquent que :

- les niveaux de laves observés se situent entre les hauteurs d'écoulement simulées pour 40 000 et 80 000 m^3, ce qui se situe dans la fourchette de volumes estimés pour cet événement. L'adéquation entre le modèle et les observations est donc satisfaisante ;
- le débordement est généralisé sur l'ensemble du secteur pour un volume de 120 000 m^3 ;
- aucun débordement 'majeur' n'est observé pour un volume de 40 000 m^3, on note toutefois que la hauteur simulée est très proche des hauteurs de berge entre le pont 2 et le pont 1 ;
- dans le secteur amont (entre 0 et 600 m sur la figure 8.14b), un point de débordement préférentiel est logiquement identifié : c'est à dire le pont 3. Il faut également signaler que ce calcul a été réalisé avec les caractéristiques géométriques du chenal après la lave de 2003. Avec un niveau du lit surélevé de 1 à 2 m comme avant la lave de 2003, les débordements auraient été systématiques à cet endroit, même avec 40 000 m^3 ;
- dans le secteur central (200 m à l'amont du pont 2), les hauteurs d'écoulement simulées (pour 80 000 et 120 000 m^3) sont supérieures à la hauteur des berges. Ceci confirme les observations relatives aux laves de 1996 et de 2003 où dans les deux cas des dépôts de débordement avaient été observés dans ce secteur ;
- dans le secteur situé à l'aval du Pont 1, le débordement est quasi généralisé pour les trois volumes.

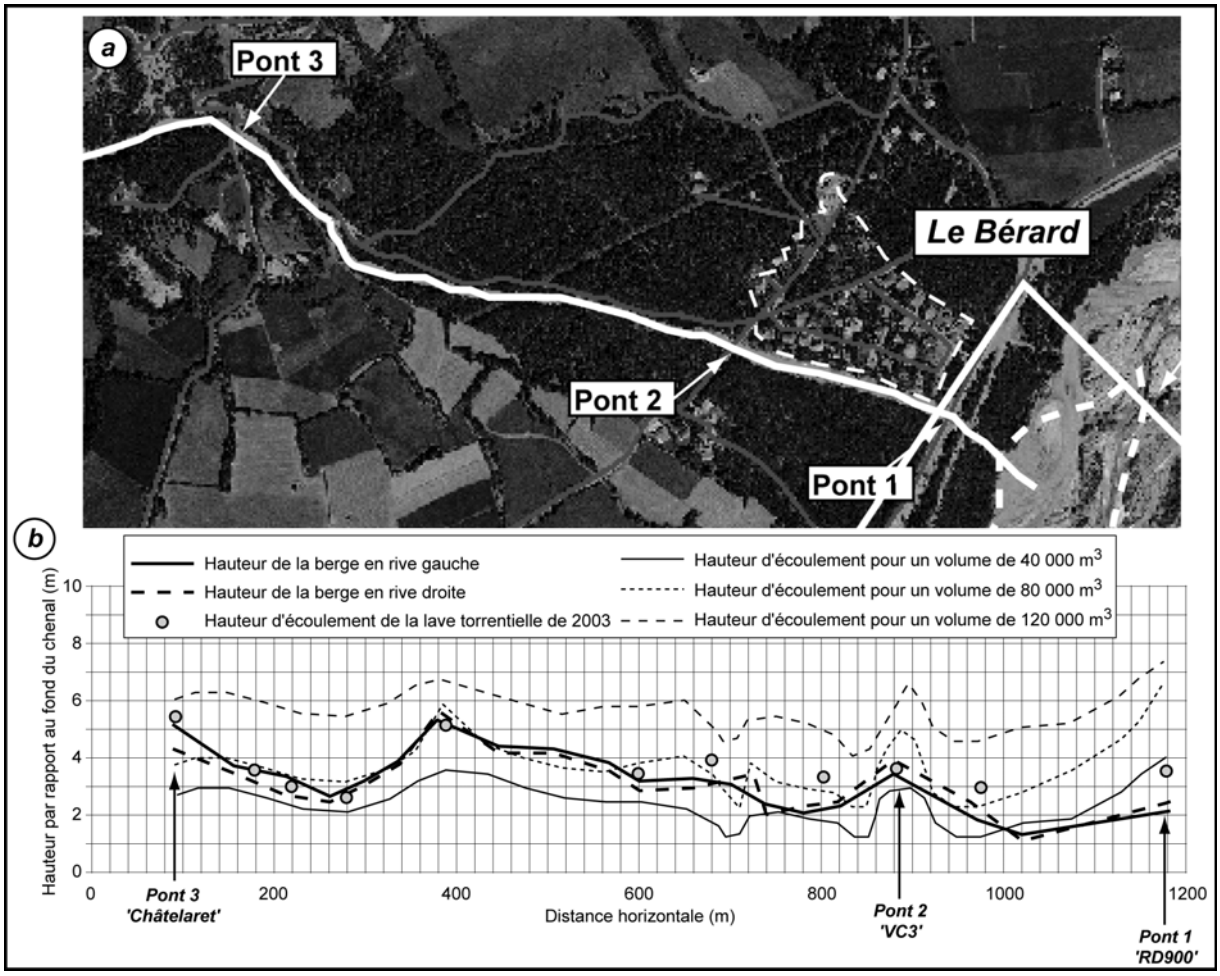


Figure 8.14 *: Comparaison entre les hauteurs d'écoulement de laves simulées avec le code Cemagref 1-D et les hauteurs des berges en rive droite et en rive gauche.*

Les deux points préférentiels de débordement identifiés sur le cône du torrent de *Faucon* sont : (1) la zone de l'apex et plus particulièrement (2) le secteur du *Bérard*, situé entre les ponts 1 et 2. Ces secteurs seront plus particulièrement étudiés dans le cadre de la modélisation numérique de l'étalement.

8.3. Scénario d'étalement (dépôt)

Les scénarios ayant permis de définir des conditions de déclenchement et de propagation, on cherche ensuite à connaître les conditions d'entrée sur le cône de déjection et comment, pour un volume et une rhéologie donnés, va se produire l'étalement. L'étalement sur le cône de déjection est simulé pour :

- définir les volumes minimaux pour qu'un débordement et un étalement significatifs se produisent ;
- identifier les étalements associés à un événement en fonction du volume et de la rhéologie de la lave.

Si les points de débordement sont localisés, ce qui n'est pas le cas général, l'étalement est assez simple à définir. Dans le cas contraire (débordement non localisé), un calcul hydraulique mené grâce au code 1-D peut permettre, sur la base des scénarios établis, de définir des hauteurs d'écoulement en tout point du chenal et pour chaque instant (Laigle et Marchi, 2000 ; Malet *et al.*, 2005) sous réserve d'hypothèses sur le comportement du front de la lave (Ancey, 2001 ; Laigle et al., 2003). Sur le cône, quand le matériau a débordé du chenal, il est très probable que le matériau concerné provienne essentiellement du corps de la lave avec disparition du front. Le processus d'étalement semble donc mieux maîtrisé que le processus d'écoulement canalisé et de débordement (Laigle, 1998).

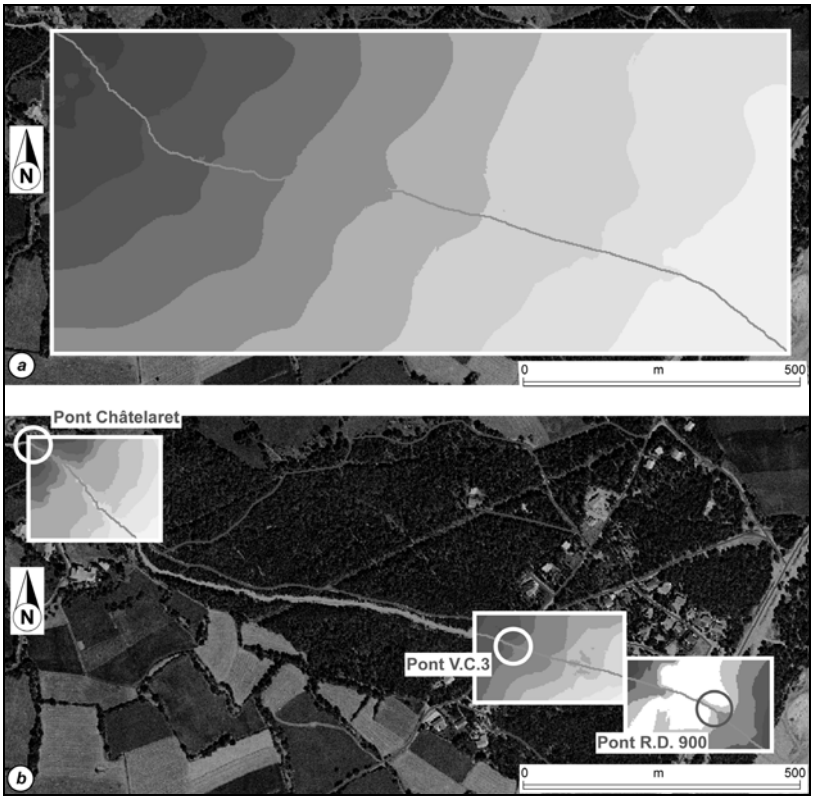


Figure 8.15 *: Localisation des Modèles Numériques de Terrain.*

a : MNT à une résolution de 5 m en XY pour l'ensemble du cône ;
b : MNT à une résolution de 1 m en XY pour les trois secteurs préférentiels de débordement (le MNT à une résolution spatiale de 2.5 est localisé à cheval entre les MNT du pont V.C.3 et du pont R.D. 900).

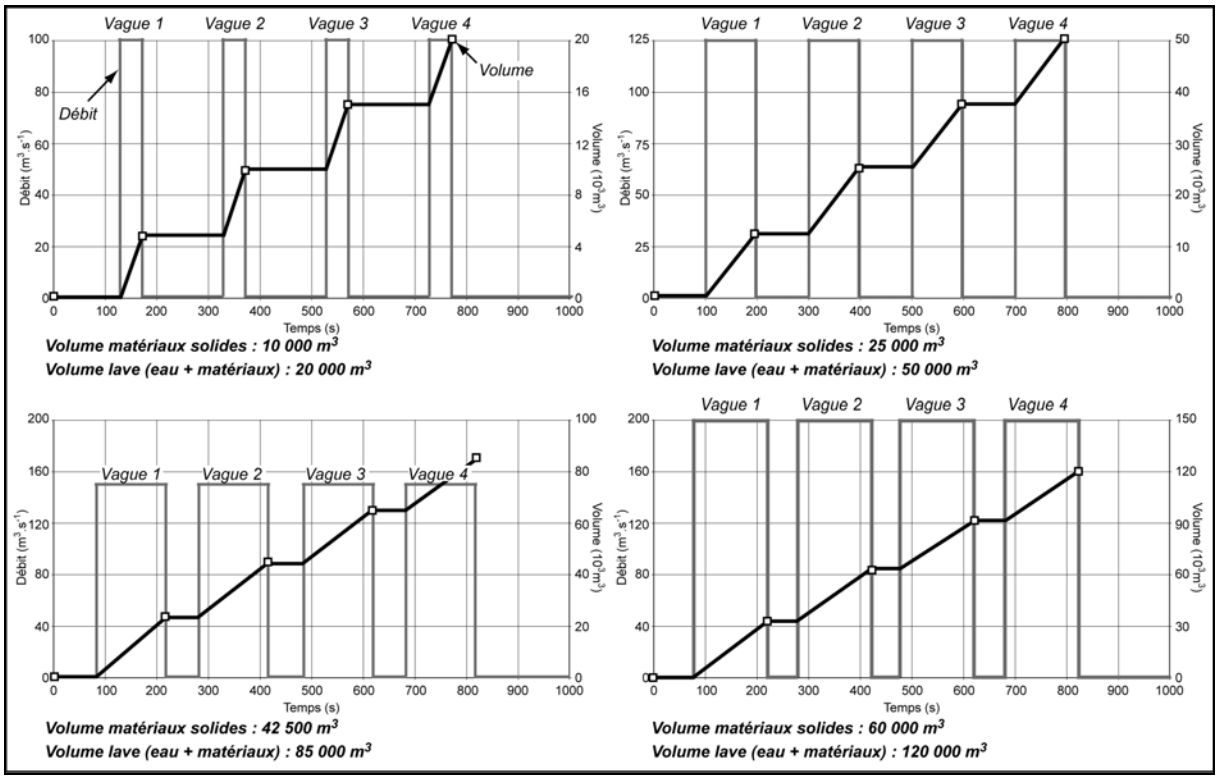


Figure 8.16 *: Hydrogrammes de crue de laves pour les 4 configurations testées.*

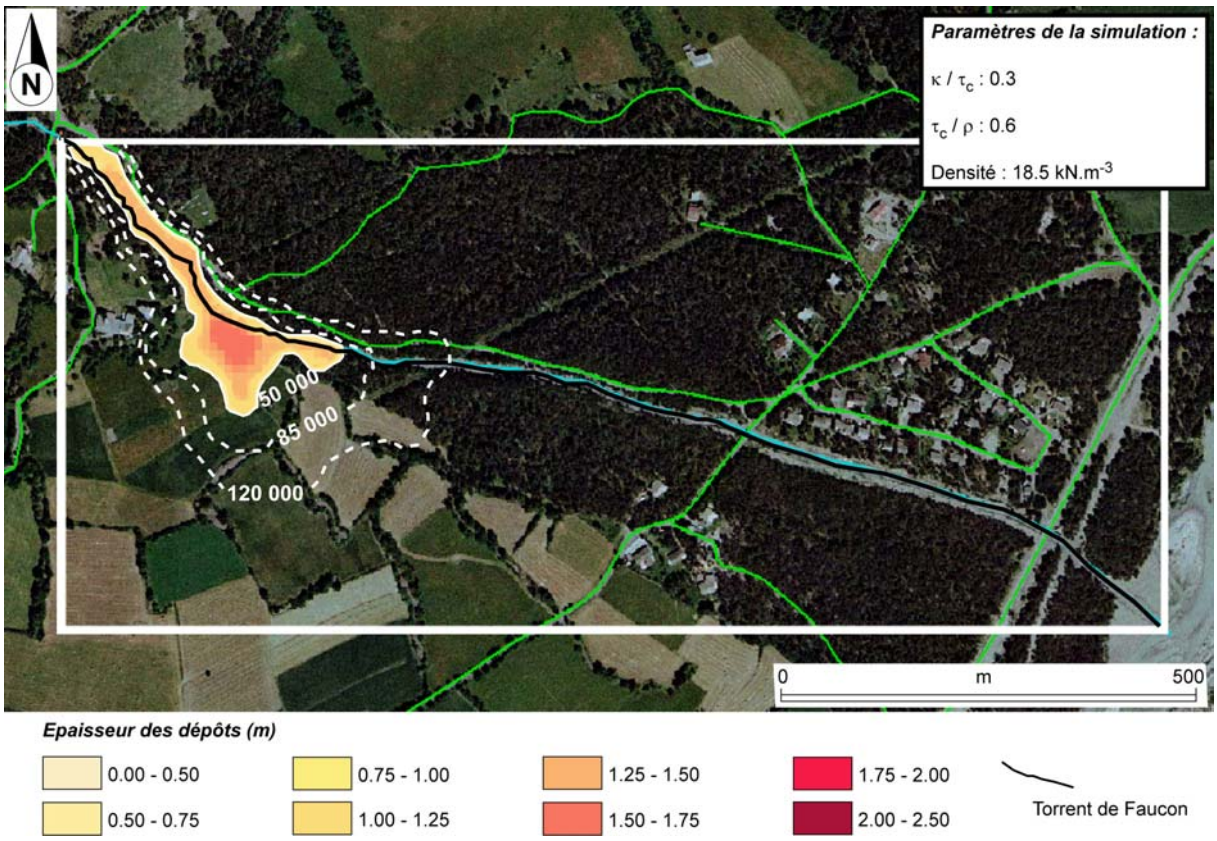


Figure 8.17 *: Etalement sur l'ensemble du cône de déjection.*

Pour ces simulations, les caractéristiques rhéologiques du meilleur calage ont été utilisées (§ 7.4., Fig. 7.11). Nous avons privilégié de faire des scénarios pour différents volumes, avec une seule rhéologie. En effet, les modèles d'étalement sont beaucoup plus sensibles aux

variations de volumes, les variations rhéologiques (pour une même loi empirique) influencent moins les résultats (Hector, 2003 ; Rickenmann *et al.*, 2003).

Les résultats des simulations numériques réalisées sur **l'ensemble du cône** (MNT avec une résolution spatiale de 5 m en XY) sont peu convaincants (Fig. 8.17). En effet, pour des volumes de matériaux supérieurs à 50 000 m^3, l'écoulement quitte le chenal au droit d'un virage particulièrement serré, pour s'épandre dans la zone du *Châtelaret*. Or, aucun débordement significatif n'a été observé dans ce secteur pour les différents événements survenus dans le torrent de *Faucon* de 1996 à 2003. Certes, quelques traces de débordement ont été observées, mais ces débordements étaient très limités. Ce problème est certainement lié à la résolution spatiale du MNT, qui n'est pas suffisante pour que le chenal torrentiel soit suffisamment pris en compte. Ce problème avait déjà été évoqué par Hector (2003) qui préconisait de travailler, si possible, à une résolution spatiale plus adaptée.

Ainsi, une deuxième série de simulations a été réalisée sur un secteur plus restreint (MNT avec une résolution spatiale de 2.5 m en XY), couvrant **la partie centrale et inférieure du cône de déjection** (Fig. 8.18). Ce secteur a connu les plus importants débordements en 1996 et en 2003.

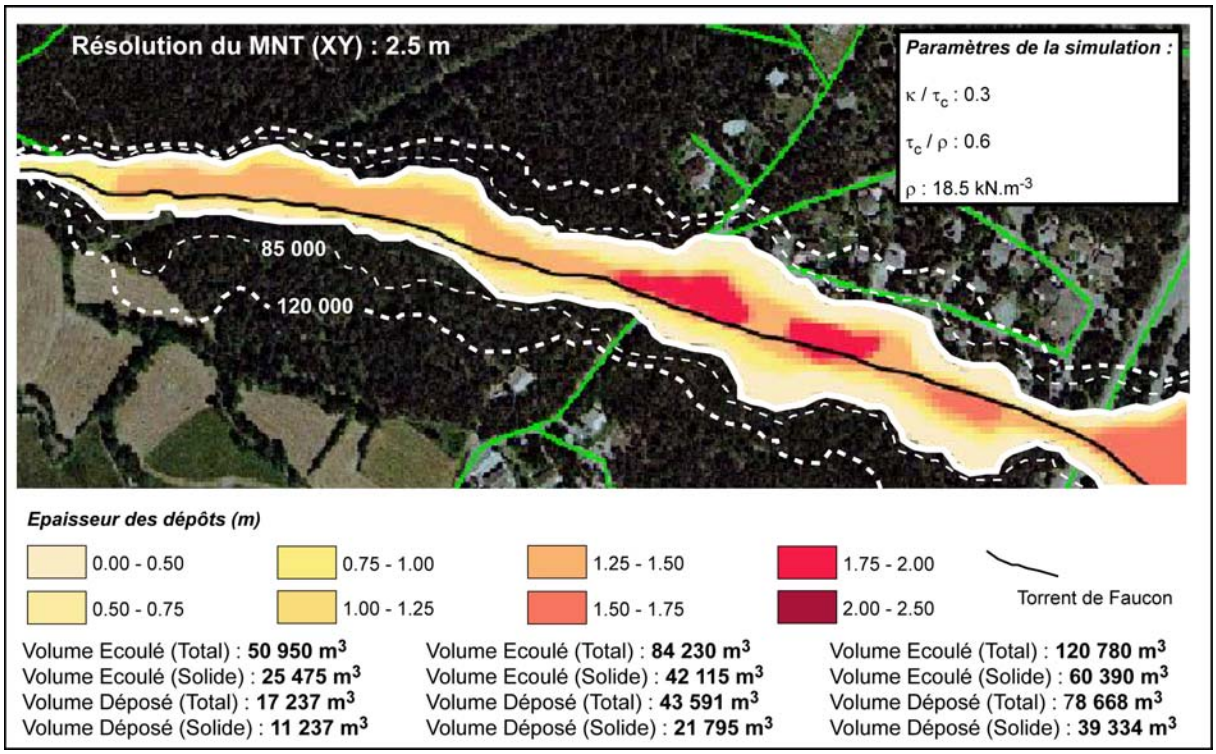


***Figure 8.18** : Etalement simulé par le modèle Cemagref 2-D sur le secteur du Bérard pour trois configurations Volume-Débit.*

Les résultats des simulations dans ce secteur sont instructifs. Pour la configuration la plus faible (volume de 20 000 m^3), il n'y a pas de débordement significatif. Par contre pour les trois autres configurations, des débordements et des étalements significatifs sont observés (Fig. 8.18). Les dépôts les plus épais sont observés à l'amont immédiat du pont 2 (pont V.C.3) et au droit du lotissement du *Bérard*, ce qui est en accord avec les observations dans ce secteur en 2003. Par contre, l'épaisseur des dépôts reste à peu près constante entre ces trois configurations car au delà de 50 000 m^3, les étalement surviennent dés le début de la zone : ces débordements précoces absorbent ainsi une grande partie des volumes, 'soulageant' certainement trop les secteurs situés en aval. Certes des levées s'étaient formées dans ce secteur en 2003, mais aucun débordement significatif n'a été observé à l'amont du pont (Fig. 8.16a), l'essentiel des matériaux étaient restés canalisés. La

résolution du MNT n'est peut être pas encore suffisante pour prendre en compte la géométrie du chenal. De plus, le rôle de frein et de digue naturelle de la forêt qui borde le chenal torrentiel sur le cône n'est pas pris en compte par le modèle. Enfin, il est important de noter que le pont de la R.D.900 est systématiquement recouvert par le mélange boueux à partir de 30 000 m^3 de matériaux de lave.

Deux secteurs ont été étudiés sur la base de simulations réalisées à partir de **MNT plus précis** (résolution spatiale en XY de 1 m).

Dans le secteur du pont du *Châtelaret* (pont 3, Fig. 8.14a), de faibles débordements sont observés uniquement pour un volume de 120 000 m^3. En deçà de cette valeur, le modèle n'indique aucun débordement. Ceci n'est pas en accord avec les observations sur les laves de 1996 et de 2003 où dans les deux cas, des débordements avaient été observés au droit du pont. Ceci est certainement à mettre en relation avec l'impossibilité d'introduire dans le modèle *Cemagref 2-D* un obstacle 'creux', comme un pont. Nous avons introduit un pont sous la forme d'un obstacle plein, mais l'écoulement est alors complètement dévié du chenal et s'étale le long de la route reliant le pont 3 à la R.D. 900, seule une très petite partie de l'écoulement reste 'confinée' dans le chenal.

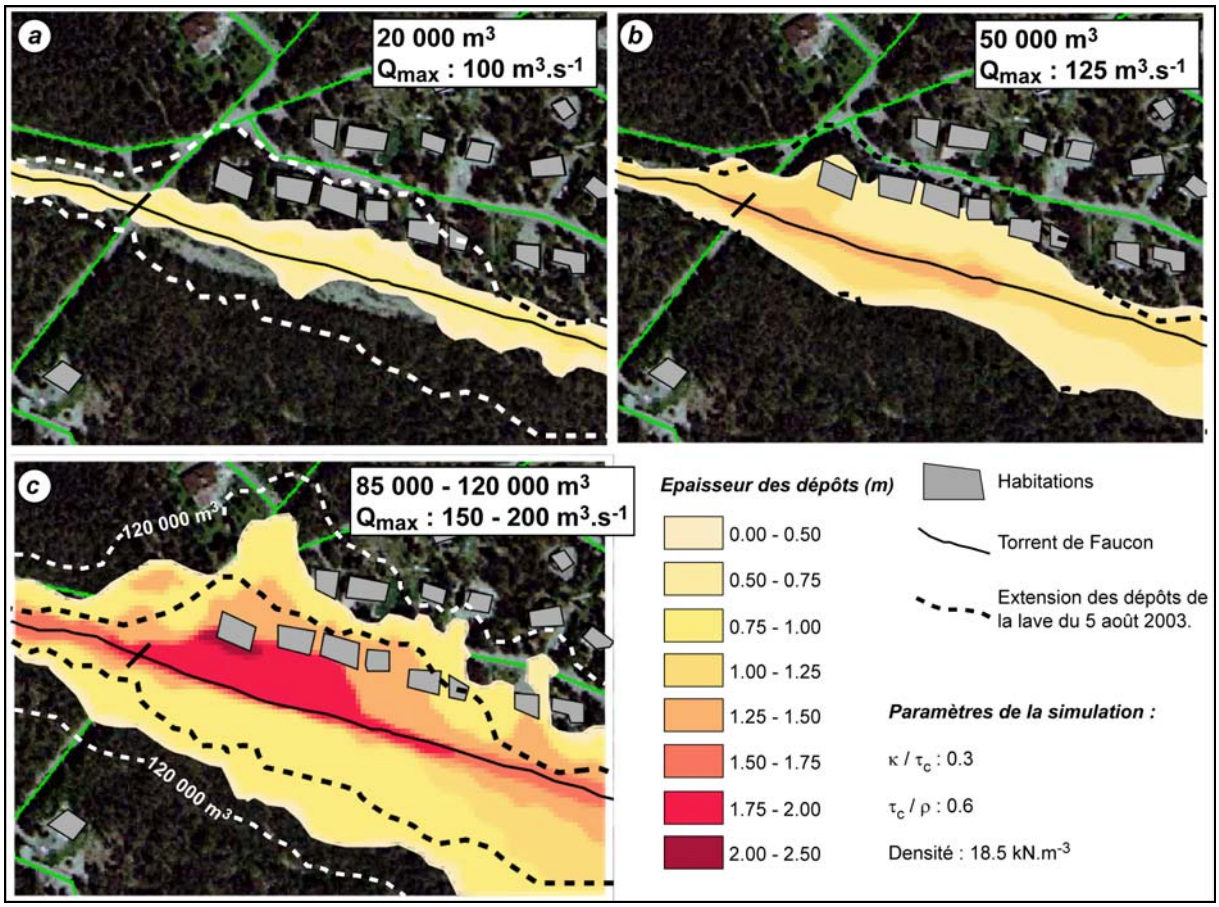


Figure 8.19 *: Etalement (extension et épaisseur des dépôts (non représentée pour 120 000 m3)) sur le secteur du lotissement du Bérard pour les quatre volumes initiaux et débits associés.*

Dans le secteur du lotissement du *Bérard* (Fig. 8.19), les débordements significatifs sont observés à partir de 50 000 m^3 (Fig. 8.19b), pour un volume de 20 000 m^3 les débordements restent très limités (Fig. 8.19a). Les dépôts les plus épais (2.34 m) se concentrent au niveau des premières habitations du lotissement du *Bérard*, en rive gauche du torrent. Pour la simulation avec 120 000 m^3 de volumes de lave en entrée, l'extension maximale recouvre une dizaine d'habitations (Fig. 8.19c). Les vitesses de propagation ne varient pas

énormément entre les quatre cas (entre 2.6 $m.s^{-1}$ pour 20 000 m^3 et 4.8 $m.s^{-1}$ pour 120 000 m^3).

Les résultats des simulations de débordement et d'étalement doivent être interprétés avec précaution. Il ne s'agit bien sur que de résultats exploratoires qu'il faudrait confirmer, en utilisant par exemple d'autres codes de calcul. Néanmoins, les vitesses de propagation obtenues par les simulations, lors de l'étalement des matériaux, indiquent que les dégâts sur les infrastructures seraient modérés. Néanmoins, les recouvrements des matériaux boueux peuvent être particulièrement étendus, et ils peuvent détruire ou fortement endommager les ouvrages d'aménagement ou d'embellissement plus 'légers' (cabanon en bois, palissade, barbecue, arbustes, haie, etc.). De plus, les perturbations sur la circulation ne seraient pas négligeables, dans la mesure où le linéaire de chaussée à déblayer et à nettoyer est important, comme ce fut le cas en août 2003 sur les torrents de *Faucon* et du *Bourget* (Chapitre 3).

8.4. Synthèse et discussion

Les simulations pour les différents scénarios réalisées dans ce chapitre ne sont qu'exploratoires, l'objectif était de montrer l'étendue des possibilités des codes de calculs sur la base d'analyse de sensibilités. Ces codes doivent continuer à être validés sur des événements de laves bien renseignés pour pouvoir à terme, être utilisés pour l'évaluation de l'aléa torrentiel sur un cône de déjection. Néanmoins, les résultats obtenus avec ces codes sont assez conformes aux observations pour les trois phases, ils soulignent et renforcent l'importance des observations de terrain et de la géomorphologie pour l'évaluation de l'aléa. En effet, pour estimer les zones de débordement et d'étalement, il est nécessaire de définir les volumes et le type de matériau qui peuvent atteindre le cône sur la base d'une étude morphologique fine des zones potentielles de déclenchement et de contribution et d'une caractérisation adaptée des formations superficielles sources. Pour les phases de propagation et d'étalement sur le cône, la définition des volumes clés repose sur l'obtention de très bonnes données topographiques (résolution métrique du MNT pour tenir compte de la micro-topographie). Des débordements significatifs sont observés pour un volume de lave compris entre 40 000 et 50 000 m^3.

Au terme de ce travail, la comparaison entre les résultats de ces simulations numériques avec les observations de terrain et les caractérisations des matériaux doit nous permettre de faire un diagnostic plus complet sur le phénomène '*lave torrentielle*' dans le bassin versant du torrent de *Faucon*.

Après la dernière lave torrentielle de 2003, des travaux ont été engagés par les services RTM sur la base du rapport de Koulinski (2004). Le pont 2 (V.C.3) a été reconstruit, le lit a été élargi au niveau du lotissement du *Bérard*, et la digue en rive gauche a été surélevée. Ces travaux renforcent la sécurité du lotissement du *Bérard*, mais ils ne sont pas suffisants à nos yeux. En effet, il serait souhaitable d'élargir ces travaux aux secteurs amont, qui vont déclencher ou alimenter une lave. Il est difficile, voir impossible de localiser avec précision les zones de déclenchement et de contribution d'une future lave, mais certains secteurs du torrent sont plus susceptibles (Fig. 8.20).

Pour la phase de déclenchement, l'analyse de stabilité du glissement ayant pu déclencher la lave de 1996 et de deux glissements susceptibles de déclencher ou d'alimenter une future lave torrentielle a confirmé logiquement, l'importance des facteurs topographiques (pente du versant), mécaniques (angle de frottement interne) et hydrogéologiques (répartition des pressions interstitielles dans le massif) dans l'évaluation de la '*dangerosité'* potentielle de ces zones de déclenchement.

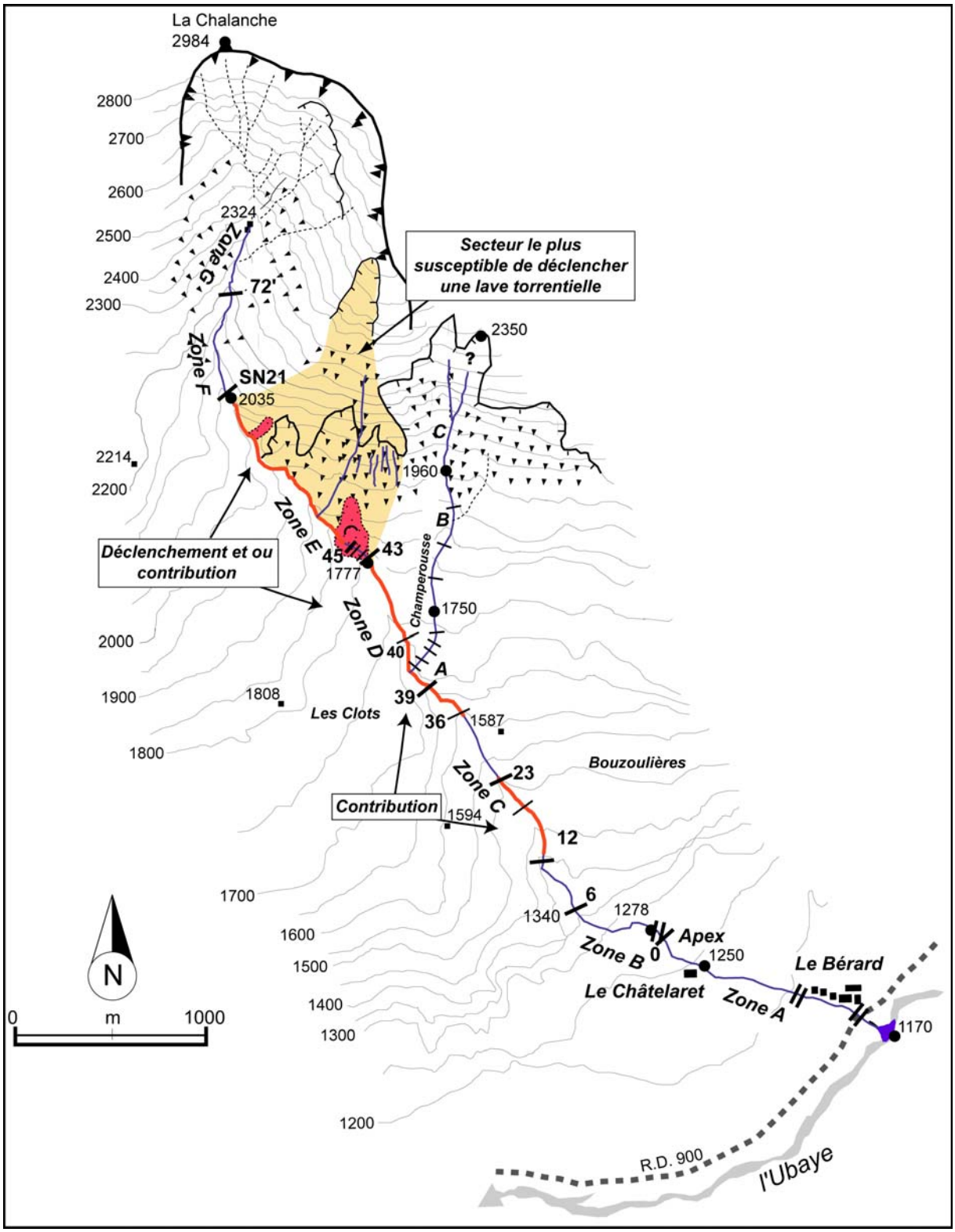


Figure 8.20 *: Zones les plus susceptibles de déclencher ou d'alimenter une future lave sur le torrent de Faucon.*

Sur la base des observations et de l'analyse géomorphologique (c'est-à-dire dans une démarche de cartographie de type 'expert'), il apparaît que les versants en rive gauche dans la partie supérieure du bassin versant du torrent de *Faucon* présentent une susceptibilité plus grande, que d'autres secteurs, à des mouvements de terrain translationnels et/ou rotationnels, pouvant '*nourrir ou déclencher une lave*', en raison des facteurs de prédisposition suivants :

- *pentes très fortes* (souvent supérieures à 35°). En effet, le contact entre les '*Terres Noires*' autochtones et les nappes (vers 2050 m d'altitude environ) se traduit notamment par une augmentation sensible des pentes (du lit et des versants) dans les secteurs armés par les nappes ;
- *formations superficielles meubles* aux caractéristiques géomécaniques assez faibles reposant sur le substratum marneux : 'moraines sur marnes noires, ou formation de pente sur marnes noires ;

De plus, les tabliers d'éboulis actifs des versants des *Trois Hommes* et de *Champerousse* sont vastes et connectés plus ou moins directement au torrent.

Pour renforcer cette analyse, rappelons que les laves torrentielles de 1996 et de 2003 se sont déclenchées à la suite d'une instabilité en rive gauche : un glissement de terrain en 1996 et l'incision d'un tablier d'éboulis en 2003.

Pour l'avenir, une cartographie de la susceptibilité des versants aux mouvements de terrain par différentes approches (Thouret *et al.*, 1995 ; Cojean et Bonnet-Staub, 1998 ; Rolland, 1998 ; Pasquerro, 1999 ; Laugier, 2002) pourra être engagée à l'image des travaux menés actuellement dans le cadre de la thèse de Yannick Thiery (Thiery *et al.*, 2003) sur le versant ubac du bassin de *Barcelonnette*.

Pour la phase de propagation, ces instabilités situées à l'amont du seuil 39 (Zones D, E, F et G) vont également favoriser la contribution. Elles fournissent une charge sédimentaire au torrent ou bien elles peuvent former un embâcle. Les matériaux détritiques vont ainsi s'accumuler progressivement dans le lit à l'arrière des seuils anthropiques (peu nombreux à l'heure actuelle car détruits ou bien en très mauvais état). Il suffit que l'un des seuils cède pour fragiliser l'ensemble du secteur par érosion régressive du lit. Il est donc souhaitable de renforcer rapidement le dispositif de correction torrentielle malgré l'accessibilité difficile qui ne facilite pas les travaux. Comme le suggère l'analyse numérique, la construction d'une dizaine de seuils entre les seuils SN21 et 43 (Zone E) diminuerait probablement les risques de déclenchement et d'alimentation d'une lave. En complément, quelques seuils en amont du seuil 39 devraient être construits, car c'est dans ce secteur que la contribution la plus forte a été observée.

Dans la zone C (§ 4.2.1.3.), de nombreux seuils arment le chenal, mais dans certains secteurs (entre les seuil 12 et 23, et entre les seuil 36 et 39), ils sont détruits ou en très mauvais état. Certains seuils détruits sont perchés à près de 10 m du niveau actuel du torrent, ce qui atteste de l'incision particulièrement marquée depuis leur destruction. Les stocks sédimentaires sont très importants dans ces deux secteurs qui sont caractérisés par des berges particulièrement instables : de nombreux petits glissements de berge et de petits glissements translationnels sont observés (Fig. 4.19). Ce sont souvent des matériaux morainiques qui glissent sur les marnes. Au niveau des seuils 22 et 23, des zones de suintement (en rive droite) favorisent ces instabilités. Ces instabilités provoquent localement la formation d'embâcles (Fig. 4.20) et peuvent fragiliser, réduire ou annuler l'ancrage latéral du seuil, et entraîner à court terme la ruine de l'ouvrage.

La zone située entre ces deux secteurs instables va progressivement être fragilisée par érosion régressive et abaissement du lit torrentiel provoquant un sous-cavage des seuils

comme cela a été observé en 2003 (seuil 15, Fig. 4.38). Ainsi, il serait approprié de reconstruire ces dix seuils détruits (quatre entre les seuils 36 et 39 ; six entre les seuils 12 et 23) pour stabiliser le niveau du lit mais aussi renforcer la stabilité des versants par l'ajout d'une butée de pied.

Dans les zones B et A, le dispositif de correction torrentielle est globalement en bon état. Mais il faudra tout de même procéder au curage régulier des plages de dépôt à l'arrière des seuils 1 et 3 (Fig. 4.13), qui ont été partiellement ou totalement comblés par les dépôts de lave de 2003. Sinon, l'incision de ces dépôts va certainement aggraver les conséquences d'une future lave.

Le risque de déclenchement d'une lave torrentielle dans le torrent de *Champerousse* semble plus faible. Le dispositif actuel (une quarantaine de seuils) a encore été renforcé en 2004 et en 2005 par la construction ou la reconstruction d'une demi-douzaine de nouveaux seuils dans la partie centrale du torrent. De plus, les observations en 2003 montrent que les deux fortes ruptures de pente (qui séparent les zones C et B, et B et A) favorisent l'étalement et le dépôt d'une bonne partie des matériaux.

CONCLUSION GENERALE

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire a concerné l'étude d'un type très particulier de mouvements de terrain, les laves torrentielles. Constituées d'un mélange fluide, fortement concentré, d'eau et de particules solides, dont le diamètre s'étend du micron au mètre, les laves torrentielles s'écoulent dans un chenal à des vitesses comprises entre 1 et 20 $m.s^{-1}$. Elles se déclenchent dans la plupart des cas après de longues et/ou fortes pluies. Les volumes de matériaux transportés vont de quelques milliers à plusieurs millions de m^3. Les distances de transport s'étendent de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres. Elles constituent un réel danger, dans des zones où se localisent de nombreux biens exposés à forts enjeux socio-économiques et humains, en raison de leurs importantes capacités de transport et de submersion, de leurs vitesses de propagation élevées et de leurs phénoménales forces d'impact. Il est donc indispensable de mettre en place dans les zones exposées à l'aléa '*lave torrentielle*' des stratégies d'évaluation et de prévention pour en réduire les conséquences.

Compte tenu de l'état des connaissances et des besoins de recherche, il nous avait semblé opportun d'engager une recherche portant sur la morphologie et la dynamique de ces laves torrentielles. Le manque prononcé de données locales sur les conditions morphologiques associées aux phases de déclenchement et de propagation pour des **références naturelles bien documentées constitue** une sérieuse limitation pour évaluer au mieux le niveau d'aléa et confronter les résultats des codes numériques à des observations de terrain fiables et précises. Au démarrage de cette thèse, les objectifs scientifiques fixés étaient les suivants :

- (1) Définir **les particularités des laves torrentielles**, dans le contexte d'un **bassin versant marneux**, en terme de **morphologie** (facteurs de prédisposition, mécanismes de déclenchement, de propagation et d'étalement (dépôt)), de **sédimentologie** (identification des matériaux sources, typologie des écoulements) et **de rhéologie** (définition des conditions d'écoulements naturels et de mélanges artificiels de formations superficielles) ;
- (2) Analyser le fonctionnement des laves torrentielles dans les bassins marneux *'contrastés'* pour les phases de déclenchement, de propagation et de dépôt en croisant **des observations de terrain** et la **caractérisation physique** des matériaux ;
- (3) Définir les conditions de stabilité de zones instables pouvant déclencher une lave et tester l'effet de différentes configurations (**apport de matériaux après la phase de déclenchement**, influence de la localisation et du nombre de **seuils torrentiels**, définition des volumes minimaux pour le débordement) sur la propagation et l'étalement des laves, à partir de simulations numériques avec des codes calés sur des événements bien renseignés.

Pour mener à bien ce travail, il paraissait indispensable d'engager une démarche pluridisciplinaire utilisant les approches et les outils de la géomorphologie, la sédimentologie, la géotechnique, la rhéologie et la modélisation numérique. Le phénomène *'lave torrentielle*' a été étudié en emboîtant successivement les échelles spatiales et temporelles : du bassin de risque (1/50 000ème) au bief torrentiel (1/1 000ème), du siècle à l'événement, et des trois phases de l'événement allant du déclenchement à l'étalement (dépôt). Notre méthodologie associe la constitution d'une base de données (très rare pour ce genre de phénomène) sur

l'observation et la caractérisation des dépôts de laves torrentielles et des formations superficielles sources, et l'utilisation d'une chaîne de codes numériques.

Ce travail s'est appuyé sur plusieurs projets de recherches nationaux ou internationaux, menés en collaboration avec le *Cemagref de Grenoble (Unité de Recherche 'Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches')*, *le Département de Géologie et de Génie Géologique de l'Université Laval (Québec)*, *le Laboratoire de Mécanique des Sols de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*, *le Centre of the Environment and Landscape Dynamics de l'Université d'Utrecht*.

Principaux résultats :

Les éléments de réponse et les résultats acquis durant cette thèse sont discutés pour chacun des objectifs scientifiques.

Objectif (1) :

L'étude des laves torrentielles déclenchées dans les '*Terres Noires*' à l'échelle d'un bassin de risque (le bassin de *Barcelonnette*) a montré que :

- les torrents du bassin connaissent une forte activité depuis au moins deux siècles selon une succession de périodes de crise et de calme. **Cette activité s'est essentiellement concentrée (91% de la centaine de laves répertoriées) dans les torrents localisés en adret** : le *Riou-Bourdoux*, les *Sanières*, le *Faucon*, le *Bourget* et l'*Abeous* ;

- les événements de laves torrentielles ont logiquement un lien étroit avec la survenance **d'orages estivaux violents particulièrement localisés**. Pourtant, ces épisodes pluvieux ne sont pas forcément d'une intensité remarquable par rapport aux normales pluviométriques, ce qui souligne l'importance des facteurs de prédisposition (géomorphologiques, anthropiques, etc.) ;

- Les torrents à laves ont des **facteurs de prédisposition** en commun : ils présentent des pentes fortes (surtout dans les bassins de réception) pour le profil en long et les versants contigus, et surtout de nombreuses instabilités (glissements de terrain et tabliers d'éboulis actifs) sont connectées directement au chenal torrentiel. Néanmoins, ces analyses ne permettent pas, à elles seules, de se prononcer sur la capacité des appareils torrentiels à produire des laves. En effet, deux torrents aux caractéristiques analogues (à l'échelle du 1/50 000ème) peuvent présenter une activité différente ;

- L'analyse sédimentologique des dépôts de laves torrentielles de plusieurs torrents a montré que, sur le cône de déjection, ces dépôts sont tous caractérisés par une part relativement importante de matériaux fins, correspondant ainsi à **des laves torrentielles boueuses**. Leur composition pétrographique fait apparaître des marnes noires, des calcaires et des flyschs dans des proportions variables. Le caractère boueux des dépôts est fortement lié à l'importance des affleurements de marnes noires dans le bassin versant concerné. Le comportement de ces laves torrentielles, à gradient de cisaillement élevé, est **viscoplastique de type *Herschel-Bulkley*** ou plus rarement de type *Bingham.*

Objectif (2) :

Pour répondre à cet objectif, une analyse a été menée sur trois événements torrentiels survenus sur le torrent de *Faucon* en croisant (1) les observations du chenal et des versants contigus à l'échelle du bief (1/1 000ème) et (2) la caractérisation physique des matériaux. Un profil en long détaillé du chenal torrentiel a été réalisé. Une base de données sous SIG a été construite, elle rassemble 25 descripteurs qui concernent les caractéristiques : du chenal et

des versants (pentes, largeur du lit, hydrologie, etc.), des formations superficielles (type, texture, etc.) et des seuils torrentiels (type, géométrie, état, etc.). En complément, les observations relatives à lave de torrentielle de 2003 (emprise et profondeur de l'incision, extension et épaisseur des dépôts) ont été cartographiées pour chacun des biefs pour faciliter les calculs hydrauliques et pour définir un lien entre les caractéristiques des biefs et leur fonctionnement pendant la lave à partir notamment d'une analyse statistique croisée. Ainsi, la synthèse de ces analyses a montré que :

- Les deux laves de 1996 et 2003 illustrent parfaitement les deux grands types de déclenchement : une **zone unique de déclenchement** en 1996 (glissement de terrain des *Trois Hommes*, embâcle) et **plusieurs zones de déclenchement** en 2003 (confluence de ravines et de torrents secondaires) ;

- Les laves de 1996 et de 2003 ont d'abord été granulaires après leur déclenchement, puis au fur et à mesure de leur propagation, sont progressivement devenues boueuses. La contribution pour ces deux laves a été particulièrement importante, elles ont érodé le lit et les berges en incorporant des formations superficielles. La pétrographie suggère que cette augmentation est liée, entre autres, à l'augmentation progressive de la proportion de **marnes noires** dans le mélange ;

- Des zones fonctionnelles ont été identifiées : des zones de dépôt et des zones d'incision. Les comparaisons entre d'une part, les dépôts et les matériaux sources, et d'autre part les observations et le calcul du bilan sédimentaire par biefs, ont montré que pour la lave de 2003, les secteurs **où l'érosion a été la plus intense** sont caractérisés :
    - (1) par un mauvais état général des seuils torrentiels ;
    - (2) par la présence d'anciens dépôts torrentiels (dépôts de la lave de 1996 et de la crue de 2002) qui ont été fortement réincisés ;
    - (3) par la présence de marnes noires et de petites instabilités de berges et de versants.

Les secteurs faiblement érodés et/ou présentant des dépôts sont aménagés avec des seuils en bon état. Ainsi, ce travail souligne **l'importance des dépôts des événements antérieurs et l'état des seuils. Les zones de dépôts d'un événement A vont être les zones de contribution d'un événement B.**

Objectif (3) *:*

- Pour **le déclenchement**, l'analyse numérique de la stabilité de trois glissements de terrain (un glissement ayant déclenché une lave, et deux glissements qui peuvent potentiellement déclencher et/ou alimenter une lave) confirme logiquement, l'importance des facteurs mécaniques, topographiques (pente du versant) et hydrogéologiques (répartition des pressions interstitielles dans le massif). L'influence de venues d'eau extérieures (fuites des réseaux de drainage) sur la stabilité de ces sites est particulièrement forte. Les volumes potentiellement libérables par ces zones sources sont compris entre 30 000 et 100 000 m^3.

- Pour **la propagation** des laves, les codes rhéologiques (*Bing*, *Cemagref 1-D* et *J-DFM)*, calés sur les caractéristiques et la géométrie (extension et épaisseur) des dépôts des laves de 1996 et de 2003, apparaissent performants pour représenter les hauteurs d'écoulement et les distances de parcours (paramètres utilisés pour définir un niveau d'aléa) ;

La contribution (en terme de volume) a été introduite dans la modélisation numérique selon trois méthodes d'intégration (avec le code *J-DFM 1-D*). Les hauteurs d'écoulement simulées avec les méthodes des sections d'érosion et de Rickenmann *et al.* (2003) sont relativement proches des observations.

L'étude numérique de l'influence des seuils sur les caractéristiques d'écoulement montre **l'importance de la localisation des seuils plus que leur nombre** ; des seuils en bon état et placés au plus près des zones de déclenchement seront beaucoup plus efficaces que des seuils situés en partie médiane et en partie basse du chenal d'écoulement.

Le volume minimal de matériau à libérer par les zones de déclenchement pour atteindre le cône de déjection, et déborder a été estimé à partir des codes. Un volume de 10 000 à 15 000 m^3 de matériaux est nécessaire pour atteindre le cône, mais il doit être de 40 000 m^3 environ pour provoquer des débordements. La comparaison entre les hauteurs d'écoulement simulées et la hauteur des berges torrentielles montre la grande sensibilité de certains secteurs du cône, particulièrement le secteur du lotissement du *Bérard*.

L'étalement des matériaux au(x) point(s) de débordement a été étudiée à l'aide du code bidimensionnel *Cemagref 2-D*. Le modèle permet de spatialiser les hauteurs de dépôts dans les secteurs submergés du cône ; des dépôts significatifs sont observés au delà de 50 000 m^3 de matériaux de lave. Les dépôts les plus épais sont localisés au droit du secteur du *Bérard*.

Discussion des résultats et perspectives :

Les résultats présentés dans ce mémoire constituent une base de données rare pour ce type de phénomène. Ces données sont très utiles pour identifier la dynamique des laves à l'échelle du bief torrentiel, et pour caler et valider des codes numériques. Cependant, la recherche a également souligné la difficulté d'étudier dans son ensemble le phénomène '*lave torrentielle*'.

L'étude à l'échelle du bassin de risque apporte quelques éléments de réponse, mais elle reste largement insuffisante. L'analyse des données pluviométriques par exemple n'a pas donné entière satisfaction ; les postes pluviométriques sont trop éloignés des bassins de réception des torrents pour que l'on puisse réellement définir un seuil de précipitations de déclenchement de lave. De plus, il reste difficile, voir impossible de relier en '*temps réel*', les précipitations, l'état hydrique des sols, etc. dans un bassin torrentiel relativement vaste pour mettre en place un système d'alerte efficace. En parallèle, les analyses morphologiques et morphométriques au 1/50000ème ne sont pas très convaincantes. Elles permettent certes d'identifier des facteurs de prédisposition communs aux torrents à lave, mais elles n'apportent pas de solutions concrètes aux gestionnaires, qui cherchent eux à se prémunir et à se protéger des laves. Ces analyses n'ont d'intérêt que si l'on cherche à connaître les torrents susceptibles de déclencher une lave. L'étude historique et la connaissance des autochtones apporte ces informations plus facilement et plus sûrement. Plus généralement, une étude de l'aléa '*lave torrentielle*' à cette échelle ne fournit qu'une image simplifiée et nécessairement réductrice de la complexité des processus régissant la dynamique torrentielle.

L'étude engagée à l'échelle du bassin versant et du bief est beaucoup mieux adaptée. Elle a permis de connaître les différents sites très finement, et de renseigner et de reconstituer les événements survenus récemment. Notre travail mené à l'échelle du bief a souligné l'importance de certains paramètres dans la dynamique de ces laves pendant la propagation (zones de contribution, type et état seuils torrentiels, etc.). Cette démarche exploratoire, réalisée à partir de l'analyse de 25 facteurs (descripteurs), pourrait être appliquée et transposée sur d'autres sites en utilisant seulement une dizaine de facteurs qui semblent les plus pertinents (pente du profil en long, largeur du lit mineur et du lit majeur, hauteur et état des seuils, pentes des versants, facteur de sécurité des versants, occupation du sol) avec la possibilité d'adapter le choix des facteurs en fonction des caractéristiques spécifiques (morphodynamique, correction torrentielle, etc.) du bassin versant analysé. Cela constituerait à notre avis un outil pour aider (1) à la compréhension et à la modélisation de ces

phénomènes et (2) à la planification et à la gestion des mesures à entreprendre pour réduire le risque '*laves torrentielles*'.

Pour **le déclenchement**, une analyse géomorphologique à l'échelle du versant (pente, géométrie des formations superficielles, occupation du sol, hydrologie) et une caractérisation physique des matériaux (angle de frottement interne, cohésion) semblent être suffisantes pour définir des zones préférentielles de déclenchement. La synthèse de nos observations et de nos caractérisations permet d'établir un diagnostic de type '*expert*'. Mais ce diagnostic de type '*expert*' doit toujours s'appuyer sur des études spécifiques, au cas par cas (pour un bassin versant donné). L'analyse croisée des différents paramètres par une modélisation spatiale sous SIG n'a pas pu être entreprise dans le cadre de ce travail, mais elle doit à terme être mise en œuvre pour plusieurs sites aux caractéristiques différentes pour évaluer sa faisabilité et son efficacité.

Pour **la propagation et l'étalement**, l'analyse doit se faire à l'échelle du bief pour véritablement prendre en compte la complexité du phénomène. Notre travail a souligné par exemple l'importance des caractéristiques des formations sources, et de la géomorphologie fine du chenal pour évaluer les volumes et les caractéristiques d'une future lave. Il a également démontré que les résultats des simulations numériques pour plusieurs scénarios étaient encourageants, mais encore insuffisants. Les paramètres identifiés comme importants dans la dynamique des laves **(contribution, seuils torrentiels, etc.)** ne sont pas ou que trop rarement intégrés dans les codes numériques disponibles. Il ne nous a pas été possible de modéliser la propagation d'une lave complexe dans son ensemble (déclenchement en lave granulaire, puis transformation progressive en lave boueuse). Les codes numériques ne permettent à l'heure actuelle de modéliser une lave qui change de loi de comportement pendant la propagation (comportement frictionnel-colisionnel au déclenchement, puis viscoplastique par exemple). Pour les modèles d'étalement, nous n'avons pas pu intégrer certains obstacles (ponts, digues, forêt, etc.) qui ont pourtant un rôle majeur. Il est encore nécessaire à l'heure actuelle de recourir à des artifices pour tenter de les prendre en compte, quand cela est possible.

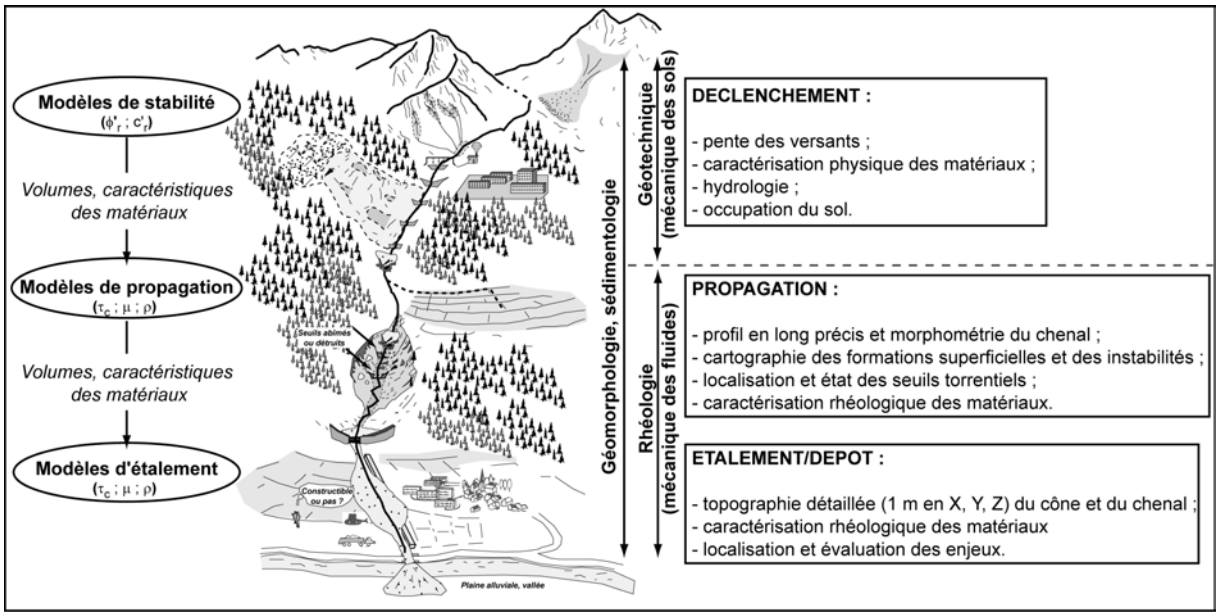


Figure Conclusion.1 *: Méthodologie de l'évaluation de l'aléa 'lave torrentielle.*

Ainsi, au terme de ce travail, nous pouvons suggérer les paramètres et les informations qui semblent à nos yeux les plus importants à acquérir pour mener à bien une étude sur l'aléa '*lave torrentielle*' dans un bassin versant (Fig. Conclusion.1) :

- **Pour le déclenchement** : pentes des versants, caractéristiques mécaniques, hydrologie, occupation du sol ;
- **Pour la propagation** : profil en long (précision de l'ordre du mètre), cartographie des formations superficielles et des instabilités, localisation et état des seuils torrentiels, rhéologie des matériaux ;
- **Pour le dépôt** : topographie fine du cône, rhéologie des matériaux, localisation des enjeux.

A partir de l'étude de ces paramètres, on doit être capable d'identifier les volumes et les caractéristiques des matériaux (Fig. Conclusion.1).

Cette méthodologie, utilisée dans le cadre ce mémoire, doit aider le praticien à évaluer et de façon robuste l'intensité et l'occurrence de l'aléa lave dans un bassin torrentiel à risque. Mais des efforts supplémentaires doivent être entrepris pour :

- valider dans un premier temps la méthodologie de cartographie et d'analyse des descripteurs des biefs dans un torrent actif du bassin de *Barcelonnette* (*Bourget* ou *Sanières*) pour affiner le choix des facteurs, puis la transposer dans un torrent extérieur au bassin dans un deuxième temps pour vérifier son applicabilité dans un contexte géomorphologique différent ;
- développer une modélisation numérique sous SIG par différentes approches (statistiques, etc.) pour définir les zones de déclenchement, en croisant différents facteurs de prédisposition (topographie, hydrodynamique, occupation du sol, caractéristiques des matériaux, etc.). A terme, cette méthodologie devrait permettre d'identifier les secteurs de déclenchement potentiel avec un minimum d'informations sur les données d'entrée des modèles ;
- améliorer la connaissance des conditions pluviométriques sur les crêtes afin de mieux définir les relations entre les conditions pluviométriques et la survenance d'une lave (définition de seuils de précipitations) ;
- multiplier les observations 'fines' après une lave torrentielle, de la zone de déclenchement à la zone de dépôt (étalement), afin de constituer une base de données utiles à des fins de modélisation (pour caler et valider les modèles). Cette base de donnée doit concerner (1) les caractéristiques des biefs des torrents à lave et (2) la localisation et l'épaisseur des dépôts de laves ;
- développer un modèle global des laves torrentielles, du déclenchement au dépôt (étalement) qui intègre la possibilité de changer à la fois le volume et la loi de comportement d'une lave pendant la propagation (contribution), en poursuivant les collaborations scientifiques entre les géomorphologues, les mécaniciens des sols et des fluides, et les numériciens.

Références bibliographiques

Alcoverro, J., Corominas, J., Gomez, M., 1999. The Barranco de Aras flood of 7 August 1996 (Biescas, Central Pyrenees, Spain). *Engineering Geology*, 51, 237-255.

Aleotti, P., Chowdhury, R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology of the Environment*, 58, 21-44.

Aleotti, P., Polloni, G., 2003. *Two-dimensional model of the 1998 Sarno debris flows (Italy) :preliminary results*. In Rickenmann, D., Chen, L.C. (Eds): Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Davos,Switzerland, Millpress, Rotterdam, 553-563.

Alexander, D.E., 1993. *Natural Disasters*. Chapman & Hall, New-York, 632p.

Almeida-Teixeira, M.E. (sous la direction de), 1991. *Natural hazards and engineering geology: prevention and control of landslides and other mass movements*. Proceedings of the European School of Climatology and Natural Hazards Course, Lisbonne, 28 March – 5 April 1990, 349p.

Ambroise, B., 1998. Genèse des débits dans des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : 1- processus et facteurs. *Revue des Sciences de l'Eau*, 4, 471–495.

Ambroise, B., Viville, D., 1986. Spatial variability of textural and hydrodynamic properties in a soil unit of the Ringelbach study catchment, Vosges (France). *Z. Geomorph. N.F.*, 58, 21-34.

Amiot, A., Nexon, C., 1995. *Inventaire des aléas dans le Bassin de Barcelonnette depuis 1850*. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Louis Pasteur, 173p.

Ancey, C., 1999. *Note de synthèse sur la rhéologie des laves torrentielles*. Rapport Interne, Cemagref, Grenoble, 29p.

Ancey, C., 2001a. *Debris flows and related phenomena*. In Balmforth, N.J., Provenzale, A. (Eds): Geomorphological Fluid Mechanics, Springer-Verlag, Heidelberg, 528-547.

Ancey, C., 2001b. Role of lubricated contacts in concentrated polydisperse suspensions. *J. Rheol.* 45(6), 1421-1439.

Ancey, C., 2002. *Rhéophysique des suspensions concentrées. Application à la géophysique alpine*. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Institut National Polytechnique de Grenoble, 90p.

Ancey, C., (sous presse). Plasticity and geophysical flows: A review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* (sous presse)

Ancey, C., Jorrot, H., 2001. Yield stress for particle suspensions within a clay dispersion. *J. Rheol.*, 45(2), 297-319.

Anderson, S.A., Sitar, N., 1995. Analysis of rainfall-induced debris flows. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(7), 544-552.

Angulo-Jaramillo, R., Vandervare, J.-P., Roulier, S., Thony, J.-L., Gaudet, J.-P., Vauclin, M., 2001. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers. A review and recent development. *Soil and Tillage Research*, 55, 1-29.

Anma, S., Maikuma, H., Yoshimura, M., Fujita, Y., Okusa, S., 1988. *Dynamics of earthquake-induced slope failure at Ontake*. In Bonnard, C. (Ed): Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, Switzerland, Balkema, Rotterdam, 61-66.

Antoine, P., Fabre, D., Giraud, A., Al Hayari, M., 1988. *Propriétés géotechniques de quelques ensembles géologiques propices aux glissements de terrains*. In Bonnard, C. (Ed): Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, Switzerland, Balkema, Rotterdam, 1301-1306.

Antoine, P., Giraud, A., 1992. Typologie des mouvements de versant dans un contexte opérationnel. *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 51, 57-62.

Antoine, P., Giraud, A., Meunier, M., van Asch, T.W.J., 1995. Geological and geotechnical properties of the 'Terres Noires' in the southeastern France: weathering, erosion, solid transport and instability. *Engineering Geology*, 40, 223-234.

Armanini, A., Scotton, P., 1993. *On the dynamic impact of a debris flow on structures*. Proceedings of XXV Congress of IAHR, Technical Session B, Debris Flows and Landslides, 3, 203-210.

Arnaud, F., 1890. *Notice historique sur les torrents de la vallée de l'Ubaye*. Imprimerie Nationale, Paris, 140p.

Artru, P., 1972. *Les Terres Noires du Bassin Rhodanien (Bajocien supérieur à Oxfordien moyen) : stratigraphie, sédimentologie, géochimie*. Thèse de Doctorat, Université de Lyon III, 182p.

Asseline, J., Valentin, C., 1978. Construction et mise au point d'un infiltromètre á aspersion. *Cahier ORSTOM, Série Hydrologie*, XV(4), 321-349.

Assier, A., 1993. *L'englacement des Alpes du sud franco-italiennes du petit âge de glace à la fin du 20è siècle*. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourrier, Grenoble, 487p.

Assier, R.S., Mariotti, C., Heinrich, P., 1997. Numerical simulation of submarine landslides and their hydraulic effects. *J. Waterw. Port Coastal Ocean Eng.*, 123, 149-157.

Aulitzky, H., 1982. *Preliminary two-fold classification of torrents.* Essais sur la recherche d'Erosion Torrentielles et des Avalanches (conference proceedings), Wien, 243-256.

Auzet, A.-V., 2000. *Ruissellement, érosion et conditions de surface des sols à l'échelle de versants et petits bassins versants.* Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 79p.

Awongo, M.-L., 1984. *Stratigraphie, sédimentologie et géochimie des Terres Noires du Jurassique moyen et supérieur de la Provence (Sud-Est de la France)*. Thèse de Doctorat, Université de Marseille III, 144p.

Ayotte, D., Hungr, O., 2000. *Calibration of a runout prediction model for debris flows and avalanches*. In Wieczorek, G.F., Naeser, N.D. (Eds): Proceedings of the 2nd International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, Taipei, Taiwan, Balkema, Rotterdam, 505-514.

Bagnold, R.A., 1954. Experiments on a gravity free dispersion of large solide spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proceedings of the Royal Society of London*, Serie A, 225: 49-63.

Bagnold, R.A., 1956. The flow of cohesionless grains in fluids. *Proceedings of the Royal Society of London*, Serie A, 249: 235-296.

Ballandras, S., Nevière, C., 1991. Le détritisme torrentiel holocène intra-alpin : l'exemple du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud). *Physio-Géo*, 22/23: 15-20.

Bardou, E., 2002. *Méthodologie de diagnostic de laves torrentielles sur un bassin versant alpin*. Thèse de Doctorat de Sciences Techniques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 188p.

Barnes, H A., Walters, K., 1985. The yield stress myth? *Rheologica Acta*, 24(4), 323-326.

Batalla, R.J., De Jong, C., Ergenzinger, P., Sala, M., 1999. Field observations on hyperconcentrated flows in mountain torrents. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 247-253.

Benda, L.E., Cunda, T.W., 1990. Predicting deposition of debris flows in mountain channels. *Can. Geotech. J.*, 27, 409-417.

Berti, M., Genevois, R., Simoni, A., Rosella Tecca, P., 1999. Field observations of a debris-flow event in the Dolomites. *Geomorphology*, 29, 265-274.

Berti, M., Genevois, R., LaHusen, R., Simoni, A., Rosella Tecca, P., 2000. Debris-flow monitoring in the Acquabona Watershed on the Dolomites (Italian Alps). *Phys. Chem. Earth (B)*, 25(9), 707-715.

Bertier, P., Bouroche, J.-M., 1975. *Analyse des données multidimensionnelles*. Presses Universitaires de France, 270 p.

Berz, G., 1992. Losses in the range of US$ 50 billion and 50,000 people killed. Munich'Re list of major natural disasters in 1990. *Natural Hazards*, 5(1), 95-102.

Besson, L., 1996. *Les Risques naturels en montagne. Traitement, prévention, surveillance*. Artès-Publialp, Grenoble, 438p.

Beverage, J.P., Culbertson, J.K., 1964. Hyperconcentrations of suspended sediment. *Journal of Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, 90, 117-128.

Bingham, E.C., 1922. Fluidity and Plasticity. McGraw-Hill Book Co., New. York.

Birot, P., 1955. *Les méthodes de la morphologie*. Presses Universitaires de France, 177 p.

Blijenberg, H., 1998. *Rolling stones? Triggering and frequency of hillslope debris flows in the Bachelard valley, southern French Alps*. Netherlands Geographical Studies, Utrecht, 246, 240p.

Bonnard, C., Noverraz, F., 2001. Influence of climate change on large landslides: assessment of long-term movements and trends. In VGE (Ed): Proceedings of the Int. Conf. On Landslides: Causes and Countermeasures, Davos, Juin 2001, 121-138.

Bonnet-Staub, I., 1998. *Mécanismes d'initiation et facteurs déclenchants des laves torrentielles dans les Alpes françaises - Contribution à la maîtrise du risque*. Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 230p.

Bonnet-Staub, I., 1999. Définition d'une typologie des dépôts de laves torrentielles et identification de critères granulométriques et géotechniques concernant les zones sources. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 57, 339-367.

Bourrelier, P.-H., 1997. *Evaluation de la Politique Publique dans le Domaine des Risques Naturels*, Rapport Interministériel. Conseil National de l'Evaluation, Commissariat Général au Plan, La Documentation Française, Paris, 138p.

Bovis, M.J., Jakob, M., 1999. The role of debris supply conditions in predicting debris-flow activity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 1039-1054.

Bradley, J.B., McCutcheon S., 1985. *The effects of high sediment concentration on transport processes and flow phenomena*. Proceedings, International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention, Tsukaba, Japan, September 3-5.

Brochot, S., Laigle, D., Bianco, G., 2000. *Mise en commun des méthodes et des connaissances sur les processus des laves torrentielles. Connections des réseaux de données et mise en commun des connaissances et des expériences pour la gestion des risques d'inondation en région alpine* (rapport). European programm Interreg II, France-Italie, 135-176.

Brochot, S., Marchi, L., 2000. Les cônes de déjection torrentiels dans les Alpes françaises : morphométrie et processus de transport solide torrentiel. *Revue de Géographie Alpine*, 88(3), 23-38.

Buchanan, P., Savigny, K.W., 1990. Factors controlling debris avalanche initiation. *Can. Geotech. J.*, 30, 71-81.

Bufalo, M., 1989. *L'érosion des Terres Noires dans la région du Buëch (Hautes-Alpes, France)*. Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille, 230p.

Byars, B.W., Allen, P., Bingham, N.L., 1999. A portable rainfall simulator for infiltration assessment. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51, 27-43.

Cai, Z.Y., 1992. *A preliminary study of the relationship between heavy rainfall and serious debris flow*. In Walling, D.E., Davies, T.R., Hasholt, B. (Eds): Erosion, debris flows and environment in mountain regions, University of Exeter, Department of Geography, Exeter, United Kingdom, IAHS AISH Publication 209, 201-205.

Caine, N., 1980. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris-flows. *Geografiska Annaler*, 62, 23-27.

Calcaterra, D., Parise, M., Palma, B., 2003. Combining historical and geological data for the assessment of landslide hazard: a case study from Campania, Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3(1), 3-16.

Campbell, R.H., 1975. *Soil slips, debris flows and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, Southern California*. U.S. Geological Survey Professional Paper 851, 51p.

Campy, M., Macaire, J.-J., 1989. *Géologie des formations superficielles : géodynamique, faciès, utilisation*. Masson, Paris, 448p.

Cannon, S. H., Ellen, S., 1985. Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay region, California. *California Geology*, 38(12), 267-272.

Canuti, P., Casagli, N., Catani, F., Falorni, G., 2002. Modeling of the Guagua Pichincha volcano (Ecuador) lahars. *Phys. Chem. Earth* (C), 27(36), 1587-1599.

Capecchi, F., Focardi, P., 1988. *Rainfall and landslides: Research into a critical precipitation coefficient in an area of Italy*. In : landslides, edited by : Bonnard, C., Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, Balkema, Rotterdam, 2, 1131-1136.

Caris, J.P.T., Van Asch, T.W.J., 1991. Geophysical, geotechnical and hydrological investigations of a small landslide in the French Alps. *Engineering Geology*, 31: 249-276.

Cartier, G., Pouget, P., 1988. *Etude du comportement d'un remblai construit sur un versant instable : le remblai expérimental de Sallèdes, Puy-de-Döme*. Rapport de Recherche des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N°15, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 126p.

Casale, R., Margottini, C., 1999. *Floods and landslides. Integrated Risk Assessment*. Springer, Berlin, 373p.

Casenave, A., 1982. Le mini-simulateur de pluie : conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. *Cahier ORSTOM, Série Hydrologie*, XIX(4), 207-227.

Catenacci, V., 1992. *Geological and geoenvironmental failure from the post-war to 1990, Italy*. Servizio Geologico Nazionale, Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia, 301-310.

Cenderelli, D.A., Kite, S., 1998. Geomorphic effects of large debris flows on channel morphology at North Fork Mountain, Eastern West Virginia, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 1-19.

CHADULE (Groupe), 1994. *Initiations aux pratiques statistiques en géographie*. Masson, 3ème édition, 203 p.

Charlier, C., Decrop, G., 1997. *De l'expertise scientifique au risque négocié : le cas du risque en montagne*. Editions Cemagref, Antony, 101p.

Chen, C.-L., 1988a. Generalized viscoplastic modelling of debris-flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(3), 237-258.

Chen, C.-L., 1988b. General solutions for viscoplastic debris-flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(3), 259-282.

Chen, H., Lee, C.F., 2000. Numerical simulation of debris flows. *Can. Geotech. J.*, 37, 146-160.

Chen, H., 2006. Controlling factors of hazardous debris flow in Taiwan. *Quaternary International*, 147, 3-15.

Chondroyannis, P., 1992. *L'Ubaye, la forêt reconstruite. Le sentier de découverte du Riou-Bourdoux*. Editions de l'Office National des Forêts, Paris, 112p.

Chorley, R., Morgan, M.A., 1956. Some neglected source material in quantitative geomorphology; *Journal of Geology*, 64, 422-423.

Cinque, A., Robustelli, G., Scarciglia, F., Terribile, F., 2000. *The dramatic cluster of pyroclastic debris flows which occurred on 5th and 6th May in the Sarno Mountains (Vesuvius Region, Southern Italy): a geomorphological perspective.* In Broomhead, E., Dixon, N., Ibsen, M.L. (Eds): Landslides in research theory and practise, Proceedings of the VIII International Symposium on Landslides, Cardiff, June 26-30 2000, Thomas Telford, 1, 273-278.

Cojean, R., Bonnet-Staub, I., 1998. Mécanismes d'initiation des laves torrentielles dans les Alpes Françaises. 8ème congrès de l'AIGI, Vancouver, 21-25 septembre 1998, 3, 2075-2082.

Colas, G., Locat, J., 1993. Glissement et coulée de La Valette dans les Alpes de Haute-Provence : présentation générale et modélisation de la coulée. *Bulletin de Liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées* , 187, 19-28.

Colombani, J., Lamgat, J.-P., Thiebaux, J., 1972. Mesure de la perméabilité des sols en place : un nouvel appareil pour la méthode Muntz, une extension de la méthode Porchet aux sols hétérogènes. *Cahier ORSTOM, Série Hydrologie*, IX(3), 15-44.

Corominas, J., 1995. Evidence of basal erosion and shearing as mechanisms contributing the development of lateral ridges in mudslides, flowslides, and other flow-like gravitational movements. *Engineering Geology*, 39, 45-70.

Corominas, J., 2000. *Landslides and climate*. In Broomhead, E., Dixon, N., Ibsen, M.L. (Eds): Landslides in research theory and practise, Proceedings of the VIII International Symposium on Landslides, Cardiff, June 26-30 2000, Thomas Telford, 1, 14-27.

Corominas, J., Moya, J., 1996. *Historical landslides in the Eastern Pyrenees and their relation to rainy event*. In Chacon, I.-F. (ed): Landslides, Balkema, A.A., Rotterdam/Brookfield, 125-132.

Corominas, J., Moya, J., 1999. Reconstructing recent landslides activity in relation to rainfall in the Llobregat river basin, Eastern Pyrenees, Spain. *Geomorphology*, 30, 79-93.

Costa, J.E., 1984. *Physical geomorphology of debris flows*. In Costa, J.E., Fleisher, P.J. (Eds): Developments and Applications in Geomorphology, Springer-Verlag, Heidelberg, 268-317.

Costa, J.E., 1987. *Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flows*. In Baker, V.R. Kochel, R.C. and Patton, P.C. (Eds): Flood Geomorphology, New York, John Wiley & Sons, 113-122.

Couarraze, G., Grossiord, J.-L., 1983. *Initiation à la rhéologie*. Technique et Documentation, Lavoisier, Paris, 283p.

Coussot, P., 1993. *Rhéologie des boues et laves torrentielles. Etude de dispersions et suspensions concentrées*. Editions Cemagref, Antony, 415p.

Coussot, P., 1994. Steady, laminar flow of concentrated mud suspensions in open channel. *Journal of Hydraulic Research*, 32(4), 535-560.

Coussot, P., 1996. *Les laves torrentielles. Connaissances à l'usage du praticien*. Collection Etudes, Série Equipement pour l'Eau et l'Environnement, Cemagref Editions, Anthony, 177p.

Coussot, P., 1997. *Mudflow Rheology and Dynamics*. Balkema, Rotterdam, 255p.

Coussot, P., 1999. *Rhéophysique des pâtes et des suspensions*. EDP Sciences, 280p.

Coussot, P., Laigle, D., Arattano, M., Deganutti, A., Marchi, L., 1998. Direct determination of rheological characteristics of debris flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124, 865-868

Coussot, P., Meunier, M., 1996. Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Review*, 40, 209-227.

Coussot, P., Piau, J.-M., 1990. *Some considerations on debris flow rheology*. In Ergenzinger, P., Schmidt, K.H. (Eds.): Dynamics and Geomorphology of Mountain Rivers, Lectures Notes in Earth Sciences, Springer-Verlag, Berlin, 52, 315-326.

Coussot, P., Piau, J.M., 1994. On the behavior of fine mud suspensions. *Rheologica Acta*, 33, 175-184.

Coussot, P., Proust, S., 1996. Slow, unconfined spreading of a mudflow. *Journal of Geophysical Research*, 101(25), 217-229.

Coussot, P., Proust, S., Ancey, C., 1996. Rheological interpretation of deposits of yield stress fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 66, 55-70.

Crosta, G.B., 1998. Regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslides hazard evaluation. *Env. Geol.*, 35(2-3), 131-145.

Crosta, G.B., 2001. Failure and flow development of a complex slide: the 1993 Sesa landslide. *Engineering Geology*, 59, 173-199.

Crosta, G.B., Marchetti, M., 1990. *Morphological classifications of debris-flow processes*. In South-Central Alps (Italy), 6th Int. IAEG Congress, Rotterdam, 1565-1572.

Crosta, G.B., Savage, W.Z., Guzetti, F., 1992. *Modeling flow development near obstructions of mass*. In Bell, D.H. (Ed): Proceedings of the 6th International Symposium on Landslides, Christchurch, New-Zealand, Balkema, Rotterdam, 53-58.

Crozier, M.J., Eyles, R.J., 1980. *Assessing the probability of rapid mass movements*. N.Z. Inst. Eng. Proc. Tech. Groups, 6, 1 (G), 247-251.

Cruden, D.M., Varnes, D.J., 1996. *Landslide Types and Processes*. In Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds): Landslides, Investigation and Mitigation. Transportation Research Board - National Research Council, Special Report 247, National Academy Press, New-York, 36-75.

Cundall, P.A., 1993. FLAC User Manual. Itasca Consulting Group, Inc.

Cundall, P.A., 1995. FLAC User Manual, Version 3.3. Itasca Consulting Group, Inc.

Curry, R.R., 1966. Observations of alpine mudflows in the Tenmile Range, Central Colorado. *Bulletin of the Geological Society of America*, 77, 771-776.

D'Agostino, V., 1996. *Analisi quantitativa e qualitativa del trasporto solido torrentizio nei bacini montani del Trentino Oriental*. AIIA, I problemi dei grandi comprensori irrigui, Novara 6-7 giugno, 111-123.

D'Agostino, V., Cerato, M., Coali, R., 1996. *Il transporto solido di eventi estremi nei torrenti del Trentino Orientale*. Int. Symp. Interpraevent (conference proceedings), 377-386.

D'Ambrosio, D., Di Gregorio, S., Iovine, G., Lupiano, V., Merenda, L., Rongo, R., Spataro, W., 2002. Simulating the Curti-Sarno debris flow through Cellular Automata: the model SCIDDICA (release S_2). *Phys. Chem. Earth*, 27, 1577-1585.

Dai, F., Lee, C.F., Wang, S., Feng, Y., 1999. Analysis of rainstorm-induced slide-debris flows on natural terrain of Lantau Island, Hong Kong, *Engineering Geology*, 51, 279-290.

Dalton, F.N., Herkelrath, D.S., Rawlins, D.S., Rhoades, D.J., 1984. Time-Domain Reflectrometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science*, 224, 989-990.

Dauphiné, A, 2001. *Risques et catastrophes*. Armand Colin.

Davidson, M.R., Hasan Khan, N., Leong Yeow, Y., 2000. Collapse of a cylinder of Bingham fluid. *Anziam J.*, 42, 499-517.

Davies, T.R.H., 1986. Large debris flows: macro-viscous phenomenom. *Acta Mechanica*, 63, 161-178.

Davies, T.R.H., McSaveney, M.J., 2003. *Runout of rock avalanches and volcanic debris avalanches* (invited keynote lecture). In Picarelli, L.D. (Ed): Proceedings of the International Conference on Fast Slope Movements: Prediction, Prevention for Risk Mitigation, Naples, May the 11-13, 2003, 2-9.

Davis, R.O., Smith, N.R., Salt, G., 1990. Pore fluid frictional heating and stability of creeping landslides. *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 14, 427-443.

Delahaye D. (2002) - *Apport de l'analyse spatiale en Géomorphologie. Modélisation et approche multiscalaire des risques*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université de Rouen, 471p.

Delsigne, F., Lahousse, P., Flez, C., Guiter, G. 2001. Le Riou Bourdoux: un 'monstre' alpin sous haute surveillance. *Revue Forestière Française*, 5, 527-541.

Denlinger, R.P., Iverson, R.M., 2001. Flow of variably saturated granular masses across three-dimensional terrain –2. Numerical predictions and experimental tests. *Journal of Geophysical Research*, 106(B1), 537-552.

Descroix, L., Olivry, J.C., 2002. Spatial and temporal factors of erosion by water of black marl in the badlands of the French Southern Alps. *Hydrological Sciences Journal*, 47(2), 227-242.

Deymier, C., Tacnet, J.-M., Mathys, N., 1994. *Conception et calcul de barrages de correction torrentielle*. Collection Etudes, Série Equipement pour l'Eau et l'Environnement, Cemagref Editions, Anthony, 287p.

Dikau, R., 1999. *The recognition of landslides*. In Casale, R., Margottini, C. (Eds): Floods and Landslides: Integrated Risk Assessment, Amsterdam, 39-44.

Dikau, R., 2004. Mass Movement. In Goudie, A. (Ed): Encyclopedia of Geomorphology, 644-652.

Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L., Ibsen, M.-L., 1996a. *Landslide Recognition: Identification, Movement and Causes*. Wiley, Chichester, 251p.

Dikau, R., Cavallin, A., Jäger, S., 1996b. Data bases and GIS for landslide research in Europe. *Geomorphology*, 15, 227-239.

Douvinet J., 2004. *Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes : les bassins versants sensibles aux crues rapides*. Mémoire de DEA, Université de Caen,108p.

Duncan, J.M., and Wright, S.G., 1980. The Accuracy of Equilibrium Methods of Slope Stability Analysis. *Engineering Geology*, 16(1-2), 5-17.

Durville, J.-L., 1992. Mécanismes et modèles de comportement des grands mouvements de versant. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 27, 25-42.

El Amrani Paaza, N.El, Lamas, F., Irigaray, C., Chacon, J., 1998. Engineering geological characterization of Neogene marls in the Southeastern Granada Basin. *Engineering Geology*, 50, 165-175.

Ellen, S., Fleming, R.W., 1987. Mobilization of debris flows from soil slips, San Francisco Bay region, California. Geological Society of America. *Reviews in Engineering Geology,* Volume VII, 31-40.

Einstein, H.H., 1988. *Special lecture. Landslide risk assessment procedure*. In Bonnard, C. (Ed): Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, Switzerland, 1075-1090.

Evans, S.G., Hungr, O., Clague, J.J., 2001. Dynamics of the 1984 rock avalanche and associated distal debris flow on Mount Cayley, British Columbia, Canada; implications for landslide hazard assessment on dissected volcanoes. *Engineering Geology*, 61, 29-51.

Evin, M., 1997. *Géologie de l'Ubaye*. Editions Sabença de la Valeia, Barcelonnette, 32p.

Fan, J.C., Liu, C.H., Wu, M.F., Yu; S.K., 2003. *Determination of critical rainfall thresholds for debris-flow occurrence in central Taiwan and their revision after the 1999 Chi-Chi great earthquake*. In Rickenmann, D., Chen, L.C. (Eds): Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Davos,Switzerland, Millpress, Rotterdam, 103-114.

Fannin, R.J., Rollerson, T.P., 1993. Debris flows: some physical characteristics and behaviour. *Can. Geotech. J.*, 30, 71-81.

Fell, R., 1994. Landslide risk assessment and acceptable risk. *Can. Geotech. J.*, 31, 261-272.

Fell, R., Hartford, D., 1997. *Landslide Risk Management*. In Cruden, D.M., Fell, R. (Eds): Landslide Risk Assessment, Balkema, Rotterdam, 51-109.

Ferraris, C., de Larrard, F., 1998. Modified Slump Test to measure rheological parameters of fresh concrete. *Cement, Concrete, and Aggregates*, 20(2), 241-247.

Filice, E., Versace, P., 1990. *Identificazione delle piogge capaci di innescare movimenti franosi*. Atti del XXII Convegno di Iraulica e Costruzioni Idrauliche. Cosenza, 4-7 Ottobre.

Fink, J.H., Malin, M.C., D'Alli, R.E., Greeley, R., 1981. Rheological properties of mudflows associated with the spring 1980 eruption of Mount St Helens volcano, Washington. *Geophys. Res. Lett.*, 8, 43-46.

Flageollet, J.-C., 1988. *Les mouvements de terrain et leur prévention*. Masson, Paris, 224p.

Flageollet, J.-C., 1996. The time dimension in the study of mass movements. *Geomorphology*, 15, 185-190.

Flageollet, J.-C., Maquaire, O, Martin, B., Weber, D., 1999. Landslides and climatic conditions in the Barcelonnette and Vars basins (Southern French Alps, France). *Geomorphology*, 30, 65-78.

Fraccarollo, L., Toro, E.F., 1995. Experimental and numerical assessment of the shallow water model for two-dimensional dam-break type problems. *Journal of Hydraulic Research*, 33(6), 843-864.

Franzi, L., Bianco, G., 2001. A statistical method to predict debris-flow deposited volumes on a debris fan. *Phys. Chem. Earth* (C), 26(9), 683-688.

Frederick, D., Chang, T.S., 1972. *Continuum mechanics*. Scientific Publishers, Cambridge, 218p.

Fujihara M., Borthwick, A.G.L., 2000. Godunov-type solution of curvilinear shallow-water equations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(11), 827-836.

Garitte, G., Lahousse, P., 2002. Contribution à l'évaluation de l'aléa torrentiel dans le basin versant du Riou Chanal (Alpes-de-Haute-Provence). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2002-1 : 61-70.

Garnier, P., Lecompte, M., 1996. Essai sur les mécanismes de fragmentation des marnes des Baronnies (France). *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement*, 1996-1, 23-50.

Genet, J., Malet, J.-P., 1997. *Détermination de la structure tridimensionnelle du glissement de terrain de Super-Sauze par une investigation géotechnique*. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 138p.

Genevois, R., Galgaro, A., Tecca, P.R., 2001. Image analysis for debris-flow properties estimation. *Phys. Chem. Earth* (C), 26(9), 623-631.

Genevois, R., Marchi L., Tecca P.R., 1995. *Influence of mechanical behaviour of soils in debris flows initiation*. Proceedings XX IUFRO World congress, Tampere, Finland, 13-25.

Georgin, J.-P., 2002. *Analyse interactive des données (ACP, AFC) avec Excel 2000, théorie et pratique*. Presses Universitaires de Rennes, 264p.

Geoslope Inc, 1998. *SEEP/SLOPE. User Manual*. Geoslope, Ottawa, 875p.

Ghilardi, P., Natale, L., Davi, F., 2001. Modeling debris-flow propagation and deposition. *Phys. Chem. Earth* (C), 20(9), 651-656.

Gökçeoglu, C., Ulusay, R., Sönmez, H., 2000. Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles. *Engineering Geology*, 57, 215-237.

Gould, H., Tobochnik, J., 1988. *An Introduction to Computer Simulation Methods*. Addison-Wesley.

Govi, M., Mortara, G., Sorzana, P.F., 1985. Eventi idrologici e frane. *Geol. Appl. E Idrog.*, 20(2), 359-375.

Govi, M., Turitto, O., 1997. *Recent and past floods in Northern Italy*. River Flood Disasters, ICSU, SC/IDNDR Workshop, Koblenz, Germany, 13-32.

Green, W.H., Ampt, G.A., 1911. Studies in soil physic: the flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, 4, 1-24.

Guillon, J., 2001. *Interprétation morphologique de l'évolution du glissement-coulée de Poche et caractérisation physico-mécanique des matériaux marneux (Alpes-de-Haute-Provence, France)*. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 118p.

Guzzetti, F., 2000. Landslide fatalities and evaluation of landslide risk in Italy. *Engineering Geology*, 58, 89-107.

Hampel, R., 1977. Geschiebewirtschaft in Wildbächen. *Wildbach und Lawinenverbau* 41, 3-34.

Hansen, A., 1984. *Landslide hazard analysis*. In: Slope Instability, Chapter 13, edited by Breundsen, D. and Prior, D.B., Wiley, New York, 563-602.

Haverkamp, R., Parlange, J.-Y., Starr, J.-L., Schmitz, G., Fuentes, C., 1990. Infiltration under ponded conditions: a predictive equation based on physical parameters. *Soil Science*, 149(5), 292-300.

He, Y.P., Xie, H., Cui, P., Wei, F.Q., Zhong, D.L., Gardner, J.S., 2003. GIS-based hazard mapping and zonation of debris flows in Xiaojiang Basin, southwestern China. *Env. Geol.*, 45, 286-293.

Hector, A.-F., 2003. *Comparison between numerical computation of muddy debris-flow spreading and records of real event. Application to the Morschergraben torrent (Austria), the Wartschenbach (Austria), the Varunash (Schweiz)*. DEA 'Mécanique et Ingénierie', option 'Sciences de l'Eau', Université Louis Pasteur, Strasbourg, 81p.

Heermann, D.W., 1990. *Computer simulation methods in theoretical physics*. 2nd edition, Springer Verlag, Heidelberg.

Herrmann, D., 1997. *Recherches des caractéristiques physiques et géotechniques des 'Terres Noires' du glissement de terrain de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence)*. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 127p.

Hey, J.K., Thorne, G.H., 1981. Accuracy of surface samples from gravel bed material. *Journal of Hydraulic Engineering, American Association of Civil Engineers*, 109(2), 41-77.

Hillel, D., 1984. *L'eau et le sol : principes et processus physiques.* Editions Cabay, Louvain-la-Neuve, 277p.

Horton, R. E., 1932. Drainage basin characteristics: *Am. Geophys. Union Trans.*, 13, 350-361.

Horton, R.E., 1940. An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 423-430.

Hübl, J, Steinwendtner, H., 2001. Two-dimensional simulation of two viscous debris flows in Austria. *Phys. Chem. Earth* (C), 26(9), 639-644.

Hungr, O., 1995. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows and avalanches. *Can. Geotech. J.*, 32(4), 610-623.

Hungr, O., 2000. Analysis of debris flow surges using the theory of uniformly progressive flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 1-13.

Hungr, O., Dawson, R., Kent, A., Campbell, D., Morgenstern, N.R., 2002. *Rapid flow slides of coal mine waste in British Columbia, Canada*. In Evans, S.G., DeGraff, J. (Eds): Catastrophic Landslides. Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology 15, 191-208.

Hungr, O., Evans, S.G., 1996. *Rock avalanche runout prediction using a dynamic model*. In Senneset, K. (Ed): Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway, Balkema, Rotterdam, 233-238.

Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J., Hutchinson, J.N., 2001. A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, 7, 221-238

Hungr, O., Morgan, G.C., Kellerhals, R., 1984. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Can. Geotech. J.*, 21, 663-667.

Hungr, O., Morgan, G.C., Van Dine, D.F., 1987. *Debris flow defenses in British Columbia*. In Costa, J.E., Wieczorek, G.F. (Eds): Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition and Mitigation. Geological Society of America, Boulder, Colorado, 201-221.

Hürlimann, M., 2000. *Back analysis of Swiss debris flows events, Description of the results obtained from the FLO-2D simulations carried out during 2000*. Internal Report of the Swiss Federal Institute WSL, Water Soil and Rock Movements, Zürich, 54p.

Hürlimann, M., Rickenmann, D., Graf, C., 2003. Field and monitoring data of debris-flow events in the Swiss Alps. *Can. Geotech. J.*, 40, 161-175.

Hutchinson, J.N., 1986. A sliding-consolidation model for flow slides. *Can. Geotech. J.*, 23, 115-126.

Hutchinson, J.N., 1988. *Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology*. In Bonnard, C. (Ed): Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, Switzerland, Balkema, Rotterdam, 3-31.

Hutter, K.B., Svendsen, Rickenmann, D., 1996. Debris flow modelling: A review. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 8, 1-35.

Ikeya, H., 1989. Debris flow and its counter measures in Japan. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* 40, 15-33.

Imran, J., Harff, P., Parker, G., 2001. A numerical model of submarine debris flow with graphical user interface. *Computer and Geoscience*, 27, 721-733.

Imran, J., Parker, G., Locat, J., Lee, H., 1999. 1D Numerical model of muddy subaqueous and subaerial debris flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(11): 959-968.

Innes, J.L., 1983. Debris flows. *Progress in Physical Geography*, 7-4, 469-501

Iovine, G., Di Gregorio, S., Lupiano, V., 2003. *Assessing debris-flow susceptibility through cellular automata modelling: an example from the May 1998 disaster at Pizzo d'Alvano (Campania–Southern Italy)*. In Rickenmann, D., Chen, L.C. (Eds): Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Davos, Switzerland, Millpress, Rotterdam, 623-634.

Iverson, R.M., 1997a. The physics of debris flows. *Review in Geophysics*, 35, 245–296.

Iverson, R.M., 1997b. *Hydraulic modeling of unsteady debris-flow surges with solid-fluid interactions*. In Chen, C.-L. (Ed): Proceedings of the 1st International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, San Francisco, United States, American Society of Civil Engineers, New-York, 550-560.

Iverson, R.M., 2003. *The debris flow rheology myth*. In Rickenmann, D., Chen, L.C. (Eds): Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Davos,Switzerland, Millpress, Rotterdam, 303-314.

Iverson, R.M., Denlinger, R.P., 2001a. Flow of variably saturated granular masses across three-dimensional terrain –I. Coulomb mixture theory. *Journal of Geophysical Research*, 106(B1), 537-552.

Iverson, R.M., Denlinger, R.P., 2001b. *Mechanics of debris flows and debris-laden flash floods*. In Proceedings of the 7th Federal Interagency Sedimentation Conference, Marsh, Reno, Nevada, 25-29.

Iverson, R.M., LaHusen, R.G., 1989. Dynamic pore-pressure fluctuations in rapidly shearing granular materials. *Science*, 246, 769-799.

Iverson, R.M., LaHusen, R.G., 1993. *Friction in debris flows: Interferences from large-scale flume experiments*. Hydraulic Engineering '93 (Proceedings of the 1993 Conference of the Hydraulics Division of the American Society of Civil Engineers), vol. 2, Am. Soc. Of Civ. Eng., New York, 1604-1609.

Iverson, R.M., LaHusen, R.G., Major, J.J., Zimmerman, C.L., 1994. Debris flows against obstacle and bends: Dynamic and deposits. *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, 75, 274.

Iverson, R.M., Reid, M.E., LaHusen, R.G., 1997. Debris-flow mobilization from landslides. *Annual Revue on Earth and Planetary Science*, 25, 85-138.

Iverson, R.M., Schilling, S.P., Vallance, J.W., 1998. Objective delineation of lahar inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, 110(8), 972-984.

Iverson, R.M., Vallance J.W., 2001. New views of granular mass flows. *Geology*, 29(2), 115-118.

Jakob, M., Anderson, D., Fuller, T., Hungr, O., Ayotte, D., 2000. An unusually large debris-flow at Hummingbird Creek, Mara Lake, British Columbia. *Can Geotech. J.*, 37, 1109-1125.

Jakob, M., Hungr, O., Thompson, B., 1997. *Two debris flows with anomalously high magnitude*. In Chen, C.-L. (Ed): Proceedings of the 1st International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment, San Francisco, American Society of Civil Engineers (ASCE), 382-394.

Jan, C.D., Shen, H.W., 1997. *Review dynamic modeling of debris flows*. In Armanini, A., Michiue, M. (Eds): Recent Developments on Debris Flows. Springer-Verlag, Berlin, 93-113.

Janbu, N., 1954. Application of Composite Slip Surface for Stability Analysis. European Conference on Stability Analysis, Stockholm, Sweden.

Jiang, L., Leblond, P.H., 1993. Numerical modelling of an underwater Bingham plastic mudslide and the waves which it generates. *Journal of Geophysical Research*, 98(C6): 10303-10317.

Jibson, R.W., 1989. *Debris flows in southern Puerto Rico*. In Schultz, A.P. and Jibson, R.W. eds, Landslide Processes in Eastern North America and Puerto Rico: Geological Society of America Special Paper 236, 29-55.

Johnson, A.M., 1965. *A model for debris flow*. PhD Thesis, Pennsylvania State University, 189p.

Johnson, A.M., 1970. *Physical Processes in Geology*. Freeman, W.H., New York, 577p.

Johnson, A.M., 1984. *A Method for Interpretation of Natural Phenomena; Intrusions in Igneous rocks, Fractures, and Folds, Flows of Debris and Ice*. Freeman and Cooper, San Francisco, 245p.

Johnson, A.M., 2003. *Use of Claude Bernard's scientific method to understand debris flow*. In Rickenmann, D., Chen, L.C. (Eds): Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Davos,Switzerland, Millpress, Rotterdam, 3-21.

Johnson, A.M., Rodine, J.R., 1984. *Debris flow*. In Brundsen, D., Prior, D.B. (Eds): Slope Instability, Wiley, Chichester, 257-361.

Johnson, K.A., Sitar, N., 1990. Hydrologic conditions leading to debris-flow initiation. *Can. Geotech. J.*, 27, 789-801.

Jorda, M., 1980. Morphogenèse et évolution des paysages des Alpes de Haute-Provence depuis le Tardiglaciaire. Facteurs naturels et facteurs anthropiques. *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, 472, 295-304.

Jorda, M., 1992. Morphogenèse et fluctuations climatiques dans les Alpes françaises du Sud, de l'Age du Bronze au haut Moyen-Age. *Les Nouvelles de l'Archéologie,* 50, 14-20.

Julian, M., Anthony, E., 1993. *Landslides and climatic variables with specific reference to the Maritime Alps of Southern France*. In Flageollet, J.-C. (ed): Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community, Final report. European Community Programme EPOCH, Contract 90 0025, Strasbourg, 697-712.

Karlsrud, K., Edgers, L., 1982. *Some aspects of submarine slope stability*. Proceedings of the NATO Workshop on Marine Slides and other Mass Movements, Plenum Pub.

Khegai, A.Y., Popov, N.V., Plekhanov, P.A., Keremkulov, V.A., 1992. *Experiments at the Chemolgan debris-flow testing ground, Kazakhstan*. Landslide News, 6, Jpn. Landslide Soc., Kyoto, 27-28.

Kiersch, G.A., 1964. Vajont Reservoir disaster. *Civil Engineering*, 4(3), 32-39.

Klotz, S., 1998. *Recherches sur l'altérabilité et les caractéristiques géomécaniques des marnes noires de la coulée de Super-Sauze*. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 161p.

Klotz, S., 1999. *Caractéristiques physiques et mécaniques des marnes noires callovo-oxfordiennes : application au glissement-coulée de Super-Sauze*. Mémoire de DEA 'Systèmes Spatiaux et Environnement', Université Louis Pasteur, Strasbourg, 142p.

Koulinski, V., 2004. *Etude hydraulique du torrent de Faucon*. Rapport ETRM, 46p.

Kronfellner-Kraus, G., 1985. *Quantitative estimation of torrent erosion*. International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention (conference proceedings), Tsukuba, Japan, 107-110.

Krüger, S., 2001. *Computational contribution to highly supercritical flows*. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Mitteilung N°103, ETH Zürich, 127p.

Kutilek, M., Nielsen, D.R., 1994. *Soil Hydrology*. Catena Verlag, Reiskirchen, 384p.

Lahousse, P., Salvador, P.-G., 2002. Évaluation de la dangerosité du torrent de Verdarel (Hautes-Alpes, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 2002-1, 93-103.

Laigle, D., 1996. *Two-dimensional modelling of debris-flow spreading on alluvial fans*. In Müller, A. (Ed): Proceedings of the 2nd International Conference on Hydroinformatics, Zurich, Switzerland, Balkema, Rotterdam, 651-657.

Laigle, D., 1997. *A two-dimensional modelling for the study of debris flow spreading on a torrent debris fan*. In Chen, C.-L. (Ed): Proceedings of the 1st International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, San Francisco, United States, American Society of Civil Engineers, New-York, 123-132.

Laigle, D., 1998. La modélisation des écoulements de laves torrentielles boueuses. De la validation au laboratoire au zonage des risques sur le terrain. *Ingénieries EAT*, 15, 79-88.

Laigle, D., Coussot, P., 1994. Numerical modelling of debris flows. *La Houille Blanche*, 3, 50-56.

Laigle, D., Coussot, P., 1997. Numerical modelling of mudflows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(7), 617-623.

Laigle, D., Hector, A.-F., Hübl, J., Rickenmann, D., 2003. *Comparison of numerical simulation of muddy debris flow spreading to records of real events*. In Rickenmann, D., Chen, L.C. (Eds): Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Davos, Switzerland, Millpress, Rotterdam, 635-646.

Laigle, D., Marchi, L., 2000. *Example of mud/debris-flow hazard assessment using numerical model*. In Wieczorek, G.F., Naeser, N.D. (Eds): Proceedings of the 2nd International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, Taipei, Taiwan, Balkema, Rotterdam, 417-424.

Lambe, T.W., Whitman, R.V., 1979. *Soil Mechanics*, Wiley & Sons, New York, 553p.

Lambert, R., 1996. *Géographie du cycle de l'eau*. Presses Universitaires du Mirail, Toulouse, 439 p.

Laugier, P., 2002. *Contribution à l'analyse des risques naturels en montagne par l'étude géologique et géotechnique de scénarios de mouvements de versants et laves torrentielles.* Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 225p.

Lavigne, F., 2000. Lahars hazard micro-zonation and risk assessment in Yogyakarta city, Indonesia. *Geo Journal*, 49(2), 131-138.

Lavigne, F., 2004. Rate of sediment yield following small-scale volcanic eruptions: a quantitative assessment at the Merapi and Semeru stratovolcanoes, Java, Indonesia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 1045-1058.

Lavigne, F., Thouret, J.-C., Voight, B., Suwa, H., Sumaryono, A., 2000. Lahars at Merapi volcano, Central Java: an overview. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100(1-4), 423-456.

Ledoux, B., 1995. *Les catastrophes naturelles en France*. Payot et Rivages, Paris, 455p.

Légier, A. 1977. *Mouvement de terrain et évolution récente du relief dans la région de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence)*. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 163p.

Lehmann, C., Spreafico, M., Naef, O., 1996. *Empfehlung zur Abschätzung von Feststoffrachten in Wildbächen*. Communication n°4, Teil II, Service hydrologique et géologique national, Bern, 46 p.

Lenzi, M.A., D'Agostino, V., Gregoretti, C., Sonda, D., 2003. *A simplified numerical model for debris flow hazard assessment*. In Rickenmann, D., Chen, L.C. (Eds): Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Davos, Switzerland, Millpress, Rotterdam, 611-622.

Léone, F., Asté, J.-P., Leroi, E., 1996. *Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movement: working toward a better risk perception* In Senneset, K. (Ed): Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway, Balkema, Rotterdam, 263-269.

Leong, Y., Hok, Lee, H.L., Melvani, A.R., Mifsud, G.C., 2003. A new method of processing capillary viscometry data in the presence of wall slip. *Journal of Rheology*, 47(2), 3-21.

Leroi, E., 1996. *Landslides hazard-risk maps at different scales: objectives, tools and development*. In Senneset, K. (Ed): Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway, Balkema, Rotterdam, 35-51.

Leroueil, S., Hight, D.W., 2002. *Behaviour and properties of natural soils and soft rocks.* In Tan, T.S., Phoon, K.K., Leroueil, S., Hight, D.W. (Eds): Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, Swets & Zeitlinger, Lisse, 29-254.

Li, J., Yuan, J., 1983. The main features of the mudflows in Jiang-Jia Ravine. *Z. Geomorphol.*, 27, 326-341.

Li, A.N., Zhou, W.C. and Jiang, X.B., 2003. Dynamic change of land use/land cover during 15 years in upper reaches of Minjiang River supported by RS and GIS. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17, 153-156.

Liu, K.F., Mei, C.C., 1989. Slow spreading of a sheet of Bingham fluid on an inclined plane. *Journal of Fluid Mechanics*, 207, 505-529.

Livet, M., 1976. *Etude hydrogéologique des formations de pente de la butte d'Armance.* Rapport de Recherche du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 52, 108p.

Llamas, J., 1993. *Hydrologie générale : principes et applications*, Gaëtan Morin.

Locat, J., 1997. *Normalized rheological behaviour of fine muds and their flow properties in a pseudoplastic regime*. In Chen, C.-L. (Ed): Proceedings of the 1st International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, San Francisco, United States, American Society of Civil Engineers, New-York, 260-269.

Locat, J., Demers, D., 1988. Viscosity, yield stress, remoulded strength and liquidity index relationships for sensitive clays. *Can. Geotech. J.*, 25, 799-806.

Locat, J., Lee, H.J., 2004. *Subaqueous debris flows*. In Hungr, O., Jakob, M. (Eds): Debris Flows Hazards and Related Phenomena, Ch. 9, pp. 203-245.

Locat, J., Lee, H.J., Locat, P., Imran, J., 2004. Numerical analysis of the mobility of the Palos Verdes debris avalanche, California and its implication for the generation of tsunamis. *Marine Geology*, 203, 269-280.

Locat, J., Lee, H.J., Nelson, C.H., Schwab, W.C. , Twichell, D.C., 1996. *Analysis of the mobility of far reaching debris flows on the Mississippi Fan, Gulf of Mexico*. In Senneset, K. (Ed): Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway, Balkema, Rotterdam, 555-560.

Lu, Z.Y., Cruden, D.M., 1996. Two debris-flow modes on Mount Cayley, British Columbia. *Can. Geotech. J.*, 33, 123-139.

Luckey, B.T., Sheffield, J., Bathurst, J.C., Hiley, R.A., Mathys, N., 2000. Test of Shetra technology for modelling the impact of reforestation on badlands runoff and sediment yield at Draix, France. *Journal of Hydrology*, 235: 44-62.

Lumb, P., 1975. Slope failures in Hong Kong. *Journal of Engineering Geology*, 8, 31-65.

MacKeown, P.K., Newman, D.J., 1987. *Computational techniques in physics.* Hilger.

Magnin, A., Piau, J.-M., 1990. Cone and plate rheometry of fluids with a yield stress. *J. Non-Newton Fluid Mech.* 36, 85-92.

Major, J.J., 1996. *Experimental studies of deposition by debris flows: Process, characteristics of deposits and effects of pore-fluid pressure*. Ph.D. dissertation, University of Washington, Seattle, 341 p.

Major, J.J., 1997. Depositional processes in large-scale debris flow experiments. *Journal of Geology*, 105, 345-366.

Major, J.J., 2000. Gravity-driven consolidation of granular slurries. Implications for debris flow deposition and deposit characteristics. *Journal of Sedimentary Research*, 70(1), 64-83.

Major, J.J., Iverson, R.M., 1999. Debris flow deposition. Effects of pore fluid pressure and friction concentrated at flow margins. *Geological Society of America Bulletin*, 111, 1424-1434.

Major, J.J., Pierson, T.C., 1992. Debris-flow rheology: experimental analyses of fine-grained slurries. *Water Resources Research*, 28(3), 841-857.

Malet, J.-P., 2003. *Les glissements de type écoulement dans les marnes noires des Alpes du Sud. Morphologie, fonctionnement et modélisation hydro-mécanique*. Thèse de Doctorat en Sciences de la Terre, Géomorphologie Dynamique. Université Louis Pasteur, Strasbourg, 364p.

Malet, J.-P., Ambroise, B., Auzet, A.-V., Descroix, L., Estèves, M., Maquaire, O., Vandervaere, J.-P., 2001. *Effets des états de surface sur l'entrée de l'eau dans les marnes noires de la coulée de Super-Sauze (Alpes de Haute-Provence, France). Premiers résultats expérimentaux associant descripteurs, simulation de pluie et infiltrométrie TRIMS*. Rapport Interne, Programme RIDES-PNRH, 32p.

Malet, J.-P., Laigle, D., Remaître, A., Maquaire, O., 2005. Triggering conditions and mobility of debris-flows associated to complex earthflows. *Geomorphology*, 66 (1-4), 215-235.

Malet, J.-P., Maquaire, O., Locat, J., Remaître, A., 2004b. Assessing debris-flow hazard associated to slow moving landslides. Methodology and numerical analyses. *Landslides* 1(1), 83-90.

Malet, J.-P., Maquaire, O., Remaître, A., 2004a. Muddy debris-flows hazard assessment. Runout modeling and extension of the threatened area. *Géomorphologie : processus, relief et environnement* 2004-3, 195-210.

Malet, J.-P., Remaître, A., Ancey, C., Locat, J., Meunier, M., Maquaire O., 2002. Caractérisation rhéologique des coulées de débris et des laves torrentielles du Bassin de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France). Premiers résultats. *Rhéologie*, 2002-1, 17-25.

Malet, J.-P., Remaître, A., Maquaire, O., Ancey, C., Locat, J., 2003b. *Flow susceptibility of heterogeneous marly formations. Implications for torrent hazard control in the Barcelonnette basin (Alpes-de-Haute-Provence, France)*. In: Rickenmann, D., Chen, C.-L. (Eds): Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Davos, Switzerland, Millpress, Rotterdam, 351-362.

Malet, J.-P., Remaître, A., Maquaire, O., Locat, J., 2003a. *Dynamics of distal debris-flows induced in clayey earthflows. Implications for hazard assessment*. In Picarelli, L. (Ed): Proceedings of the International Conference on Fast Slope Movements: Prediction and Prevention for Risk Mitigation, Napoli, Italy, Pàtron Editore, Bologna, 341-348.

Maquaire, O., 1990. *Les mouvements de terrain de la côte du Calvados. Recherche et prévention*. Documents du BRGM, 197, 431p.

Maquaire, O., 2002. *Aléas géomorphologiques (mouvements de terrain). Processus, Fonctionnement, Cartographie*. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 219p.

Maquaire, O., 2005. *Geomorphic Hazards and Natural Risks*. In E.A. Koster (Ed): The Physical Geography of Western Europe, Oxford University Press, 353-377.

Maquaire, O., Flageollet, J.-C., Malet, J.-P., Schmutz, M., Weber, D., Klotz ,S., Albouy, Y., Descloîtres, M., Dietrich, M., Guérin, R., et Schott, J.-J., 2001. Une approche multidisciplinaire pour la connaissance d'un glissement-coulée dans les marnes noires du Callovien-Oxfordien (Super Sauze, Alpes-de-Haute-Provence, France). *Revue Française de Géotechnique,* 95/96 : 15-32.

Maquaire, O., Malet, J.-P., Remaître, A., Locat, J., Klotz, S., Guillon, J. 2003. Instability conditions of marly hillslopes: towards landsliding or gullying? The case of the Barcelonnette Basin, South East France. *Engineering Geology*, 70(1-2): 109-130.

Maquaire, O, Ritzenthaler, A., Fabre, D., Thiery, Y., Truchet, E., Malet J-P., Monnet, J., 2002. Caractérisation des profils de formations superficielles par pénétrométrie dynamique à énergie variable : application aux marnes noires de Draix (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Comptes-Rendus Geosciences*, 334, 835-841.

Marchi, L., Arattano, M., Deganutti, A.M., 2002. Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps). *Geomorphology*, 46, 1-17.

Marchi, L., Brochot, S., 2000. Les cônes de déjection torrentiels dans les Alpes françaises, morphométrie et processus de transport torrentiel. *Revue de Géographie Alpine*, 88(3), 22-38.

Marchi, L., D'Agostino, V., 2004. Estimation of debris-flow magnitude in the Eastern Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 207-220.

Marchi, L., Trecca, P.R., 1996. Magnitudo delle colate detritiche nelle Alpi Orientali Italiane. Geoingegneria *Ambientale e Minerania 33 (2-3)*, 79-86.

Marr, J.G., Elverhoi, A., Harbitz, C., Imran, J., Harff, P., 2002. Numerical simulation of mud-rich subaqueous debris flows on the glacially active margins of the Svaldbard-Barents Sea. *Marine Geology*, 188, 351-364.

Martinet, G., 1992. *Contribution à la modélisation numérique des avalanches de neige dense et des laves torrentielles*. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 217p.

Massimo, A., 2000. On debris-flow evolution along a torrent. *Phys. Chem. Earth* (B) 25: 733-740.

MATE/MATL, 1999. *Plan de Prévention des Risques (PPR) : Risques de Mouvements de Terrain*. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE), Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement (METL). La Documentation Française, Paris.

Mathys, N., Brochot, S., Meunier, M., Richard, D. 2003. Erosion quantification in the small marly experimental catchments of Draix (Alpes-de-Haute-Provence, France). Calibration of the ETC rainfall-runoff-erosion model. *Catena*, 50(2-4), 527-548

McArdell, B.W., Zanuttigh, B., Lamberti, A., Rickenmann, D., 2003. *Systematic comparison of debris flow laws at the Illgraben torrent, Switzerland*. In Rickenmann, D., Chen, L.C. (Eds): Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Davos,Switzerland, Millpress, Rotterdam, 647-657.

McDougall, S., Hungr, O., 2005. Dynamic modelling of entrainment in rapid landslides. *Can. Geotech. J.*, 42(5), 1437-1448.

Mei, C.C., Liu, K.-F., Yuhi, M., 2001. *Mudflow: slow and fast*. In Balmforth, N.J., Provenzale, A. (Eds): Geomorphological Fluid Mechanics, Springer-Verlag, Heidelberg, 181-212.

Meunier, M., 1988. *Erosion et hydraulique torrentielle*. Session n°137 du Comité Technique (rapport) Société hydrotechnique de France, 32p.

Meunier, M., 1991. *Éléments d'Hydraulique Torrentielle*. Études Montagne, N°1, Editions Cemagref, Antony, 278p.

Meunier, M., 1994. Les progrès de la connaissance et les méthodes d'étude des phénomènes torrentiels. *La Houille Blanche* 45, 23-37.

Meunier, M., Carion, C., 1987. *Etude méthodologique de la détermination des courbes granulométriques des lits des cours d'eau*. Rapport Interne, Cemagref, Grenoble, 30p.

Miramont, C., 1998. *Morphogenèse, activité érosive et détritisme alluvial holocènes dans le bassin de la moyenne Durance*. Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille, 286p.

Mizuyama, T., Kobashi, S., Ou, G., 1992. *Prediction of debris-flow peak discharge.* Internationales Symposium Interpraevent Bern, Band 4, 99-108.

Mohrig, D., Elverhoi, Parker, G., 1999. Experiments on the relative mobility of muddy subaqueous and subaerial debris flows, and their capacity to remobilize antecedent deposits. *Marine Geology*, 154(1-4) : 117-129.

Morgenstern, N.R., 1997. *Towards landslide risk assessment in practice*. In Cruden, D.M., Fell, R. (Eds): Landslide Risk Assessment, Balkema, Rotterdam, 15-23.

Mulder, H.F.H.M., 1991. *Assessment of landslide hazard*. Netherlands Geographical Studies, Utrecht, 124, 149p.

Muller, L., 1968. The rock slide in the Vajont Valley. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 2, 148-212.

Muller, A., Jorda, M., 1990. *Evolution postglaciaire des milieux montagnards et histoire du peuplement dans la vallée de l'Ubaye (Alpes françaises du Sud)*. Rapport d'étude à la Direction Régionale des Antiquités, Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, Aix-en-Provence, 20p.

Nakamura, J., 1980. *investigation manual on prediction of occurrence of Dosekiryu (debris flow), Delineation of dangerous zone affected by Dosekiryu and arrangement of warning and evacuation system in mountain torrents in Japan*. International Symposium Interpraevent Bad Ischl, tome 3, 41-81.

Nash, D., 1987. *A comparative review of limit equilibrium methods of stability analysis*. In Slope Stability, Ed by Anderson M.G. and Richards K.S., John Wiley & Sons Ltd.

Nguyen, Q.D., Boger, D.V., 1992. Measuring the flow properties of yield stress fluids. *Annual Review in Fluid Mechanics*, 24, 47-88.

Norem, H., Locat, J., Schieldrop, B., 1990. An approach to the physics and modelling of submarine flowslides. *Marine Geotechnology*, 9, 93-111.

Norme NF ISO-17312, 2002. *Détermination de la conductivité hydraulique de matériaux poreux saturés à l'aide d'un perméamètre à paroi rigide*. Association Française de Normalisation, Paris, 68p.

Norme NFP 94-040, 1993. *Sols: méthode simplifiée d'identification de la fraction 0/50 mm d'un matériau grenu - Détermination de la granulométrie et de la valeur de bleu*. Association Française de Normalisation, Paris, 12p.

Norme NFP 94-051, 1991. *Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire - Méthodes de la trousse coupante, du moule et de l'immersion dans l'eau*. Association Française de Normalisation, Paris, 8p.

Norme NFP 94-051, 1993. *Sols: reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle. Limite de plasticité au rouleau*. Association Française de Normalisation, Paris, 16p.

Norme NFP 94-052-1, 1995. *Sols: reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Partie 1: limite de liquidité. Méthode du cône de pénétration*. Association Française de Normalisation, Paris, 9p.

Norme NFP 94-054, 1991. *Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau*. Association Française de Normalisation, Paris, 12p.

Norme NFP 94-055, 1993. *Sols: reconnaissance et essais – Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un sol. Méthode chimique.* Association Française de Normalisation, Paris, 7p.

Norme NFP 94-056, 1996. *Sols: reconnaissance et essais – Analyse granulométrique. Méthode par tamisage à sec après lavage.* Association Française de Normalisation, Paris, 15p.

Norme NFP 94-057, 1992. *Sols: reconnaissance et essais – Analyse granulométrique des sols. Méthode par sédimentation.* Association Française de Normalisation, Paris, 17p.

Norme NFP 94-068, 1998. *Sols: reconnaissance et essais – Identification granulométrique. Méthode de tamisage par voie humide.* Association Française de Normalisation, Paris, 11p.

Norme NFP 94-071-1, 1994. *Sols: reconnaissance et essais – Essai de cisaillement rectiligne à la boîte.* Association Française de Normalisation, Paris, 16p.

Norme X31-504, 1995. *Méthode de mesure de la conductivité hydraulique horizontale équivalente et de la porosité de drainage in situ.* Association Française de Normalisation, Paris, 19p.

Norme XPP 94-010, 1996. *Sols: reconnaissance et essais. Glossaire géotechnique, Définitions, Notations, Symboles.* Association Française de Normalisation, Paris, 24p.

Norme XPP 94-041, 1995. *Sols: reconnaissance et essais. Identification granulométrique. Méthode de tamisage par voie humide.* Association Française de Normalisation, Paris, 11p.

Norme XPP 94-060-1, 1997. *Sols: reconnaissance et essais. Essai de dessiccation. Partie 1: détermination conventionnelle de la limite de retrait sur le passant à 400 micromètres d'un matériau*. Association Française de Normalisation, Paris, 8p.

O'Brien, J.S., 1986. *Physical processes, rheology and modelling of mudflows*. PhD Thesis, Colorado University, Colorado, 226p.

O'Brien, J.S., Julien, P.Y., 1988. Laboratory analyses of mudflow properties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(8), 877-887.

O'Brien, J.S. Julien, P.Y., Fullerton, W.T., 1993. Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119, 224-261.

Okuda, S., Ashida, K., Gocho, Y., Okunishi, K., Sawada, T., Yokoyama, K., 1979. Characteristics of heavy rainfall and debris hazard. *Natural disaster Sci.*, 4, 41-55.

Okuda, S., Suwa, H., Okunishi, K., Yokohama, K., Nakano, M., 1980. Observations on the motion of a debris flow and its geomorphological effects. *Z. Geomorphol.*, 35, 142-163.

Onda, A., Mizuyama, T., Kato, Y., 2003. *Judging the timing of peak rainfall and the initiation of debris flow by monitoring runoff*. In Rickenmann, D., Chen, L.C. (Eds): Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Davos,Switzerland, Millpress, Rotterdam, 147-153.

Oostwoud Wijdenes, D.J., Ergenzinger, P., 1998. Erosion and sediment transport on steep marly hillslopes, Draix, Haute-Provence, France: an experimental field study. *Catena*, 33: 179-200.

Pallas, R., Vilaplana, J.M., Guinau, M., Falgas, E., Alemany, X., Munoz, A.G., 2004. A pragmatic approach to debris-flow hazard mapping in areas affected by Hurricane Mitch: example from NW Nicaragua. *Engineering Geology*, 72, 57-72.

Parlange, J.-Y., 1975. On solving the flow equation in unsaturated soils by optimisation: horizontal infiltration. *Soil Science Society of America Journal*, 39, 415-418.

Pashias, N., Boger, D.V., Summers, J., Glenister, D.J., 1996. A fifty cent rheometer for yield stress measurement. *Journal of Rheology*, 40(6), 1179-1189.

Pasquerro, D., 1999. *Le développement et la propagation des laves torrentielles : le cas du glissement de Bonrieu.* Mémoire de DEA Géomatériaux, Ecole des Mines de Paris, 51p.

Pasuto, A., Soldati, M., 2004. An integrated approach for hazard assessment and mitigation of debris flows in Italian Dolomites. *Geomorphology*, 61, 59-70.

Péguy, C.-P., 1947. *Haute Durance et Ubaye, esquisse physique de la zone intra-alpine des Alpes françaises du Sud*. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 306p.

Peiry, J.-L., 1987. Channel degradation in the middle Arve river (France). *Regulated Rivers, Research and Management* 1(2), 183-188.

Perez, F.L. 2001. Matrix granulometry of catastrophic debris flows (December 1999) in central coastal Venezuela. *Catena*, 45(3): 163-183.

Petraschek, A., Kienholz, H., 2003. *Hazard assessment and mapping of moutain risks in Switzerland*. In Rickenmann, D., Chen, L.C. (Eds): Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Davos,Switzerland, Millpress, Rotterdam, 25-39.

Phan, T.S.H., 1993. *Propriétés Physiques et Caractéristiques Géotechniques des Terres Noires du Sud-Est de la France*. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 246p.

Philips C.J., Davies T.R.H., 1991. Determining rheological parameters of debris-flow material. *Geomorphology*, 4, 101-110.

Pianese, D., Barbiero, L., 2003. *Formulation of a two-dimensional unsteady debris flow model for analysis of debris flow hazards and countermeasures*. In Rickenmann, D., Chen, L.C. (Eds): Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Davos,Switzerland, Millpress, Rotterdam, 25-39.

Pierre, S., Remaître, A., 1999. *Etude de la lave torrentielle du 19 août 1996 sur le torrent de Faucon*. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 158p.

Pierson, T.C., 1980. Erosion and deposition of debris flows at Mount Thomas, North Canterbury, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*, 5, 227–247.

Pierson, T.C., 1985. Initiation and flow behavior of the 1980 Pine Creek and Muddy river lahars, Mount St. Helens, Washington, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 96, 1056–1069.

Pierson, T.C., 1986. *Flow behaviour of channelized debris flows, Mount St. Helens, Washington*. In Hillslope Processes, edited by A.D. Abrahams, Allen and Unwin, Winchester, Mass., 269-296.

Pierson, T.C., 1995. Flow characteristics of large eruption-triggered debris flows at snow-clad volcanoes: Constrains for debris-flow models. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 66, 283-294.

Pierson, T.C., Costa, J.E., 1987. *A rheologic classification of sub-aerial sediment-water flows*. In Costa, J.E., Wieczorek, G.F. (Eds): Debris Flow, Avalanche: Process, Recognition, and Mitigation, Reviews in Engineering.

Pierson, T.C., Janda, R.J., Thouret, J.-C., Borrero, C.A., 1990. Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, and consequent mobilization, flow, and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41, 17-66.

Plan, J., 1968. *La Fenêtre de Barcelonnette*. Bulletin du Service de la Carte Géologique de la France, LXV-280, 126p.

Poesen, J.W.A., Hooke, J.M., 1997. Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe. *Progress in Physical Geography*, 21(2): 157–199.

Pratson, L., Imran, J., Hutton, E., Parker, G., Syvitski, J.P.G., 2001. Bang 1-D: a one-dimensional Lagrangian model of turbidity currents mechanics. *Computers and Geosciences*, 26(7): 705-720.

PWRI, 1984. *Basics of planning measures against debris flow; planning countermeasures against debris flow. Technical standards for Erosion and Sediment Control* (rapport), Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Japan.

PWRI, 1988. *Technical standard for measures against debris flow* (rapport), Technical Memorandum of PWRI, n°2632, Ministry of Construction, Japan.

Reid, M.E., Lahusen, R.G., Iverson, R.M., 1997. *Debris-flow initiation experiments using diverse hydrologic triggers*. In Chen, C.-L. (Ed): Proceedings of the 1st International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, San Francisco, United States, American Society of Civil Engineers, New-York, 1-11.

Remaître, A., 2000. *Détermination des zones d'initiation et de contribution des laves torrentielles dans les bassins marneux. Applications au bassin de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence)*. Mémoire de DEA, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 153p.

Remaître, A., Laigle, D., Ancey, C., Malet, J.-P., Maquaire, O., 2003b. *Torrential hazard assessment using a debris-flow runout model*. In Picarelli, L. (Ed): Proceedings of the International Conference on Fast Slope Movements: Prediction and Prevention for Risk Mitigation, Napoli, Italy, Pàtron Editore, Bologna, 445-451.

Remaître, A., Malet, J.-P., Ancey, C., Locat, J., Maquaire, O., 2005b. Flow behaviour and runout modelling of a complex debris flow in clay-shales basin. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 479-488.

Remaître, A., Malet, J.-P., Maquaire, O., 2003a. *Study of a debris-flow event by coupling a geomorphological and a rheological investigation, example of the Faucon stream (Alpes-de-Haute-Provence, France)*. In Rickenmann, D., Chen, L.C. (Eds): Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Davos,Switzerland, Millpress, Rotterdam, 179-187.

Remaître, A., Maquaire, O., Malet, J.P., 2005a. Morphology and sedimentology of a complex debris flow in clay-shales basin. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 339-348.

Remaître, A., Maquaire, O, Pierre, S., 2002. Zones d'initiation et de contribution des laves torrentielles dans les bassins marneux. Exemple du torrent de Faucon (Bassin de Barcelonnette, Alpes-de-Haute-Provence). *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 2002-1, 71-84.

Richard, D., 1995. *Les torrents à laves torrentielles dans les départements alpins, situations génératrices, essai de typologie*. Rapport du Cemagref, Ministère de l'Environnement, Grenoble, 53p.

Rickenmann, D., 1996. *Murgänge : Prozess, Modellierung und Gefahrenbeurteilung.* Instable Hänge: Ursachen, Klimatische Einfüsse, Beobachtung und Sanierung, Ascona, Basel, Boston, Berlin, Birkhäuser.

Rickenmann, D., 1997. *Estimation des laves torrentielles*. IAS 19, 386-391.

Rickenmann, D., 1999. Empirical relationships for debris-flows. *Natural Hazards*, 19, 47-77.

Rickenmann, D., Laigle, D., McArdell, B.W., Hübl, J., 2006. Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events. *Comput. Geosci.* 10, 241-264.

Rickenmann, D., Koch, T., 1997. *Comparison of debris flow modelling approaches*. In Chen, C.-L. (Ed): Proceedings of the 1st International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, San Francisco, United States, American Society of Civil Engineers, New-York, 576-585.

Rickenmann, D., Zimmermann, M., 1993. The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis. *Geomorphology* 8, 175-189.

Rivière, A., 1977. *Méthodes granulométriques*. Masson, 170p.

Rolland, C., 1998. *Contribution à l'analyse des mécanismes d'initiation des laves torrentielles dans le basin versant du Saint-Bernard (Savoie)*. Mémoire de DEA Géomatériaux, Ecole des Mines de Paris, 39p.

Saam, M., 1998. *Analyse SIG et caractérisation écologique des bassins versants de petits plans d'eau en relation avec leur biodiversité*. Thèse de l'Université des sciences et technologies de Lille, Lille 1, 146p.

Sassa K., 1985. *The geotechnical classification of landslides*. In Sassa, K. (Ed): Proceedings of the 4th International Conference and Field Workshop on Landslides, Tokyo, Japan, Balkema, Rotterdam, 31-40.

Sassa, K., 1988. *Geotechnical model for the motion of landslides*. In Bonnard, C. (Ed): Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, Switzerland, Balkema, Rotterdam, 37-55.

Sauret, B., 1987. Coulées boueuses. Laves torrentielles. Coulées de débris canalisées. Compte rendu bibliographique. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 150-151, 65-77.

Savage, S.B., 1984. The mechanics of rapid granular flows. *Advances in Applied Mechanics*, 24, 289-366.

Savage, S.B., Hutter, K., 1989. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *J. Fluid Mech.*, 199, 177-215.

Savage, S.B., Hutter, K., 1991. The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. 1: Analysis. *Acta Mechanica*, 86, 201-223.

Savage, S.B., Iverson, R.M., 2003. *Surge dynamics coupled to pore-pressure evolution in debris flows*. In Rickenmann, D., Chen, L.C. (Eds): Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Davos,Switzerland, Millpress, Rotterdam, 503-514.

Savage, W.Z., Godt, J.W., Baum, R.L., 2003. *A model for spatially and temporally distributed shallow landslides initiation by rainfall infiltration*. In Rickenmann, D., Chen, L.C. (Eds): Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Davos,Switzerland, Millpress, Rotterdam, 179-187.

Schilling, S.P., Iverson, R.M., 1997. *Automated, reproducible delineation of zones risk from inundation by large volcanic debris flows*. In Chen, C.-L. (Ed): Proceedings of the 1st International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, San Francisco, United States, American Society of Civil Engineers, New-York, 176-186.

Schmidt, J., Hennrich, K., Dikau R., 2000. Scales and similarities in runoff processes with respect to geomorphometry. *Hydrological Processes*, 14, 153-174.

Schmitt, L., 2001. *Typologie hydro-géomorphologique fonctionnelle de cours d'eau. Recherche méthodologique appliquée aux systèmes fluviaux d'Alsace*. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 197p.

Schmutz, M., 1995. *Prospection géophysique sur le glissement de Poche*. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Louis Pasteur, 74p.

Schmutz, M., 2000. *Apport des méthodes géophysiques à la connaissance des glissements-coulées développés dans les marnes noires. Application à Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France).* Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 230p.

Schmutz, M., Albouy Y., Guérin R., Maquaire O., Vassal J., Schott J.-J., Descloîtres, M., 2000. Joint electrical and time domain electromagnetism (TDEM) data inversion applied to the Super-Sauze earthflow (France). *Surveys in Geophysics*, 21(4): 371-390.

Schowalter, W.R., Christensen, G., 1998. Toward a rationalization of the Slump Test for fresh concrete. *J. Rheol.*, 42, 865-870.

Schumm, S.A., 1956. Evolution of Drainage System and Slopes in Badlands at Perth Ambay, New Jersey. *Bulletin of Geological Society of America*, 67, 597-646.

Scott, K.M., 1988. *Origins, behavior and sedimentology of lahars and lahar-runout flows in the Toutle-Cowlitz River system*. U.S. Geological Survey Professional Paper, 1447-A, 74p.

Sheko, A.L., 1988. *Mudflows*. In landslides and mudflows (UNESCO-UNEP, Moscou), Vol. 1, Chap. 3, 54-74.

Shieh, C.L., Jan, C.D., Tsai, Y.F., 1996. A numerical simulation of debris flow and its application. *Natural Hazard*, 13, 39-54.

Sivan, O., 2000. *Torrents de l'Ubaye*. Editions Sabença de la Valeia, Barcelonnette, 48p.

Skubizewski, T., 2000. *Tentative de détermination de structures pluviométriques par l'étude de séries de précipitations à pas de temps fin*. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 113p.

Smart, G.M., Jaeggi, M., 1983. *Sediment transport on steep slopes*. Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 68p.

Sommen, Y., 1995. Tendance évolutive climatique dans le Bassin de Barcelonnette. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Louis Pasteur, 115p.

Sommen, Y., 1996. *Analyse des structures climatiques et définitions d'indices climatiques favorables au déclenchement des mouvements de terrain. Application au Bassin de Barcelonnette (Alpes de Hautes Provence)*. Mémoire de DEA 'Systèmes Spatiaux et Environnement', Université Louis Pasteur, Strasbourg, 54p.

Sorgi-de-Gennaro, C., 1999. *Contribution à l'étude des facteurs climatiques, géologiques et géotechniques contrôlant la génération de laves torrentielles. Application au secteur de Saint-Martin-de-la-Porte (Savoie, France)*. Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 172p.

Soria Ugalde, J., De Condappa, D., 2002. *Beerkan method: estimation of soil capillary pressure head normalization parameter and saturated hydraulic conductivity from 1-D infiltration curves*. Rapport Interne, Laboratoire d'Etudes des Transferts en Hydrologie et Environnement, UMR5564 CNRS, Grenoble, 78p.

Sorriso-Valvo, M., Antronico, L., Le Pera, E., 1998. Controls on modern fan morphology in Calabria, Southern Italy. *Geomorphology*, 24, 169-187.

Sousa, J., Voight, B., 1991. Continuum simulation of flow failures. *Geotechnique*, 41, 515-538.

Spreafico, M., Lehmann, C., Naef, O., 1996. *Empfehlung zur Abschätzung von Feststoffrachten in Wildbächen*. Communication n°4, Teil I, Service hydrologique et géologique national, Bern, 46p.

Squarzoni, C., Delacourt, C., Allemand, P. 2003. Nine years of spatial and temporal evolution of the La Valette landslide observed by SAR interferometry. *Engineering Geology*, 68(1-2), 53-66.

Stock, J., Dietrich, W.E., 2003. Valley incision by debris flows: evidence of a topographic signature. *Water Resources Research*, 39(4), 1089-1100.

Suwa, H., 1989. *Field observation of debris flow*. Proceedings of the Japan-China (Taipei) Joint Seminar on Natural Hazard Mitigation, Kyoto, Japan, July 16-20, 343-351.

Suwa, H., Akamatsu, J., Nagai, Y., 2003. *Energy radiation by elastic waves from debris flows*. In Rickenmann, D., Chen, L.C. (eds): Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Davos,Switzerland, Millpress, Rotterdam, 895-904.

Suwa, H., Okuda, S., 1983. Deposition of debris flows on a fan surface. Mt Yakedake, Japan. *Z. Geomorph. N.F.*, 46, 79-101.

Swantson, D.N., Swanson, F.J., 1976. *Timber harvesting, mass erosion and steepland forest geomorphology in the Pacific Nothwest.* In D.R. Coastes. Dowden, Hutchinson and Ross (Eds): Geomorphology and Engineering, Stroudsburg, Pennsylvania, 199-221.

Tacnet, J.M., Gotteland, P., Bernard, A., Mathieu, G., Deymier, C., 2000. *Mesures des caractéristiques géotechniques des sols grossiers. Applications aux sols de torrent*. Proceedings of the Interpraevent Symposium, Villach, 307-319.

Takahashi, T., 1978. Mechanical characteristics of debris flow. *J. Hydr. Div.*, ASCE, 106, 381-396.

Takahashi, T., 1981. Debris Flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 13, 55-77.

Takahashi, T., 1991. *Debris Flows*. Balkema, Rotterdam, 174p.

Takahashi, T., 2001. Mechanics and simulation of snow avalanches, pyroclastic flows and debris flows. In Particular Gravity Currents, Spec. Publ. Int. Ass. Sedimentology, 31, 11-43.

Takei, A., 1984. *Interdependence of sediment budget between individual torrents and a river-system*, Internationals Symposium Interpraevent (conference proceedings), Villach, Austria, 35-48.

Talsma, T., Parlange, J.-Y., 1972. One dimensional vertical infiltration. *Australian Journal of Soil Research*, 10: 143-150.

Tanigawa, Y., Mori, H., 1989 Analytical Study of Deformation of Fresh Concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, 115(3), 493-501.

Terlien, M.T.J., 1996. *The prediction of rainfall-triggered soil slips in Manizales (Columbia)*. In Chacon, J., Inigaray, C., Fernandez, T. (Eds): Landslides, proceedings of the 8th International Conference and Filed Trip on Landslides, Balkema, Rotterdam, 197-205.

Thiery, Y., Puissant, A., Malet, J.-P., Remaître; A., Beck, E., Sterlacchini, S., Maquaire, O., 2003. *Towards the construction of a spatial database to manage landslides with GIS in mountainous environment*. Proceedings of the 6th AGILE, Lyon.

Thouret, J.C., 2002. Aléas et risques volcaniques: comprendre pour prévoir et mieux gérer pour durer. *Annales de géographie*, 627-628, 503-523.

Thouret, J.C., Vivian, H., Fabre, D., 1995. Instabilité morphodynamique d'un basin versant alpin et simulation d'une crise erosive (L'Eglise-Arc 1800, Tarentaise). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 166 (5), 587-600.

Tikhonov, A., Arsenin, V., 1977. *Solutions of ill-posed problems*. Winston and Sons, Glasgow, 226p.

Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content. *Water Resource Research*, 16: 574-582.

Torey, M.D., Cloutman, L.D., Mjolness, R.C., Hirt, C.W., 1985. *NASA-VOF2D, A computer program for incompressible flows with free surfaces*. Internal Report, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 212p.

Toutain, C., 2001. *Prévenir les catastrophes naturelles ?* Ed. Milan; coll. Les essentiels, 64p.

Tricart, J., 1957. Une lave torrentielle dans les Alpes autrichiennes. *Revue de Géomorphologie dynamique*, 8, 161-168.

Tricart, J., 1958. *Etude de la crue de la mi-juin 1957 dans les vallées du Guil, de l'Ubaye et le Cerveyrette et les aspects géomorphologiques de leur reconstruction*. Thèse de Doctorat, Université des Lettres et Sciences Humaines, Strasbourg, 287p.

Tricart, J., 1960. Mécanismes normaux et phénomènes catastrophiques dans l'évolution des versants du basin du Guil (Hautes-Alpes, France). *Z. für Geomorph.*, 5(4), 227-231.

Tricart, J., 1991. Les concepts de "pénéplaine" et d'aplanissement chez les géographes français depuis un siècle. 3e série, t. V, 10, 85-97.

Van Asch, T.W.J., Buma, J., van Beek, L.P.H., 1999. A view on some hydrological triggering systems in landslides. *Geomorphology*, 30, 25-32.

van Asch, T.W.J., Kuipers, B., van der Zanden, D.J., 1993. An information system for large scale quantitative hazard analysis of landslides. *Z. für Geomorphologie* 87, 133-140.

van Asch, T.W.J., Malet, J.-P., Remaître, A., Maquaire, O., 2004. *Numerical modelling of the runout of a muddy debris flow. The effect of rheology on velocity and deposit thickness along the run-out track*. In Lacerda, W. (Ed): Proceedings of the 9th International Symposium on Landslides, Rio de Janeiro, Brazil (1), 1433-1438.

van Asch, T.W.J., Mulder, H.F.H.M., 1991. *Statistical, geotechnical and hydrological approaches in landslide hazard assessment of mass movements*. In: UNESCO-ITC Project on Mountain Hazard Mapping in Andean Environment using Geographical Information Systems, Expert Workshop, Bogota, Colombia, 31p.

van Beek, L.P.H., Van Asch, T.W.J., 1996. *The mobility characteristics of the Valette landslide*. In Senneset, K. (Ed): Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway, Balkema, Rotterdam, 1417-1421.

van Dijck, S., 2000. *Effects of agricultural land use on surface runoff and erosion in a Mediterranean area*. PhD Thesis, University of Utrecht, 246p.

van Effenterre, C., 1982. Les barrages perméables de sédimentation. *Revue Forestière Française* (5).

van Steijn, H., de Ruig, J., Hoozemans, F., 1988. Morphological and mechanical aspects of debris flows in parts of the French Alps. *Z. Geomorph.*, 32, 143-161.

van Westen, C.J., 1993. *Application of Geographical Information Systems to landslide hazard zonation*. ITC-Publication, Volume 15, Enschede, The Netherlands, 156p.

van Westen, C.J., 2000. The modeling of landslide hazards using GIS. *Surveys in Geophysics*, 21, 241-255.

VanDine, D.F., 1985. Debris flows and debris torrents in the Southern Canadian Cordillera. *Can. Geotech. J.*, 22, 44-68.

VanDine, D.F., Bovis, M., 2002. History and goals of Canadian debris-flow research. *Natural Hazards*, 26(1), 67-80.

Varnes, D.J., 1978. *Slope movements Types and Processes*. In Schuster, R.L., Krizek, R.E.J. (Eds): Landslides, Analysis and Control. Transportation Research Board - National Research Council, Special Report 176, National Academy Press, New-York, 1-13.

Varnes, D.J., 1981. *Slope stability problems of the Circum-Pacific Region as related to mineral and energy resources*. In Halbouty, M.T. (ed): Energy Resources of the Pacific Region, Ann. Assoc. Petroleum Geologists Studies in Geology, 12, 489-505.

Varnes, D.J., 1984. *Landslide Hazard Zonation*. A Review of Principles and Practice. UNESCO, Paris, 63p.

Vaunat, J., Leroeuil, S., 2002. Analysis of post-failure slope movements within the framework of hazard and risk analysis. *Natural Hazards*, 26, 83-109.

Velcin, S., 1997. *Caractérisation hydrodynamique du glissement de coulée de Super-Sauze*. Mémoire de maîtrise de Géographie Physique, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 143p.

Veyrat-Charvillon, S., 2005. *Géomorphologie torrentielle : prédiction des apports solides de laves torrentielles*. Thèse de Doctorat de Géographie Physique, Université de Grenoble, 327p.

Veyret, Y., 2003. *Les risques*. Sedes, coll. Dossiers des Images Economiques du Monde.

Veyret-Mekdjian, Y., 2001. *Géographie des risques naturels*. La Documentation Photographique (8023).

Vila, J.-P., 1986. *Sur la théorie et l'approximation numérique de problèmes hyperboliques non linéaires, applications aux équations de Barré de Saint-Venant et à la modélisation des avalanches de neige dense*. Thèse de Doctorat, Université Paris VI, Paris, 481p.

Vila, J. P., 1987. La prévision des vagues produites par la chute d'une avalanche dans une retenue. *International Association of Hydrological Sciences*, 162, 509-578.

Viville, D., Ambroise, B., 1985. Détermination des courbes de rétention hydrique des sols par la méthode du bas à sable et kaolin (pF< 2.7). *Recherches Géographiques à Strasbourg*, 19-21, 253-256.

Voellmy, A., 1964. *On the destructive force of avalanches*. Alta Avalanche Study Center, Translation 2, Fort Collins, Colorado, United States, 63p. (traduction anglaise de l'article Voellmy, A., 1955. Uber die Zerstorungskraft von Lawinen. Schweizer Bauzeitung, 73:159-285).

Volle, M., 1997. *Analyse des données*. Economica, Collection ‚Economie, et statistiques avancées', 4 éditions, 323 p.

VWHG-ETH Zürich, 1988. *Folgen der Waldschäden auf die Gebirgsgewässer in der Schweiz* (rapport), Workshop 1987.

Weber, D., 2001. *Contribution de la géomorphologie à la connaissance des mouvements de terrains dans les 'Terres noires' alpines : le glissement-coulée de Super-Sauze (Alpes de Haute Provence, France)*. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 311p.

Whipple, K.X., Dunne, T., 1992. The influence of debris-flow rheology on fan morphology, Owens Valley, California. *Geologial Society of America Bulletin*, 104, 887-900.

Whitlow, R., 1995. *Basic soil mechanics*. Longman (Ed), Essex, 287p.

Wicks, J.M., Bathurst, J.C., 1996. Shesed: a physically-based, distributed erosion and sediment yield component for the She hydrological modelling system. *Journal of Hydrology*, 175, 213-238.

Wieczorek, G.F., Sarmiento, J., 1988. *Rainfall, piezometric levels and debris flows near La Honda, California, during storms between 1975 and 1983*. In: Landslides, Floods and marine effects of the storm of January 3-5, 1982, in the San Francisco Bay region, California, U.S. Geol. Survey Prof. Paper 1434.

Wieczorek, G.F., Morgan, B.A., Campbell, R.H. (2000). Debris-flow hazard in the Blue Ridge of Central Virginia. *Environmental and Engineering Geoscience*, 6(1), 3-23.

Wilson, R.C., Wieczorek, G.F., 1995. Rainfall thresholds for the initiation of debris flows at La Honda, California. *Environmental and Engineering Geoscience*, 1(1), 11-27.

Wolfram Inc., 1999. *Mathematica Reference Guide*, Wolfram Research, Long Hanborough, 548p.

Yano, K., Daido, A., 1965. Fundamental study on mudflow. *Bull. Disaster Prev. Res. Inst.*, 14, 69-83.

Zanchetta, G., Sulpizio, R., Pareschi, M.T., Leoni, F.M., Santacroce, R., 2004. Characteristics of May 5-6, 1998 volcaniclastic debris flows in the Sarno area (Campania, southern Italy): reliationship to structural damage and hazard zonation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 3037, 1-17.

Zaruba, Q., Mencl, V., 1969. *Landslides and their control*. New York, Elsevier, 205p.

Zeller, J., 1985. Schutz vor Hochwasserschäden und Rutschungen im Gebirge; ein Überblick. Schweizerische *Zeitschrift für Forstwesen* 127 (Berichte n°153 EAV Birmensdorf), 129-137.

Zhou, Z., Solomon, M.J., Scales, P.J., Boger, D., 1999. The yield stress of concentrated flocculated suspensions of size distributed particles. *J. Rheol.*, 43, 651-671.

Zimmermann, M., 1990. *Debris flows in 1987 in Switzerland: geomorphological and meteorological aspects*. In Hydrology in Mountainous Regions, Part II, IAHS Publ. n°194, 387-393.

Zimmermann, M., Church, M., 2001. Channel morphology, gradient profiles and bed stresses during flood in a step-pool channel. *Geomorphology*, 40, 311-327.

Zollinger, F., 1983. *Die Vorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz*. ETH Zürich, Diss. ETH n°7419.

Table des Figures

Figure AP.1 *: Mouvements de terrain rapides catastrophiques et dégâts associés. 20*

Figure AP.2 *: Les différentes composantes du risque illustrées par le glissement de La Conchita, Californie, Etats-Unis, modifiée de Leroi (1996) et Malet (2003). Les notions de risque, aléa et vulnérabilité sont définies par Varnes (1978). 23*

Figure 1.1 *: Classification des écoulements naturels saturés sur forte pente selon la composition granulométrique de l'écoulement et la concentration solide totale (Coussot, 1993)..... 30*

Figure 1.2 *: Classification des mouvements de terrain selon le type de matériau concerné et la teneur en eau (Meunier, 1991). 31*

Figure 1.3 : *Les écoulements de masse rapides à très rapides..... 33*

Figure 1.4 *: Morphologie et entités fonctionnelles d'une lave torrentielle. 36*

Figure 1.5 *: Classification granulométrique de Bonnet-staub (1998) des dépôts de laves torrentielles (écrêtés à 20 mm). 37*

Figure 1.6 *: Comparaison entre la dynamique temporelle (a) des glissements de terrain et (b) des laves torrentielles (modifiée de Vaunat et Leroueil, 2002). 38*

Figure 1.7 *: Distribution des jours de déclenchement de coulées de débris en fonction des précipitations journalières et de l'état hydrique du sol pour la région de Otago en Nouvelle Zélande (Crozier et Eyles, 1980). 40*

Figure 1.8 *: Relation entre la durée et l'intensité horaire d'un épisode pluvieux dans la région de La Honda en Californie (Wieczorek et Sarmiento, 1988). 40*

Figure 1.9 *: Mécanismes de déclenchement des laves torrentielles (modifiée de Meunier, 1991). 43*

Figure 1.10 *: Les différentes phases d'une lave torrentielle (modifiée de Bardou, 2002). 45*

Figure 1.11 *: Rhéogramme type de trois laves torrentielles boueuses à lois de comportement visco-plastique (modifiée de Remaître et al., 2005b). 48*

Figure 1.12 *: Concept de bassin torrentiel à 'risques' (modifiée de Van Effenterre, 1982)..... 54*

Figure 1.13 *: Types d'ouvrages torrentiels. 56*

Figure 1.14 *: Processus élémentaires qui contrôlent et favorisent les phases de déclenchement, de propagation et d'étalement d'une lave torrentielle dans un bassin versant. 56*

Figure 2.1 *: Extension et stratigraphie des marnes et des schistes argileux dans les Alpes françaises. 66*

Figure 2.2 *: Morpho-structure du bassin de Barcelonnette. 67*

Figure 2.3 *: Croquis morphostructural et coupe géologique des Alpes du Sud (d'après Evin, 1997).. 69*

Figure 2.4 *: Coupe géologique de la moyenne Ubaye (Evin, 1997). 70*

Figure 2.5 *: Vue sur le versant adret du bassin de Barcelonnette (Juillet 2004)..... 70*

Figure 2.6 *: Extension latérale du glacier de l'Ubaye, localisation des dépôts glaciaires et morphodynamique dans le bassin de Barcelonnette (Jorda, 1980). 71*

Figure 2.7 *: L'étagement de la végétation de la Moyenne Ubaye (Chondroyannis, 1992). 72*

Figure 2.8 *: Evolution du couvert forestier du Riou-Bourdoux (modifiée de Delsigne et al., 2001). 73*

Figure 2.9 *: Carte de localisation des torrents du bassin de Barcelonnette et de la vallée du Bachelard et historique torrentiel. 77*

Figure 2.10 *: Fréquence cumulée des événements torrentiels dans le bassin de Barcelonnette (1850 – 2004)..... 78*

Figure 2.11 *: Répartition temporelle des événements (crues et laves) par décade pour les torrents du bassin de Barcelonnette. 79*

Figure 2.12 *: Répartition saisonnière des crues et des laves torrentielles dans le bassin de Barcelonnette (1850 – 2004).* *80*

Figure 2.13 *: Localisation des postes pluviométriques et précipitations moyennes annuelles d'une partie des Alpes du Sud (modifiée de Flageollet et al., 1999).* *83*

Figure 2.14 *: Pluviométrie annuelle pour les six postes pluviométriques de l'étude.* *84*

Figure 2.15 *: Diagramme ombrothermique de la station climatique de Barcelonnette (1975-2004).* *85*

Figure 2.16 *: Caractéristiques des précipitations annuelles (période 1975-2004) pour les six postes pluviométriques.* *86*

Figure 2.17 *: Précipitations moyennes mensuelles (période 1975-2004) pour les six postes pluviométriques.* *88*

Figure 2.18 *: Fréquence relative des précipitations journalières pour le poste de Barcelonnette sur la période de référence (1975-2004).* *90*

Figure 2.19 *: Etude fréquentielle des pluies maximales journalières sur la période 1975-2004 pour le poste de Barcelonnette.* *92*

Figure 2.20 *: Répartition saisonnière des précipitations d'intensité maximale en 24h.* *93*

Figure 2.21 *: Répartition des événements de laves torrentielles dans le bassin de Barcelonnette (1850 – 2004) en fonction du type des événements pluvieux déclenchant.* *95*

Figure 2.22 *: Pluviométrie annuelle au poste de Barcelonnette de 1900 à 2004 et nombre de laves torrentielles enregistrées par année (modifiée de Malet, 2003).* *96*

Figure 2.23a *: Localisation des torrents concernés par les quinze événements de laves torrentielles (en trait gros) et pluie du jour (postes de Barcelonnette, Jausiers et La Condamine) et pluie antécédente cumulée sur les trente derniers jours (Type A et B).* *97*

Figure 2.23b *: Localisation des torrents concernés par les quinze événements de laves torrentielles (en trait gros) et pluie du jour (postes de Barcelonnette, Jausiers et La Condamine) et pluie antécédente cumulée sur les trente derniers jours (Type B, C et D).* *98*

Figure 2.24 *: Pluie du jour et pluie antécédente (30 jours) pour les 15 événements de lave.* *99*

Figure 2.25 *: Conditions pluviométriques et hydrologiques à la station des Clots lors du déclenchement de l'événement torrentiel du 4-5 juin 2002.* *100*

Figure 2.26 *: Conditions pluviométriques et hydrologiques à la station des Clots lors du déclenchement de l'événement torrentiel du 5 août 2003.* *101*

Figure 2.27 *: Carte géomorphologique simplifiée du bassin de Barcelonnette.* *103*

Figure 2.28 *: Profils en long normalisés de dix torrents du bassin de Barcelonnette.* *104*

Figure 3.1 *: Carte morphologique du bassin versant du torrent de Faucon.* *114*

Figure 3.2 *: Profil en long du torrent de Faucon.* *115*

Figure 3.3 *: Le bassin de réception du torrent de Faucon depuis la crête de Soleil-Bœuf (avril 2002).* *116*

Figure 3.4 *: Le chenal torrentiel du Faucon.* *117*

Figure 3.5 *: Glissements de terrain dans le bassin versant du torrent de Faucon.* *118*

Figure 3.6 *: Le cône de déjection du torrent de Faucon.* *119*

Figure 3.7 *: Occupation du sol sur le cône de déjection du torrent de Faucon.* *120*

Figure 3.8 *: Le torrent de Champerousse.* *121*

Figure 3.9 *: Carte morphologique du bassin versant du torrent des Sanières.* *122*

Figure 3.10 *: Profil en long du torrent des Sanières.* *123*

Figure 3.11 *: Morphologie du chenal torrentiel des Sanières.* *123*

Figure 3.12 *: Carte morphologique du bassin versant du torrent du Bourget.* *125*

Figure 3.13 *: Profil en long du torrent du Bourget. 126*

Figure 3.14 *: Prise de vue (a) d'un seuil bétonné (N°26), (b) d'un seuil maçonné (N°29) et (c) d'un seuil naturel sur le torrent du Bourget. 126*

Figure 3.15 *: Vue sur la partie basse du glissement du Rata et sur le chenal torrentiel du Bourget. 127*

Figure 3.16 *: Vue en 1885 sur les barrages torrentiels en partie basse du torrent du Bourget. 128*

Figure 3.17 *: Carte morphologique du bassin versant du torrent de l'Abeous. 129*

Figure 3.18 *: Profil en long du torrent de l'Abeous. 130*

Figure 3.19 *: Localisation des débordements et des ponts sur le cône de déjection du torrent de Faucon. 131*

Figure 3.20 *: Photographie prise vert l'amont depuis le pont de la R.D.900 le 20 août 1996 (photographie de N. Masselot, publiée dans Sivan, 2000). 132*

Figure 3.21 *: Localisation des débordements sur le cône de déjection du torrent de Sanières. 133*

Figure 3.22 *: La lave torrentielle du 27 juillet 2005 sur le torrent de l'Abeous (Photographies prises par M. Peyron (Services RTM, Barcelonnette)). 134*

Figure 3.23 *: Localisation des trois ponts sur le cône de déjection et coupes transversale du pont V.C.3. ..... 136*

Figure 3.24 *: Dégâts et débordements sur le cône de déjection du torrent de Faucon (Photographies prises le 6 août 2003 par M. Peyron (Services RTM, Barcelonnette)). 137*

Figure 3.25 *: Localisation des débordements (en grisé) sur le cône de déjection du torrent du Bourget et photographie du débordement au niveau de la citerne DFCI. 138*

Figure 3.26 *: Dégâts et débordements sur le cône de déjection du torrent du Bourget (Photographies prises le 6 août 2003 par M. Peyron (Services RTM, Barcelonnette)). 139*

Figure 4.1 *: Morphologie d'un chenal torrentiel. 146*

Figure 4.2 *: Critères de description de la morphologie torrentielle. 149*

Figure 4.3 *: Méthodologie pour la réalisation du profil en long du torrent de Faucon. 152*

Figure 4.4 *: Cartographie sous SIG des formations superficielles (polygones et table d'attributs associée). 153*

Figure 4.5 *: Cartographie sous SIG des seuils torrentiels (objets et table d'attributs associée). 154*

Figure 4.6 *: Nomenclature et représentation cartographique des dépôts de lave torrentielle. 155*

Figure 4.7 *: Cartographie sous SIG des dépôts de lave torrentielle (polygones et table d'attributs associée). 156*

Figure 4.8 *: Localisation des sites d'investigations hydrologiques, hydrogéologiques, cinématiques et géotechniques. 157*

Figure 4.9 *: Localisation et caractéristiques générales des sept zones fonctionnelles du Faucon.... 160*

Figure 4.10 *: Profils en long (a et b), localisation (c) et vue aérienne (d) de la zone A du torrent de Faucon. 161*

Figure 4.11 *: Vue aérienne de la zone A (a) et vue sur le cône-delta en mai 1997 (b). 162*

Figure 4.12 : *Morphologie des dépôts de lave torrentielle du 19 août 1996 sur le torrent de Faucon (mai 1997). 162*

Figure 4.13 *: Profils en long (a), localisation (b) et vue aérienne (c) de la zone B du torrent de Faucon. 164*

Figure 4.14 *: Vues sur la morphologie du chenal torrentiel dans le secteur B. 165*

Figure 4.15 *: Profils en long de la zone C du Faucon du seuil 6 au seuil 31b. 167*

Figure 4.16 *: Profil en long du seuil 31c au seuil 39 (a), localisation (b) et vue aérienne (c) de la zone C du torrent de Faucon. 168*

Figure 4.17 *: Morphologie de la partie basse de la zone C (entre les seuils 6 et 10).* *169*

Figure 4.18 *: Vue sur le chenal torrentiel de Faucon en aval du seuil 15b (septembre 1998).* *169*

Figure 4.19 *: Localisation (a) et vue sur un glissement de terrain superficiel en rive gauche à l'amont du seuil 15b (septembre 1998).* *170*

Figure 4.20 *: vue sur un embâcle en amont du seuil 22 (septembre 98).* *170*

Figure 4.21 *: Vue sur les vestiges du seuil 43 (mai 1997).* *171*

Figure 4.22 *: Profil en long (a), localisation (b) et vue aérienne (c) de la zone D du torrent de Faucon.* *172*

Figure 4.23 *: Vue sur un dépôt de lave torrentielle, en amont du seuil 39 (mai 1997).* *173*

Figure 4.24 *: Profil en long (a) et localisation (b) de la zone E du torrent de Faucon.* *174*

Figure 4.25 *: Vue aérienne de la zone E du torrent de Faucon.* *175*

Figure 4.26 *: Le glissement des Trois Hommes.* *176*

Figure 4.27 *: Vue en mai 1997 (a) et coupe (b) du dépôt de lave torrentielle en amont du seuil 51.* *177*

Figure 4.28 *: Profil en long (a), localisation (b) et vue aérienne (c) de la zone F du torrent de Faucon.* *178*

Figure 4.29 *: Profil en long (a), localisation (b) et vue aérienne (c) de la zone F du torrent de Faucon.* *179*

Figure 4.30 *: Morphologie de l'épisode torrentiel du 19 août 1996 sur le torrent de Faucon.* *181*

Figure 4.31 *: Morphologie de l'épisode torrentiel du 4 juin 2002 sur le torrent de Faucon.* *183*

Figure 4.32 *: Profil en long du secteur E du torrent de Faucon en juin 2002.* *184*

Figure 4.33 *: Evolution de deux secteurs du torrent de 1997 à 2002.* *185*

Figure 4.34 *: Morphologie de la lave torrentielle du 5 août 2003 sur le torrent de Faucon.* *186*

Figure 4.35 *: Morphologie du chenal torrentiel huit jours après la lave torrentielle du 5 août 2003...* *187*

Figure 4.36 *: Vue vers l'amont sur le pont du Châtelaret (1278 m).* *188*

Figure 4.37 *: Morphologie du chenal torrentiel quelques jours après la lave torrentielle du 5 août 2003.* *188*

Figure 4.38 *: Morphologie de la lave torrentielle du 5 août 2003 au torrent de Faucon dans la zone C.* *189*

Figure 4.39 *: Morphologie de la lave torrentielle du 5 août 2003 au torrent de Faucon au droit des seuils 6 et 15.* *190*

Figure 4.40 *: Morphologie du chenal torrentiel après la lave torrentielle du 5 août 2003 à l'aval de la confluence avec le torrent de Champerousse.* *190*

Figure 4.41 *: Localisation des trois zones 'homogènes' et des seuils torrentiels sur le torrent de Champerousse.* *192*

Figure 4.42 *: Morphologie du chenal torrentiel de Champerousse après la lave torrentielle de 2003.* *194*

Figure 4.43 *: Vue aérienne sur talweg des Trois Hommes.* *195*

Figure 4.44 *: Morphologie du talweg des Trois Hommes après la lave torrentielle du 5 août 2003.* . *196*

Figure 4.45 *: Morphologie de la zone instable de Champerousse* *199*

Figure 4.46 *: Morphologie et traces d'instabilités dans le secteur de Champerousse.* *200*

Figure 4.47 *: Sondage de reconnaissance géologique et géotechnique sur le site de Champerousse.* *201*

Figure 4.48 *: Localisation du tracé du nivellement et des repères GPS et dynamique de trois repères de 2001 à 2003.* *202*

Figure 5.1 *: Situation morphologique des zones de prélèvement des échantillons de dépôts de laves torrentielles, (a) dépôts de débordements sur le torrent du Bourget (BOU03), (b) dépôts de fond de chenal sur le torrent des Sanières (SAN02), et (c) dépôts de levées torrentielles sur le torrent du Riou-Bourdoux (RBX). 209*

Figure 5.2 *: Localisation des échantillons de dépôts de laves dans les torrents du bassin de Barcelonnette. 210*

Figure 5.3 *: Localisation des échantillons de lave sur le torrent de Faucon. 211*

Figure 5.4 *: Mode de prélèvement des échantillons dans un dépôt de lave (a) et dans une formation superficielle (b). 211*

Figure 5.5 *: Localisation des échantillons de formations superficielles 'sources' sur le torrent de Faucon. 213*

Figure 5.6 *: Relation entre la masse totale sèche de l'échantillon et le pourcentage d'argiles et de limons. 215*

Figure 5.7 *: Fuseaux granulométriques [0 – 20 mm] des dépôts de laves torrentielles. 217*

Figure 5.8 *: Texture des dépôts de laves torrentielles (a) classification de Jamagne [0 – 2 mm], (b) classification de Hungr et al. (2001) [0 – 20 mm]. 218*

Figure 5.9 *: Fuseaux granulométriques [0 – 20 mm] des formations superficielles sources. 219*

Figure 5.10 *: Texture des formations superficielles sources (classification de Jamagne [0 – 2 mm]). 220*

Figure 5.11 *: Pétrographie des dépôts de laves torrentielles sur la fraction 2 – 160 mm. 221*

Figure 5.12 *: Représentation des dépôts torrentiels (a) et des formations superficielles sources (b) dans le diagramme de Casagrande. 224*

Figure 5.13 *: Les simulations de pluie à Bouzoulières (bassin versant de Faucon). 227*

Figure 5.14 *: Courbes contraintes-déformations en cisaillement rectiligne consolidé drainé pour les matériaux FS01, FS03, FS06 et FS07. ..... 229*

Figure 5.15 *: Méthodologie générale des investigations rhéologiques. 231*

Figure 5.16 *: Le dispositif de rhéométrie plan-plan, (a) pendant l'essai, (b) après l'essai. 232*

Figure 5.17 *: Raccordement entre la géométrie coaxiale et plan-plan des courbes d'écoulement du matériau SAU_99 pour différentes concentrations volumiques solides ϕ (Malet, 2003). 233*

Figure 5.18 *: Comparaisons entre les valeurs obtenues pour le seuil de contrainte et le paramètre de forme de Herschel-Bulkley par la géométrie coaxiale et plan-plan (modifiée de Malet et al., 2002). . 233*

Figure 5.19 *: Comparaison de l'ajustement de deux courbes d'écoulement du matériau SAU99 par un modèle de Bingham, un modèle bi-linéaire et un modèle de Herschel-Bulkley (in Malet et al., 2003b). 234*

Figure 5.20 *: Essai d'affaissement au cylindre (avant et après essai) et formule analytique associée. 235*

Figure 5.21 *: Erreur relative sur la détermination du seuil de contrainte par la rhéométrie plan-plan et les essais d'affaissement pour six matériaux pour différentes concentrations volumiques solides (ϕ). 236*

Figure 5.22 *: Cinématique d'un essai rhéologique au plan incliné et formules analytiques associées. 237*

Figure 5.23 *: Détermination du seuil de contrainte par la méthode du plan incliné. Points expérimentaux et ajustement théorique de la forme du bourrelet latéral pour les matériaux FAU96, FAU03 et SAU99 (ϕ = 0.44 ; θ = 16°). 237*

Figure 5.24 *: Exemple de mesure topographique de la morphologie d'un bourrelet de la lave torrentielle de 2003 sur le torrent de Faucon (FAU03_1). 238*

Figure 5.25 *: Variation du seuil de contrainte et du paramètre de forme de Herschel-Bulkley ('viscosité') avec la concentration volumique solide (essais rhéométriques + essais d'affaissement + plan incliné) pour six dépôts de laves torrentielles et six formations superficielles sources..... 239*

Figure 5.26 *: Courbes maîtresses des matériaux FAU96, FS01 (moraines), FS02 (marnes noires) et FS03 (formations sur flyschs)..... 240*

Figure 5.27 *: Caractéristiques des mélanges artificiels de formations superficielles sources ; (a) texture, (b) répartition des formations superficielles sources au sein des mélanges artificiels. 241*

Figure 5.28 *: Caractéristiques rhéologiques des mélanges artificiels ; (a) pour les mélanges de M1 à M5, (b) pour les mélanges de M6 à M10..... 242*

Figure 5.29 *: Typologie des dépôts de laves torrentielles..... 244*

Figure 6.1 *: Comparaison des estimations des volumes moyens et maximaux à l'aide de formules empiriques sur le torrent de Faucon..... 250*

Figure 6.2 *: Morphologie des dépôts et définition des termes de l'équation de Johnson. 252*

Figure 6.3 *: Vue aérienne de la zone de déclenchement de la lave torrentielle du 19 août 1996 sur le torrent de Faucon. 254*

Figure 6.4 *: Vue sur les vestiges du seuil 54, le niveau sommital du seuil est représenté en pointillé blanc. 255*

Figure 6.5 *: Ortho-photographie drapée sur le modèle numérique de terrain (mai 2000) et vue de face (juillet 2001) du glissement de terrain des Trois Hommes. 256*

Figure 6.6 *: Ortho-photographies drapées sur le modèle numérique de terrain de la zone des Trois Hommes en mai 1996 (a) et en juin 1997 (b)..... 256*

Figure 6.7 *: Profil en long de la zone de déclenchement probable de la lave torrentielle de 1996 sur le torrent de Faucon. 257*

Figure 6.8 *: Comparaison entre la granulométrie de la lave torrentielle de 1996, de l'embâcle du seuil 54 et de celle du glissement des Trois Hommes..... 257*

Figure 6.9 *: La zone de déclenchement de la crue torrentielle du 4 juin 2002..... 258*

Figure 6.10 *: Comparaisons entre la granulométrie de la crue torrentielle de 2002, et de dépôts torrentiels de fond de lit. 259*

Figure 6.11 *: Schéma fonctionnel de la zone de déclenchement de la lave torrentielle du 5 août 2003 sur le torrent de Faucon. 260*

Figure 6.12 *: Méthodes empiriques d'estimation du volume total d'une lave torrentielle..... 261*

Figure 6.13 *: Vue sur le bief 1 depuis le pont de l'apex (1287 m) en 1998 (a) et en 2002 (b)..... 263*

Figure 6.14 *: Vue sur le bief 1 depuis le pont de l'apex (1287 m) en 2002 (a) et en 2003 (b)..... 264*

Figure 6.15 *: Vue (a) et coupes transversales (b) du pont V.C.3. sur le cône de déjection du torrent de Faucon..... 265*

Figure 6.16 *: Evolution granulométrique et pétrographique des dépôts de laves torrentielles sur le torrent de Faucon ; (a) carte de localisation des dépôts FAU96, (b) carte de localisation des dépôts FAU03, (c) texture des dépôts FAU96, (d) texture des dépôts FAU03, (e) pétrographie des dépôts FAU96 et (f) pétrographie des dépôts FAU03..... 267*

Figure 6.17 *: Texture des dépôts des événements du 5 août 2003 sur les torrents de Champerousse et de Faucon..... 268*

Figure 6.18 *: Carte fonctionnelle des événements torrentiels du 5 août 2003 dans le bassin versant du Faucon..... 269*

Figure 6.19 *: Comparaison entre (a) l'évolution granulométrique et (b) pétrographique des matériaux, (c) les volumes érodés/déposés et (d) l'état des seuils torrentiels pour la lave de 2003 sur le torrent de Faucon..... 270*

Figure 6.20 *: Morphologie de la zone d'incision principale de la lave torrentielle du 5 août 2003 sur le torrent de Faucon. 271*

Figure 6.21 *: Les deux grandes familles de techniques statistiques d'analyse de données..... 273*

Figure 6.22 *: Interprétation des regroupements de biefs torrentiels dans le plan factoriel formé par les deux premières composantes de l'ACP. 275*

Figure 6.23 *: Coupes transversales type des quatre groupes de biefs définis par l'ACP. 277*

Figure 6.24 *: Arbre hiérarchique des 111 biefs torrentiels obtenus par la CAH..... 279*

Figure 6.25 *: Caractéristiques relatives aux volumes érodés ou déposés par la lave torrentielle de 2003 pour les 5 groupes définis par la CAH..... 281*

Figure 7.1 *: Localisation des trois zones potentielles de déclenchement : glissement de Champerousse en rive gauche, glissement des Trois Hommes et glissement de berges Les Clots. 286*

Figure 7.2 *: Modèles géologiques simplifiés des trois zones potentielles de déclenchement, (a) glissement des Trois Hommes, (b) glissement de Champerousse, (c) glissement des Clots. 289*

Figure 7.3 *: Résultats des calculs par le code FLAC en conditions sèches pour (a) le glissement des Trois Hommes, (b) le glissement de Champerousse et (c) le glissement des Clots..... 290*

Figure 7.4 *: Analyse de sensibilité des paramètres des matériaux (angle de frottement interne, cohésion, porosité et poids volumique sec) pour (a) les marnes noires dégradées et (b) les moraines. 292*

Figure 7.5 *: Interface utilisateur du code J-DFM 1-D. 294*

Figure 7.6 *: Erreur relative du code numérique J-DFM 1-D. 296*

Figure 7.7 *: Hauteur d'écoulement simulée par Bing à l'abscisse X=2000 m pour (a) 10 nœuds, (b) 20 nœuds et (c) 50 nœuds ; et (d) influence du nombre de nœuds sur la hauteur d'écoulement et la distance de parcours. 296*

Figure 7.8 *: Analyse de sensibilité pour le code J-DFM 1-D. 298*

Figure 7.9 *: Calage du modèle Bing sur la lave du 19 août 1996 sur le torrent de Faucon..... 299*

Figure 7.10 *: Comparaison entre la hauteur d'écoulement simulée et observée pour la lave de 2003 sur le torrent de Faucon avec le code J-DFM 1-D. 301*

Figure 7.11 *: Comparaisons entre l'étalement simulé et observé pour la lave torrentielle de 2003 sur le torrent de Faucon (secteur du lotissement du Bérard)..... 302*

Figure 8.1 : *Scénarios de modélisation pour les trois phases des laves torrentielles..... 306*

Figure 8.2 *: Etude numérique couplée (SEEP/W et FLAC) de stabilité du glissement de terrain de Trois Hommes avec une nappe liée aux précipitations 1980-2005. ..... 307*

Figure 8.3 *: Etude numérique couplée (SEEP/W et FLAC) de stabilité du glissement de terrain de Champerousse avec (a) une nappe liée aux précipitations 1980-2005, et (b) avec nappe et fuite sur un réseau de drainage..... 308*

Figure 8.4 *: Etude numérique couplée (SEEP/W et FLAC) de la stabilité du glissement de terrain des Clots. (a) avec une nappe liée aux précipitations 1980-2005, et (b) avec nappe et pertes des réseaux de drainage..... 310*

Figure 8.5 *: Variation du facteur de sécurité pour les trois sites et pour les différentes configurations. 310*

Figure 8.6 : *Schéma conceptuel d'intégration de la contribution dans le modèle J-DFM 1-D. 312*

Figure 8.7 : *Hauteurs d'écoulement simulées avec le modèle J-DFM 1-D et observées. (a) pas de contribution, (b) méthode de la contribution linéaire, (c) méthode des sections d'érosion et (d) méthode de Rickenmann et al. (2003). 313*

Figure 8.8 : *Comparaison des performances des trois méthodes d'intégration de la contribution avec le modèle J-DFM 1-D. (a) méthode de la contribution linéaire, (b) méthode des sections d'érosion et (c) méthode de Rickenmann. 314*

Figure 8.9 : *Stratégie de l'étude de sensibilité avec le code Cemagref 1-D pour quantifier le nombre et la répartition des seuils sur les caractéristiques d'écoulement. 316*

Figure 8.10 : *Profils utilisés dans le code Cemagref 1-D pour l'étude de sensibilité : profil de base (a), profils pour l'étude du nombre de seuils (b) et profils pour l'étude de la répartition des seuils (c). 317*

Figure 8.11 : *Influence du nombre de seuils sur les caractéristiques d'écoulement d'une lave. 318*

Figure 8.12 : *Influence de la répartition spatiale des seuils sur les caractéristiques d'écoulement d'une lave. 319*

Figure 8.13 *: Estimation des volumes à libérer pour atteindre l'apex du torrent de Faucon pour trois mélanges artificiels. 321*

Figure 8.14 *: Comparaison entre les hauteurs d'écoulement de laves simulées avec le code Cemagref 1-D et les hauteurs des berges en rive droite et en rive gauche..... 322*

Figure 8.15 *: Localisation des Modèles Numériques de Terrain. 323*

Figure 8.16 *: Hydrogrammes de crue de laves pour les 4 configurations testées. 324*

Figure 8.17 *: Etalement sur l'ensemble du cône de déjection..... 324*

Figure 8.18 *: Etalement simulé par le modèle Cemagref 2-D sur le secteur du Bérard pour trois configurations Volume-Débit. 325*

Figure 8.19 *: Etalement (extension et épaisseur des dépôts (non représentée pour 120 000 m3)) sur le secteur du lotissement du Bérard pour les quatre volumes initiaux et débits associés. 326*

Figure 8.20 *: Zones les plus susceptibles de déclencher ou d'alimenter une future lave sur le torrent de Faucon..... 328*

Figure Conclusion.1 *: Méthodologie de l'évaluation de l'aléa 'lave torrentielle. 337*

Table des Tableaux

Tableau 1.1 : *Classification des mouvements de terrain selon le type de mouvement et le type de matériau concerné (Varnes, 1978).* *29*

Tableau 1.2 *: Etapes pour la réalisation d'un constat préliminaire sur l'activité torrentielle (I).* *57*

Tableau 1.3 *: Etapes dans la définition des zones sources de déclenchement (II) pour un bassin versant torrentiel.* *58*

Tableau 1.4 *: Etapes dans l'analyse de la phase de propagation (III) pour un bassin versant torrentiel.* *60*

Tableau 1.5 *: Etapes dans l'analyse de la phase de dépôt pour un bassin versant torrentiel.* *62*

Tableau 2.1 *: Constat préliminaire sur l'activité torrentielle (I) : historique de l'activité (I.1).* *75*

Tableau 2.2 *: Nombre d'événements torrentiels connus et temps séparant deux événements. Comparaison entre quatre torrents du bassin de Barcelonnette et d'autres torrents alpins.* *78*

Tableau 2.3 *: Fréquence des laves torrentielles pour différents torrents alpins.* *81*

Tableau 2.4 *: Constat préliminaire sur l'activité torrentielle (I) : étude climatique (I.2).* *81*

Tableau 2.5 *Caractéristiques des postes pluviométriques de l'étude.* *82*

Tableau 2.6 *: Modules pluviométriques annuels (1975-2004) et variations inter-annuelles (en mm).* . *87*

Tableau 2.7 *: Répartition saisonnière des précipitations (en pourcentage) et indicatif saisonnier pour quinze sites des Alpes.* *88*

Tableau 2.8 *: Répartition mensuelle des précipitations maximales journalières pour les six postes de l'étude sur la période 1975-2004.* *89*

Tableau 2.9 *: Nombre de cas par classe d'intensité et fréquence relative des précipitations maximales journalières pour les six postes de l'étude sur la période de référence (1975-2004).* *91*

Tableau 2.10 *: Pluie maximale journalière (en mm) pour six périodes de retour de référence pour six postes.* *91*

Tableau 2.11 *: Constat préliminaire sur l'activité torrentielle (I) : étude des relations pluie/lave torrentielle (I.3).* *95*

Tableau 2.12 *: Constat préliminaire sur l'activité torrentielle (I) : Morphologie et morphométrie des bassins versants (I.3).* *102*

Tableau 2.13 *: Caractéristiques géométriques des bassins versants torrentiels du bassin de Barcelonnette (en gras, les cinq torrents les plus actifs) classés selon leur pente.* *107*

Tableau 2.14 *: Indices morphométriques des torrents du Bassin de Barcelonnette.* *108*

Tableau 2.15 *: Dimensions caractéristiques des cônes de déjection des torrents les plus actifs du bassin de Barcelonnette et de quelques cônes torrentiels alpins.* *109*

Tableau 4.1 *: Zones sources de déclenchement : cartographie morphodynamique du bassin versant (II.1)* *144*

Tableau 4.2 *: Analyse de la phase de propagation : Morphologie du chenal torrentiel et des versants contigus découpés en biefs homogènes (III.1 et III.2)* *144*

Tableau 4.3 *: Analyse de la phase de dépôt : étapes IV.1 à IV.3.* *145*

Tableau 4.4 *: Les descripteurs de la morphologie torrentielle.* *150*

Tableau 4.5 *: Type de mesures pour établir le profil en long, données mesurées et précisions associées.* *151*

Tableau 4.6 *: Caractéristiques des piézomètres* *159*

Tableau 4.7 *: Fonctionnement des zones homogènes lors des deux laves torrentielles de 1996 et 2003 sur le torrent de Faucon.* *197*

Tableau 5.1 *: Définition des zones sources de déclenchement (II) : analyse des formations sources potentielles in situ et en laboratoire (II.2). 206*

Tableau 5.2 : *Analyse de la phase de propagation (III) : analyse du comportement des laves torrentielles (III.3)..... 206*

Tableau 5.3 : *Analyse de la phase de dépôt (IV) : analyse du comportement des laves torrentielles au cours de la phase de dépôt (IV.4). 206*

Tableau 5.4 : *Attributs morphologiques des échantillons de dépôts torrentiels. 212*

Tableau 5.5 : *Attributs morphologiques des échantillons de formations superficielles 'sources'..... 214*

Tableau 5.6 : *Distribution granulométrique de la fraction grossière pour les dépôts de laves torrentielles. 216*

Tableau 5.7 : *indices granulométriques pour les dépôts de laves torrentielles..... 218*

Tableau 5.8 : *Indices granulométriques pour les formations superficielles sources. 220*

Tableau 5.9 : *Distribution pétrographique pour quatre fractions granulométriques pour le dépôt FAU03..... 222*

Tableau 5.10 : *Plage de variation des poids volumiques, du pourcentage de CaCO3, du pourcentage de matière organique et des limites d'Atterberg pour les dépôts de laves torrentielles..... 223*

Tableau 5.11 : *Plage de variation des poids volumiques pour les formations superficielles sources.223*

Tableau 5.12 : *Plage de variation des résultats des essais d'infiltrométrie à charge constante (Beerkan). 225*

Tableau 5.13 : *Plage de variation des résultats des essais d'infiltrométrie à charge variable (Muntz). 225*

Tableau 5.14 : *Caractéristiques des parcelles et résultats expérimentaux des simulations de pluie. 228*

Tableau 5.15 : *Caractéristiques de résistance en cisaillement rectiligne des matériaux sources (critère de rupture de Mohr-Coulomb). 230*

Tableau 5.16 : *Caractéristiques de résistance en cisaillement rectiligne des matériaux marneux du glissement de Super-Sauze. Les données sont issues de Klotz (1998) et Malet (2003). 230*

Tableau 5.17 : *Critères granulométriques de distinction d'un type de lave torrentielle (Bonnet-Staub, 1998)..... 243*

Tableau 6.1 *: Modèles globaux de prédiction des volumes transportés par une lave torrentielle (modifié de Marchi, 1999)..... 249*

Tableau 6.2 *: Estimation des vitesses d'écoulement pour les événements torrentiels survenus sur le torrent de Faucon en 1996, 2002 et 2003. ..... 252*

Tableau 6.3 *: Estimation des distances de parcours moyennes, minimales et maximales pour le torrent de Faucon à partir des formulations de Rickenmann (1999)..... 253*

Tableau 6.4 *: Comparaison entre trois méthodes d'estimation du volume de la lave torrentielle du 19 août 1996 (in Remaître et al., 2002)..... 262*

Tableau 6.5 *: Comparaison entre trois méthodes d'estimation du volume de la lave torrentielle du 5 août 2003..... 264*

Tableau 6.6 *: Estimation des vitesses d'écoulement pour les événements torrentiels survenus sur le torrent de Faucon en 1996, 2002 et 2003. ..... 266*

Tableau 6.7 *: Synthèse des 13 variables prises en compte et modes d'estimation correspondants. 274*

Tableau 6.8 *: Pourcentage de variance connue dans les 5 premiers facteurs de l'ACP et interprétation des axes factoriels..... 276*

Tableau 6.9 : *Caractéristiques des variables pour les 5 groupes définis par la CAH. 280*

Tableau 7.1 *: Paramètres hydrologiques et géomécaniques apparents ((*) calculés par analyse à rebours) et comparaison avec les valeurs obtenues sur échantillons ((**) laboratoire ou in-situ)..... 291*

Tableau 7.2 *: Calage du code Bing sur les laves torrentielles de 1996 et de 2003 sur le torrent de Faucon au pont 1 (modifié de Remaître et al., 2003b).* *300*

Tableau 7.3 *: Calage du code Cemagref 1-D sur les laves torrentielles de 1996 et de 2003 sur le torrent de Faucon.* *300*

Tableau 7.4 *: Calage du code Cemagref 2-D sur la lave torrentielle du 5 août 2003 sur le torrent de Faucon.* *303*

Tableau 8.1 *: Résultats de l'analyse numérique de la stabilité pour les trois secteurs étudiés.* *311*

LISTE DES SYMBOLES

Caractéristiques physiques

γ_d	poids volumique sec
γ_w	poids spécifique de l'eau
γ_{sat}	poids volumique saturé
ρ_s	poids volumique sec des grains
δ	porosité totale
e	indice des vides
K_{sat}	conductivité à saturation
θ	teneur en eau volumique
θ_{sat}	teneur en eau à saturation
W_n	teneur en eau naturelle massique
W_l	limite de liquidité
W_p	limite de plasticité
W_s	limite de retrait

Mécanique des sols

ε	tenseur des déformations
σ	contrainte normale totale
σ', σ'_{vo}	contrainte normale effective
u	pression interstitielle
τ	contrainte tangentielle
c	cohésion
c'_r	cohésion résiduelle
c'_{pp}	cohésion à l'état critique
ϕ	angle de frottement interne
ϕ'_r	angle de frottement résiduel
φ'_{pp}	angle de frottement à l'état critique
W_L	teneur en eau résiduelle
W_{opt}	teneur en eau à l'optimum de compacité
F_s	facteur de sécurité
C_c	indice de compression élastoplastique
λ	module de compressibilité élastoplastique
κ	module de compressibilité plastique
E	module de *Young*
q	déviateur
M	pente de la droite critique de *Mohr-Coulomb*
υ	coefficient de *Poisson*

Mécanique des fluides

ϕ	concentration volumique solide
Pe	nombre de *Peclet*
N_r	nombre de répulsion
Re	nombre de *Reynolds*
Le	nombre de *Leighton*
Ba	nombre de *Bagnold*
Γ	gradient de cisaillement adimensionnel
τ	contrainte de cisaillement
τ_c	seuil de contrainte
κ	paramètre de forme de *Herschel-Bulkley*
n	exposant
$\dot{\gamma}$	gradient de cisaillement
η	viscosité dynamique
r_u	pression interstitielle

ANNEXES :

Annexe 1 : *Profil en long habillé sur le torrent de Faucon (exemple pour 4 secteurs)* *A3*

Annexe 2 : *Témoignage Colette Peychier sur la lave de 2003* *A13*

Annexe 3 : *Fiche RTM sur la description d'un événement torrentiel (ex : Abeous 2003)* *A15*

Annexe 4 : *Note de M. Schlumberger sur une lave dans le Faucon en 1876* *A17*

Annexe 5 : *Base de données des biefs du torrent de Faucon* *A19*

Annexe 6 : *Base de données des biefs du torrent de Champerousse* *A27*

Annexe 7 : *Catalogue photographique des seuils du torrent de Faucon* *A31*

Annexe 8 : *Catalogue photographique des seuils du torrent de Champerousse* *A69*

Annexe 9 : *Historique de l'état des seuils torrentiels du torrent de Faucon de 1981 à 2005* *A85*

Annexe 10 : *Mode opératoire des essais d'infiltrométrie (Muntz, Beerkan, simulation pluie)* *A91*

Annexe 11 : *Courbes contrainte-déformation (cisaillement triaxial) pour FS03 et FS07* *A93*

Annexe 12 : *Fondements théoriques de l'ACP* *A95*

Annexe 13 : *Fondements théoriques de la CAH* *A97*

Annexe 14 : *Formulation des codes numériques de propagation et de dépôt* *A99*

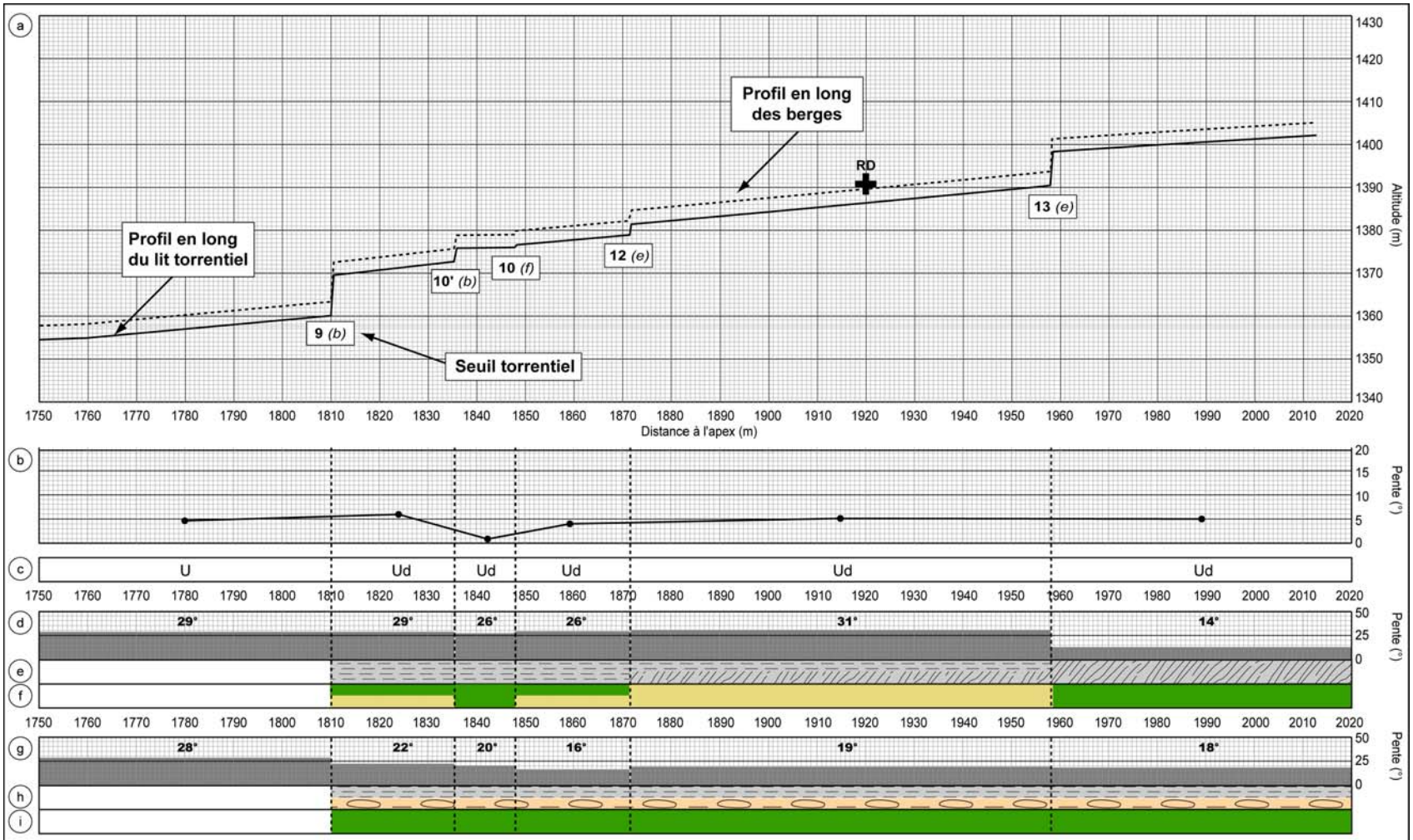
ANNEXE 1 : Profils en long habillés sur le torrent de Faucon (exemple pour 4 secteurs).

Légende :

- Moraines et colluvions morainiques (FS01)
- Colluvions marneux (FS02)
- Colluvions de calcaires et flyschs (FS03)
- Eboulis fins (FS04)
- Produits de glissements (matériau marneux) (FS05)
- Produits de glissements (matériau marneux et moraines) (FS06)
- Produits de glissements (matériau calcaires/flyschs et moraines) (FS07)
- Instabilité sur les deux rives
- RD Instabilité sur la rive droite
- RG Instabilité sur la rive gauche
- Drain
- Affluent
- Sol nu
- Végétation herbacée
- Végétation arbustive

Etat des seuils : b : bon état
e : endommagé
d : détruit
f : enfoui
n : naturel.

Type de profil : U : profil en U
V : profil en V
Ud / Vd : profil dissymétrique



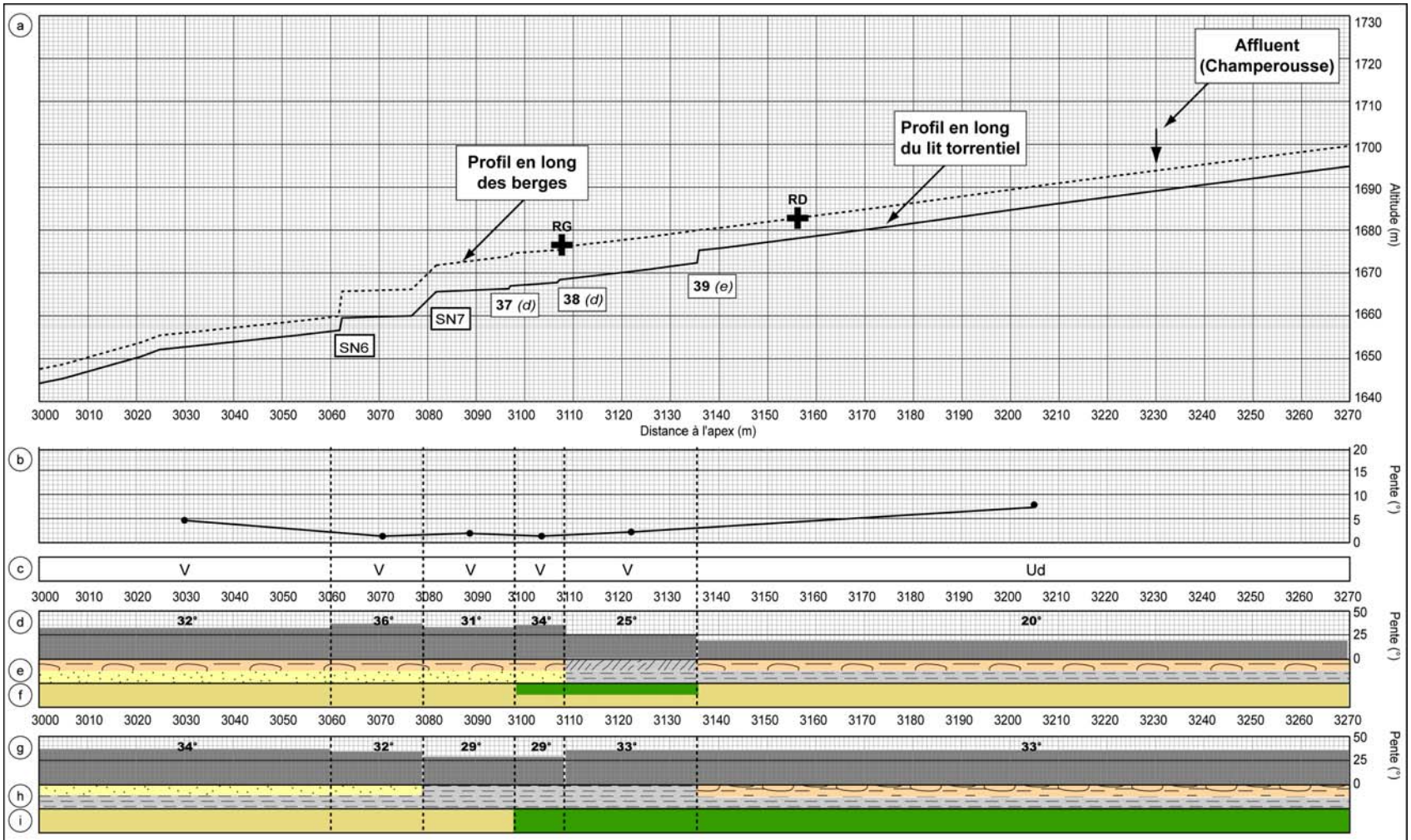
(a) Altitude (m) ; (b) Gradient de pente du chenal (°) ; (c) Type de section en travers ; (d) Pente en long de la rive droite (°) ; (e) Formations superficielles en rive droite ; (f) Type de couverture végétale en rive droite ; (g) Pente en long de la rive gauche (°) ; (h) Formations superficielles en rive gauche ; (i) Type de couverture végétale en rive gauche.

Légende :

- Moraines et colluvions morainiques (FS01)
- Colluvions marneux (FS02)
- Colluvions de calcaires et flyschs (FS03)
- Eboulis fins (FS04)
- Produits de glissements (matériau marneux) (FS05)
- Produits de glissements (matériau marneux et moraines) (FS06)
- Produits de glissements (matériau calcaires/flyschs et moraines) (FS07)
- Instabilité sur les deux rives
- RD Instabilité sur la rive droite
- RG Instabilité sur la rive gauche
- Drain
- Affluent
- Sol nu
- Végétation herbacée
- Végétation arbustive

Etat des seuils : b : bon état
e : endommagé
d : détruit
f : enfoui
n : naturel.

Type de profil : U : profil en U
V : profil en V
Ud / Vd : profil dissymétrique



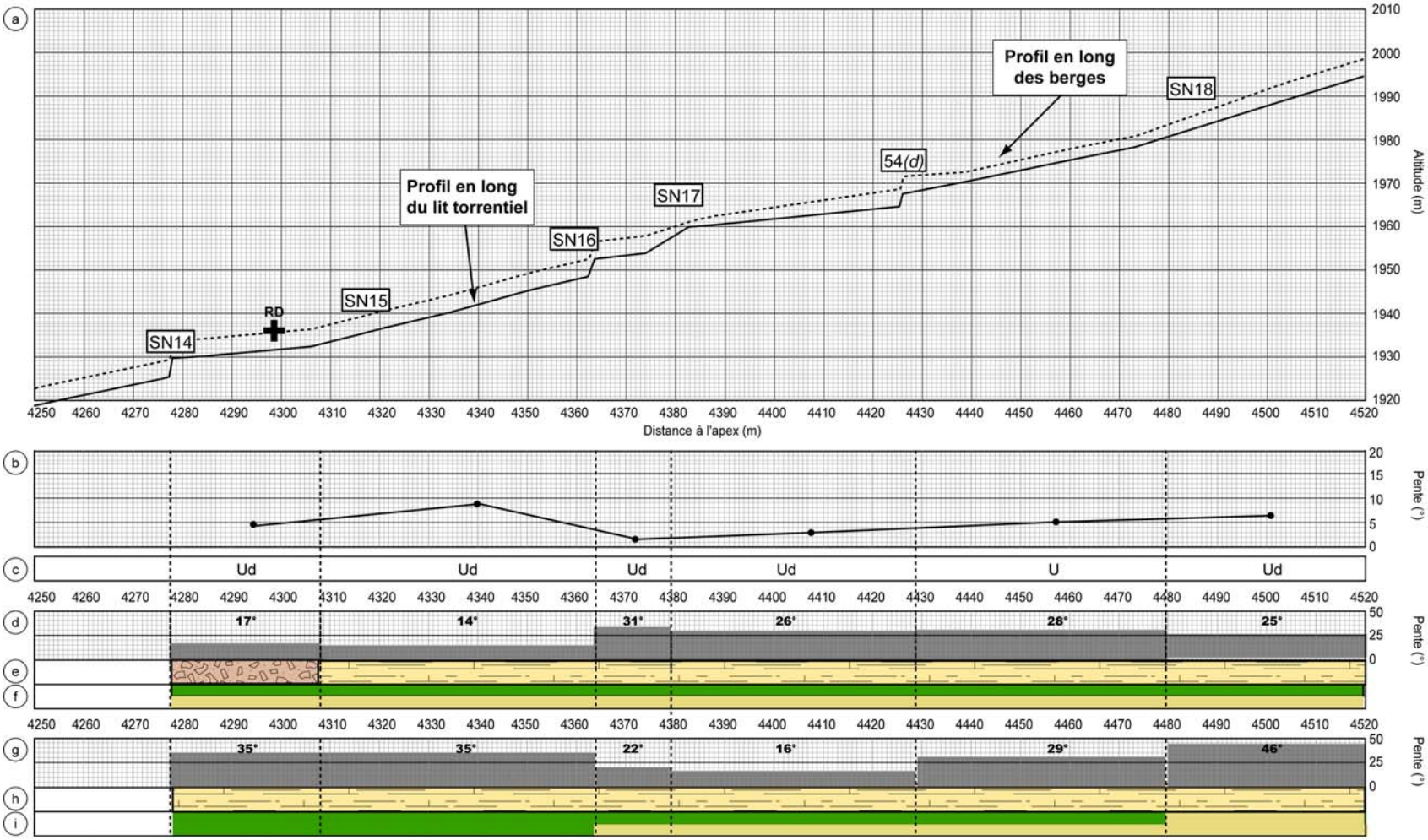
(a) Altitude (m) ; (b) Gradient de pente du chenal (°) ; (c) Type de section en travers ; (d) Pente en long de la rive droite (°) ; (e) Formations superficielles en rive droite ; (f) Type de couverture végétale en rive droite ; (g) Pente en long de la rive gauche (°) ; (h) Formations superficielles en rive gauche ; (i) Type de couverture végétale en rive gauche.

Légende :

- Moraines et colluvions morainiques (FS01)
- Colluvions marneux (FS02)
- Colluvions de calcaires et flyschs (FS03)
- Eboulis fins (FS04)
- Produits de glissements (matériau marneux) (FS05)
- Produits de glissements (matériau marneux et moraines) (FS06)
- Produits de glissements (matériau calcaires/flyschs et moraines) (FS07)
- Instabilité sur les deux rives
- RD Instabilité sur la rive droite
- RG Instabilité sur la rive gauche
- Drain
- Affluent
- Sol nu
- Végétation herbacée
- Végétation arbustive

Etat des seuils : b : bon état
e : endommagé
d : détruit
f : enfoui
n : naturel.

Type de profil : U : profil en U
V : profil en V
Ud / Vd : profil dissymétrique



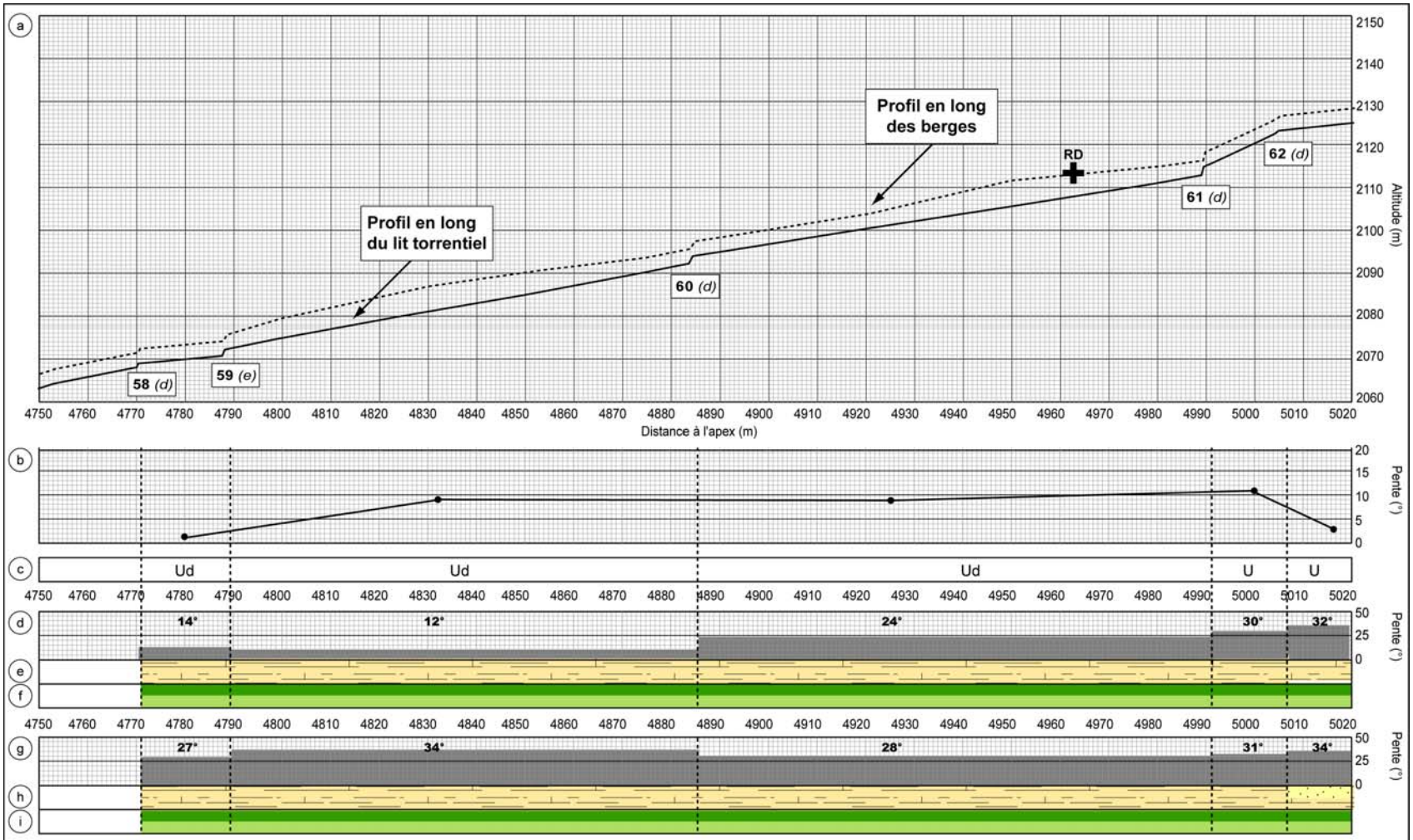
(a) Altitude (m) ; (b) Gradient de pente du chenal (°) ; (c) Type de section en travers ; (d) Pente en long de la rive droite (°) ; (e) Formations superficielles en rive droite ; (f) Type de couverture végétale en rive droite ; (g) Pente en long de la rive gauche (°) ; (h) Formations superficielles en rive gauche ; (i) Type de couverture végétale en rive gauche.

Légende :

- Moraines et colluvions morainiques (FS01)
- Colluvions marneux (FS02)
- Colluvions de calcaires et flyschs (FS03)
- Eboulis fins (FS04)
- Produits de glissements (matériau marneux) (FS05)
- Produits de glissements (matériau marneux et moraines) (FS06)
- Produits de glissements (matériau calcaires/flyschs et moraines) (FS07)
- Instabilité sur les deux rives
- RD Instabilité sur la rive droite
- RG Instabilité sur la rive gauche
- Drain
- Affluent
- Sol nu
- Végétation herbacée
- Végétation arbustive

Etat des seuils : b : bon état
e : endommagé
d : détruit
f : enfoui
n : naturel.

Type de profil : U : profil en U
V : profil en V
Ud / Vd : profil dissymétrique



(a) Altitude (m) ; (b) Gradient de pente du chenal (°) ; (c) Type de section en travers ; (d) Pente en long de la rive droite (°) ; (e) Formations superficielles en rive droite ; (f) Type de couverture végétale en rive droite ; (g) Pente en long de la rive gauche (°) ; (h) Formations superficielles en rive gauche ; (i) Type de couverture végétale en rive gauche.

ANNEXE 2 : Témoignage de Colette Peychier sur la lave du 5 août 2003 sur le torrent de Faucon.

Débordement du torrent de Faucon le 5 août 2003.

Mardi 5 août 2003, il est environ 18h50, nous nous préparons à sortir. La pluie qui tombe avec violence depuis plus d'une heure nous en a empêchés. A ce moment là, et à l'exception de locataires qui se trouvent au lot 3 bis (des enfants jouaient dans le jardin) nous sommes seuls dans le haut du lotissement. Depuis 5 minutes environ le bruit de la pluie sur les velux s'est atténué. Je sors sur le balcon ouest de la maison et, regardant vers le torrent, je vois, un peu plus bas que le mur de la digue, un fleuve de boue beige sur lequel flotte le pont de bois. Cela va vite (environ 40Km /h) et je crie « C'est une moulaye (le torrent verse), je vois le pont qui passe ! » Ma fille et mon mari me rejoignent et nous voyons passer une deuxième vague, chargée de troncs d'arbres et de rochers, qui affleure puis déborde jusqu'au bas du mur de protection. Nous comprenons qu'il est urgent de fermer les volets du rez-de-chaussée, ce que fait ma fille pendant que mon mari se précipite vers la voiture garée devant la maison pour la déplacer. Il croise à cet instant la famille de vacanciers qui fuit en voiture après avoir fermé les volets de leur location.
Je reste quelques instants pétrifiée par le spectacle, le temps de voir encore une vague et je vais à la fenêtre de notre chambre côté sud. Encore une vague, puis une autre, de plus en plus hautes, envahissent cette fois la moitié du jardin. La rive opposée, au dessous du pont, étant plus haute que le mur de protection depuis les deux derniers curages du torrent, n'est pratiquement pas touchée, tout se déverse vers nous. Je vois disparaître les haies, les rosiers. La boue envahit maintenant la terrasse d'été et arrive à la maison. Ma fille est là et me dit « j'aurais eu le temps de rentrer les chaises de jardin». Dérisoire, car nous voyons la lourde table de mélèze de deux mètres de diamètre basculer et être emportée vers la maison de gauche. La table heurte la haie de sapins qui s'effondrent et le tout disparaît.
Les vagues se succèdent encore et encore, et je me demande si cela va s'arrêter. Mon mari revient après avoir déplacé la voiture et bloqué les fermetures métalliques des volets protégeant le rez-de-chaussée. Entre son départ, après la troisième vague et son retour, il s'est écoulé 3 minutes et 15 secondes (chronométrage effectué ultérieurement).
Une énorme vague arrive encore et s'enfle au niveau de l'étranglement du pont où elle semble se figer un instant au plus haut. D'où nous sommes nous ne voyons plus la cime des arbres de la forêt au dessus du pont. Puis la vague verse lentement, déborde sur l'autre rive jusque là pratiquement épargnée, le niveau de la boue monte encore vers nous, la maison est totalement isolée, le jardin n'existe plus. Après quelques instants qui me semblent assez courts, je vois arriver de l'eau qui coule en abondance sur le lit du torrent, et je me dis « c'est fini ».
Nous sortons alors sur le perron et voyons la boue qui s'écoule plus lentement entre les maisons et se répand sur la chaussée.

Il se trouve que j'avais également assisté au débordement d'août 1996. Il y avait eu ce jour-là trois vagues dont seulement la dernière avait affleuré le faîte du mur et légèrement débordé dans le bas du lotissement. De mémoire, la boue coulait plus lentement, elle était donc probablement plus dense en 96 qu'en 2003. En 1996 le grondement du torrent, profond, durable, lointain, m'avait alertée. Il n'y a eu en 2003 aucun bruit annonciateur audible.
J'ajoute que, le 5 août, je n'ai pas éprouvé de peur, mais rétrospectivement, en rédigeant ce texte, et donc en revivant instant par instant ce moment de ma vie, je mesure à quel point nous avons été en danger vital.

Colette PEYCHER
2 domaine de Bérard
04400 Faucon de Barcelonnette

ANNEXE 3 : Fiche RTM sur la description d'un événement torrentiel (ex : Abeous, 2003).

rtm

Fiche terrain événement
Service Départemental des Alpes de Haute-Provence

DATE DE L'EVENEMENT	19 JUIN 2005
Code risque	A ☐ E ☐ F ☐ G ☐ I ☐ P ☐ S ☐ T ☒ X ☐
Commune	MEOLANS REVEL
Autres communes	
Site(s)	LA FRESQUIERE TORRENT DE L'ABEOUS
CatNat : expertise RTM	☐ Auteur de la fiche: GUITER Date de la fiche: 27/06/2005

Caractéristiques du phénomène

Nature du phénomène	CRUE TORRENTIELLE
Causes du phénomène	ORAGE
Durée du phénomène	30 minutes
Commentaires durée	

Zone de départ

Localisation	Bassin versant du Torrent de l'abeous
Description	Crue torrentielle affouillante

Zone d'arrivée

Localisation	La Fresquière Confluence Ubaye
Description	Engravement confluence Ubaye

Impacts du phénomène

Commune	Lieu-dit	Vict.	Dégâts	Perturb	Commentaires impacts
MEOLANS REVEL	La Fresquière	O ☐ N ☒ I ☐	O ☒ N ☐ I ☐	O ☒ N ☐ I ☐	Barrage détruit en domanial B1 Passerelle Abeous endommagée circulation CD900 Interrompue pdt + de 1 h
		O ☐ N ☐ I ☐	O ☐ N ☐ I ☐	O ☐ N ☐ I ☐	

Commentaires

Crue très affouillante enforcement generalisé du lit
lave torrentielle Très liquide, peu de depot dans le lit de l'abeous

Autres Informations

Photos, Vidéos, Archives, ...	Photos avec légende

Source	Date	Document
RTM	20/06/05	Photos avec legende cf doc papier joint

rtm

Fiche terrain événement
Service Départemental des Alpes de Haute-Provence

RENSEIGNEMENTS HORS BDRTM

Etudes et travaux antérieurs aux événements	
Travaux	Curage du chenal suite à la crue de Juillet 2003
Etudes	Etude en cours pour l'élargissement et le redressement du chenal sous le hameau des Trons
Mesures prises ou à prendre	
Mesures d'urgence conseillées	La section du pont du D27 sur l'Ubaye était reduite suite à la crue de 2003. Cette nouvelle crue a encore diminué la section de passage. Un curage sous le pont serait souhaitable
Prévention et Protection	
Suivi	
Etudes	
Travaux	Recalibrage du chenal Poursuite de la correction du Torrent, par la construction de barrages, et le boisement du bassin versant.

Diffusion	Visa du Chef de Service :

ANNEXE 4 : Note de M. Schlumberger sur une lave torrentielle dans le torrent de Faucon en 1876 (in Sivan, 2000).

38

Lave du 13 août 1876 dans le torrent de Faucon

Note de M. SCHLUMBERGER, garde général des Forêts. Cité par Prosper Demontzey, *Traité pratique du reboisement et du gazonnement des montagnes*, 1882. [Un exemplaire de cet ouvrage est conservé à la bibliothèque de Barcelonnette.]

I

Il se passe souvent plusieurs années sans qu'il éclate un fort orage dans la vallée de Barcelonnette, cette terre classique des torrents, et si les dégâts causés sont considérables ils ne se reproduisent heureusement qu'à des intervalles assez éloignés. Mais il est des années qui semblent prédestinées pour cela, et, pendant plusieurs semaines des orages d'une extrême violence s'y succèdent alors presque journellement éclatant tantôt d'un côté, tantôt d'un autre.

Depuis le trop célèbre été de 1868, tous les redoutables torrents qui entourent Barcelonnette semblaient presque inoffensifs, et il a fallu les pluies de 1876 pour les faire sortir de leur sommeil de huit années. Presque tous les jours, depuis le 8 jusqu'au 20 août, le ciel, serein pendant la matinée, se chargeait brusquement de nuages après midi, et l'orage éclatait avec une incroyable violence, se déchaînant sur un point quelconque de la vallée, sans que le plus souvent il tombât une goutte d'eau sur d'autres points assez rapprochés. Ces orages suivaient toujours les lignes de crêtes, étaient accompagnés de grêle dans les régions supérieures, et c'est sur les parties les plus élevées qu'il tombait le plus d'eau, comme l'ont démontré les nombreuses expériences faites dans les bassins de réception des différents torrents.

[...] Cette grande quantité de pluie tombant en un temps très court, sur ces versants dénudés et escarpés, s'écoule en grande masse par le torrent ordinairement presque à sec, entraîne tous les matériaux qui s'y trouvent accumulés, affouille le lit, ronge les berges, provoque d'immenses glissements de terrains et amène toutes ces déjections dans la vallée, donnant ainsi naissance à ce que dans le pays, on appelle du nom pittoresque de lave.

Ce phénomène s'est produit en 1876 dans la plupart de nos grands torrents. Sans parler des orages moins violents du mois de juillet, on a pu voir de très fortes laves :

— le 8 août, aux Sanières ;
— le 10 août, à la Grande-Combe ;
— le 13 août aux Sanières, à Faucon, à la Bérarde, aux Thuiles, etc.

Témoin de celle descendue le dimanche 13 août, dans le torrent de Faucon, je vais chercher à décrire le phénomène, tel que j'ai pu l'observer. [...]

IV

C'était un dimanche, le 13 août 1876 ; la matinée avait été superbe et le ciel d'une pureté remarquable, malgré les orages des jours précédents. Mais, dès midi, les nuages commencent à se montrer à l'horizon ; ils s'amoncellent rapidement dans la partie haute de la vallée entre Jausiers et la Condamine. Cependant la chaleur est accablante et pas un souffle de vent n'agite l'air. Vers 2 heures, les nuages deviennent plus épais et prennent une teinte d'un noir jaunâtre caractéristique : ils cachent les montagnes de Jausiers, et leur masse sombre s'avance rapidement, en suivant la crête des Sanières. Aussitôt l'orage éclate avec furie ; les éclairs sillonnent le ciel, le tonnerre gronde et le vent s'élève, entraînant avec lui l'orage qui vient s'abattre au-dessus de Faucon. On ne voit plus la montagne de ce côté. Il est 3 heures, et, tandis qu'il ne tombe que quelques gouttes d'eau dans la vallée, tandis que le ciel reste serein vers le sud, du côté d'Enchastrayes, tout semble indiquer que la pluie tombe avec une extrême violence dans la montagne.

À 3 heures et demie, tout est fini de ce côté : l'orage a suivi, comme d'ordinaire, la ligne de faîte nord de la vallée et, descendant toujours, il tombe avec furie à la Bérarde, aux Thuiles et ne se termine qu'en aval d'Ubaye, en arrivant sur la Durance.

V

J'avais quitté Barcelonnette à 2 heures et demie, au moment où l'orage arrivait sur le bassin de réception du torrent de Faucon. Il tombait quelques gouttes d'eau seulement dans la vallée ; mais tout faisait présumer que la pluie était d'une violence extrême dans la montagne. Arrivé à Faucon, je monte sur le cône de déjection. L'orage avait cessé dans le bassin de réception et déjà l'on apercevait la cime des montagnes légèrement blanchie par la grêle Cependant j'avance toujours et, arrivé au sommet du cône, au goulot du torrent, j'aperçois une lave formidable qui descend majestueusement la montagne.

À mes pieds, le lit du torrent, profond de 8 mètres environ et large de 23 mètres, est presque à sec, malgré l'orage. Mais regardant en amont, dans la direction des chutes qui se trouvent en cet endroit, je vois une immense masse noire qui s'avance comme un mur et presque sans bruit, descendant le lit du torrent. C'était la lave qui venait de la montagne, et qu'il m'était donné d'observer dans toute son intensité.

Cette lave, qui coulait rapidement quand la pente du torrent était forte, arrive bientôt à mes pieds, descendant sur une pente de 12 pour 100 tout au plus. Sa vitesse est aussitôt ralentie, et bientôt elle n'est plus que de 1,50 m par seconde.

C'est un amalgame de terre et de blocs de toutes grosseurs, ayant à peine la fluidité du béton. En avant, à moitié prise dans cette boue très épaisse, une avant-garde de gros blocs cubant parfois jusqu'à 5 et 6 mètres semble poussée par la lave. Ces rochers, qui sont entraînés pendant quelques minutes sont engloutis dans le chaos qui les suit dès qu'ils trouvent un obstacle qui les arrête. Ils sont alors remplacés par d'autres qui sont poussés et bientôt engloutis à leur tour. (Voir fig. 2, p. 7.)

Toute cette masse n'est point animée d'une vitesse uniforme. Tantôt ce mouvement est assez rapide, tantôt il est au contraire extrêmement lent, et à certains moments même tout semble immobile. Au moindre obstacle, les blocs qui sont en avant, trouvant une résistance à vaincre, par suite de l'inégalité du lit ou d'une diminution de la pente, s'arrêtent brusquement. S'ils forment une masse suffisante, tous les matériaux qui suivent immédiatement sont arrêtés par ces barrages momentanés. Cependant le courant pousse toujours et le niveau de la lave peut alors

s'élever à une grande hauteur (jusqu'à 7 mètres au-dessus du fond du lit). Mais bientôt les matériaux franchissent l'obstacle qui les arrêtait, soit qu'ils aient passé par-dessus, soit qu'ils l'aient fait céder à la pression formidable qu'il supportait. Alors la vitesse s'accélère de nouveau et toute la masse se remet en mouvement pour s'arrêter encore.

Une fois l'avant-garde de gros blocs passée, la lave descend le canal avec une vitesse assez régulière. C'est une masse de couleur noire, à peine fluide ; sa surface semble uniquement formée de terre mélangée d'eau et présente très peu de saillies extérieures, malgré les matériaux énormes qu'elle renferme ; on dirait un fleuve de boue. Ce n'est que par moments que les gros blocs signalent leur présence au milieu de cette lave et se dressent un instant comme des tours au-dessus du flux boueux pour s'y engloutir bientôt après, alors qu'ils ont franchi l'obstacle qui les forçait de s'élever ainsi par-dessus la lave. (Voir fig. 2, p. 7.)

Cette lave descendait ainsi avec une hauteur moyenne de 4 mètres ; son profil en long était en général parallèle au lit du torrent : elle s'élevait seulement quand elle rencontrait un obstacle momentané. Le profil en travers était toujours très convexe vers le ciel, quand la lave montait, et légèrement concave, quand elle diminuait. Cette forme s'explique facilement par le frottement ou l'adhérence qu'éprouve la lave au contact des berges du torrent quand son niveau monte ou descend. (Voir fig. 2, p. 7.)

C'est ainsi que la lave épaisse descendit pendant vingt minutes environ. On n'entendait presque aucun bruit, seulement, de temps en temps, le son strident d'un rocher frottant contre la berge ou contre un autre rocher. (Fig. 86-87.)

Cependant cette lave devient de plus en plus liquide et dès lors animée d'une vitesse toujours croissante. Bientôt l'eau arrive en grande abondance ; elle coule comme un ruisseau furieux sur la lave qui elle-même marche encore lentement. Alors le bruit commence ; l'eau, arrivant avec une grande force, forme des lames qui atteignent jusqu'à 2 mètres de hauteur et avancent avec le courant qu'elles suivent. Elles entraînent ainsi des blocs assez gros qui souvent paraissent à la surface, s'entrechoquent sans cesse et font un épouvantable fracas. Mais l'eau rejoint bientôt la lave épaisse qui est en avant et lui donne une nouvelle poussée. (Fig. 88- 89.)

Enfin, quand tout est balayé par-devant, l'eau devient presque claire. Elle coule alors par-dessus la lave qui restait au fond du lit, et, devenue affouillante, se creuse un passage au milieu des débris.

On ne voit plus alors que quelques traces des matériaux entraînés qui sont restées adhérentes à la berge et témoignent seules de la hauteur à laquelle la lave est montée. L'eau a nettoyé le lit du torrent et les matériaux ont été entraînés plus loin.

Tel est le phénomène que j'ai observé dans le canal d'écoulement du torrent. Voyons maintenant ce qui s'est produit sur le cône de déjections proprement dit, où j'ai suivi pas à pas la marche de la lave.

La lave, qui se trouvait resserrée dans un canal profond, trouve tout à coup de l'espace pour s'étendre sur ce grand cône de déjections. Elle s'épanouit sur une grande largeur avec une épaisseur bien moindre et diminue par conséquent beaucoup de vitesse. Les plus gros blocs, qui se trouvaient cachés dans la lave, touchent maintenant le fond du gravier et sont peu à peu arrêtés, tandis que quelques-uns, plus petits, continuent leur marche en tournant et se montrent de temps en temps au-dessus de la boue. Quelquefois des blocs d'assez grandes dimensions sont soulevés au-dessus de la lave ; souvent on les voit flotter quelque temps sur elle, nageant comme des morceaux de bois. (Fig. 90.)

Sur certains points, au moment de la plus grande hauteur de la lave, une digue située sur la rive droite est franchie par une boue heureusement très épaisse et à peine fluide ; sur d'autres points, la digue suffit à les arrêter et l'épaisseur de la boue est telle qu'elle forme un bourrelet de 10 et 20 centimètres au-dessus du couronnement de cette digue. Pourtant les cultures sont très menacées par-derrière. Encore quelques instants comme cela, et le torrent va envahir les champs. Heureusement l'eau arrive à temps et, se creusant un passage au milieu de la lave, elle coule en ligne droite et fait baisser le niveau de cette boue. Les champs sont sauvés.

Poussée par-derrière, la lave continue de marcher tantôt en ligne droite, tantôt par côté, sur la pente du cône. Elle forme des boursouflures, s'arrête sur certains points pour divaguer ailleurs. Puis elle arrive dans une oseraie naturelle : là, elle marche sur une hauteur de 2 mètres et une largeur de 40 mètres environ, mais avec une vitesse très faible (30 centimètres par seconde).

Les arbres les plus faibles sont renversés par terre dès qu'ils sont atteints par cette masse noire : ils disparaissent engloutis dans la boue ; les plus forts résistent et sont seulement ébranlés par le choc des blocs qui viennent se heurter contre leur pied.

La vitesse de la boue devient de plus en plus faible et elle n'aurait point tardé à s'arrêter complètement, quand l'eau arrive avec un bruit épouvantable et une vitesse de 3 à 4 mètres par seconde. Elle domine la lave étendue en grande nappe sur le cône, forme des vagues de 1 mètre de hauteur au moins et entraîne souvent des blocs d'assez grandes dimensions, coulant presque toujours en ligne droite et se creusant bientôt un canal dans la boue qu'elle affouille.

Elle arrive bientôt à la passerelle de la route nationale, qui n'a qu'un faible débouché. Pendant un instant, toute l'eau passe dessous ; mais bientôt cette eau s'épaissit de nouveau, entraîne de gros blocs qui sont arrêtés sous le pont, sans qu'on les ait vus arriver. Le niveau augmente immédiatement et, en un instant, toute l'eau, redevenue lave, passe sur la route, enlève la main courante de la passerelle et continue son chemin jusqu'à l'Ubaye. Enfin, elle redevient de plus en plus claire, se creuse un nouveau lit dans la lave et tout reprend son cours habituel. […]

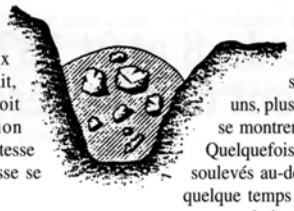


Fig. 86. Profil en travers. Lave montante.

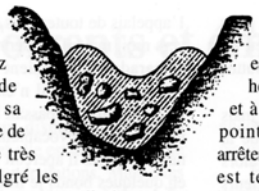


Fig. 87. Profil en travers. Lave descendante.

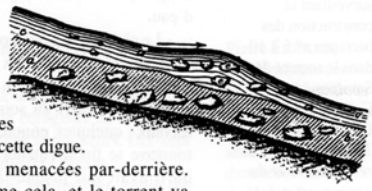


Fig. 88.
Flux d'eau passant sur la lave.
a, b. Lave.
c, d. Eau.
e. Blocs entraînés par l'eau.
f. Blocs entraînés par la lave.

Fig. 89. Flux d'eau avec blocs passant sur la lave.

Fig. 90. Profil en travers de l'eau passant sur la lave.

ANNEXE 5 : Base de données sur les biefs du torrent de Faucon.

N° RTM	ID BIEF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		m	m	m	m	m	°	°	°	m			
0	**1**	1232,0	220,8	1266,0	1272,3	1274,094	3,7	2,3	17,5	1,80			
0	**2**	1452,8	91,2	1452,8	1272,3	1274,094	3,8	2,7	17,3	1,80			
1	**3**	1544,0	38,5	1573,0	1308,5	1315,517	5,0	26,4	12,2	7,00			
2	**4**	1582,5	11,0	1590,0	1317,0	1317,500	1,7	26,2	16,2	0,50			
3	**5**	1593,5	64,5	1629,5	1318,8	1327,500	5,3	28,9	21,0	8,70	oui		
6	**6**	1658,0	74,9	1699,5	1332,5	1341,500	3,5	15,6	24,4	9,00			
7	**7**	1732,9	11,5	1738,9	1345,5	1346,500	2,4	34,8	28,5	1,00			
8	**8**	1744,4	66,1	1775,5	1347,7	1353,510	4,7	29,9	28,4	5,80			
9	**9**	1810,5	25,5	1834,5	1360,0	1369,400	4,4	29,5	22,0	9,40			
10'	**10**	1836,0	12,5	1841,0	1372,8	1375,800	6,0	25,7	20,0	3,00			
10	**11**	1848,5	23,5	1861,1	1376,0	1376,500	0,7	29,2	15,9	0,50			
12	**12**	1872,0	86,7	1897,3	1378,6	1381,346	4,0	31,4	19,3	2,70		RD	
13	**13**	1958,7	55,7	1996,7	1390,5	1398,200	4,8	13,6	17,7	7,70			
15	**14**	2014,4	29,0	2039,4	1402,7	1411,500	3,6	12,9	21,6	8,80	oui	RD	RG
16	**15**	2043,4	28,5	2057,6	1413,1	1420,039	2,5	17,1	19,3	7,00		RD	
X	**16**	2071,9	5,4	2074,9	1423,1	1424,100	4,8	12,4	25,2	1,00			
15'	**17**	2077,3	35,7	2100,6	1424,5	1424,800	3,3	15,0	23,6	0,00			
16'	**18**	2113,0	102,3	2193,5	1431,8	1432,100	8,8	11,8	30,3	0,00		RD	RG
X'	**19**	2215,3	33,5	2233,7	1457,0	1460,000	11,0	12,5	26,7	3,00			
21	**20**	2248,8	38,1	2265,8	1465,8	1466,000	7,8	20,3	27,5	0,00		RD	RG
22	**21**	2286,9	5,1	2290,4	1473,8	1474,000	9,2	13,7	25,2	0,00		RD	
23	**22**	2292,0	22,4	2302,0	1479,8	1480,000	51,2	24,0	25,5	0,00		RD	RG
24	**23**	2314,4	18,9	2327,4	1488,0	1495,000	16,1	22,3	20,1	7,00	oui	RD	RG
25	**24**	2333,3	29,8	2359,4	1496,7	1501,005	4,0	19,9	21,3	4,30			
26	**25**	2363,1	93,2	2437,1	1504,1	1506,600	4,7	21,3	26,9	2,50		RD	RG
27	**26**	2456,3	8,5	2459,3	1521,8	1525,400	7,3	18,6	20,4	3,60	oui	RD	RG
28	**27**	2464,8	5,5	2469,1	1526,3	1530,300	4,8	19,1	23,3	4,00	oui	RD	RG
29	**28**	2470,3	17,5	2478,9	1531,4	1533,200	9,0	20,2	21,5	1,80			
30	**29**	2487,8	34,5	2517,8	1534,0	1535,000	2,1	22,7	21,4	1,00			
31	**30**	2522,3	31,0	2540,7	1535,5	1541,500	0,7	21,7	21,6	6,00	oui	RD	
31a	**31**	2553,3	67,3	2597,2	1541,6	1551,077	0,1	20,6	20,2	9,50			
Gué	**32**	2620,6	24,9	2639,3	1560,9	1563,900	6,6	22,1	23,2	3,00			
31b	**33**	2645,5	40,1	2668,5	1564,0	1569,200	0,2	23,9	24,6	5,20			RG
31c	**34**	2685,6	27,7	2703,0	1574,5	1579,600	5,9	24,4	24,3	5,10		RD	RG
32	**35**	2713,3	48,3	2744,3	1582,0	1584,000	3,9	32,1	23,8	2,00			
SN1	**36**	2761,6	21,6	2766,4	1592,5	1596,500	7,9	28,4	18,6	4,00		RD	RG
SN2	**37**	2783,2	52,1	2785,0	1596,8	1600,800	0,6	27,0	26,4	4,00		RD	RG
SN3	**38**	2835,3	46,7	2856,1	1607,4	1613,400	5,7	27,9	26,2	6,00		RD	RG
33	**39**	2882,0	6,0	2885,5	1619,9	1624,900	6,3	21,4	32,4	5,00	oui	RD	RG
34	**40**	2888,0	18,8	2900,0	1625,0	1627,000	0,7	24,6	26,2	2,00			RG
35	**41**	2906,8	39,7	2939,8	1630,2	1632,234	7,7	31,1	24,1	2,00			RG
36	**42**	2946,5	53,5	2988,5	1633,1	1633,400	1,0	27,7	33,5	0,00			RG
SN4	**43**	3000,0	25,9	3007,5	1641,6	1643,600	6,9	29,5	33,3	2,00			

N° RTM	ID BIEF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		m	m	m	m	m	°	°	°	m			
SN5	**44**	3025,9	37,1	3046,4	1646,8	1651,800	5,6	32,4	33,8	5,00			
SN6	**45**	3063,0	18,9	3078,9	1655,9	1658,900	5,0	36,0	31,9	3,00			
SN7	**46**	3081,9	14,5	3089,9	1659,0	1665,000	0,2	31,0	29,0	6,00			
37	**47**	3096,4	11,5	3105,9	1665,9	1666,100	2,8	34,2	29,0	0,00			RG
38	**48**	3107,9	28,1	3129,4	1666,9	1667,200	3,1	25,4	32,6	0,00			
39	**49**	3136,0	90,0	3182,2	1671,7	1674,186	7,2	20,0	33,5	2,60	oui	RD	
39	**50**	3136,0	98,8	3226,0	1671,7	1674,186	7,2	14,2	24,9	2,60	oui	RD	
40	**51**	3324,8	23,3	3342,3	1702,1	1710,600	6,7	23,9	21,2	8,50			
41	**52**	3348,1	23,9	3356,3	1711,0	1712,400	0,8	22,5	15,2	1,40			
42	**53**	3372,0	170,0	3427,0	1714,5	1714,700	4,0	25,5	18,9	0,00		RD	RG
42	**54**	3372,0	60,6	3542,0	1714,5	1714,700	4,0	20,8	28,5	0,00		RD	RG
SN8	**55**	3602,6	67,7	3656,4	1751,1	1759,100	7,1	18,6	41,1	8,00		RD	RG
SN9	**56**	3670,3	15,2	3677,8	1774,3	1776,300	10,1	18,6	34,2	2,00		RD	
43	**57**	3685,5	9,3	3691,3	1777,0	1777,300	2,1	17,7	40,1	0,00			RG
44	**58**	3694,8	26,7	3708,3	1780,1	1780,300	13,5	16,0	43,7	0,00		RD	RG
SN10	**59**	3721,5	12,0	3729,0	1782,9	1785,400	4,4	14,9	35,0	2,50		RD	RG
45	**60**	3733,5	11,3	3741,0	1788,1	1788,400	10,1	11,7	27,3	0,00		RD	RG
SN11	**61**	3744,8	96,3	3789,2	1791,0	1792,400	10,4	13,2	28,1	1,00		RD	RG
85	**62**	3841,1	10,3	3845,1	1813,8	1816,576	10,0	16,2	19,4	2,80		RD	RG
86	**63**	3851,4	18,6	3864,4	1817,1	1819,800	2,3	15,6	22,3	2,70		RD	RG
87	**64**	3870,0	18,0	3875,0	1821,6	1825,100	4,4	15,8	18,9	3,50		RD	RG
88	**65**	3888,0	17,6	3901,9	1826,5	1829,500	3,5	17,4	12,5	3,00		RD	RG
42	**66**	3905,6	17,7	3921,6	1831,4	1833,800	4,9	12,9	15,9	2,40		RD	RG
43	**67**	3923,3	23,6	3934,3	1838,7	1841,900	12,5	10,3	18,1	3,20			RG
44	**68**	3946,9	17,3	3955,9	1842,0	1844,600	0,2	8,9	17,2	3,10			RG
45	**69**	3964,2	22,0	3979,2	1848,5	1849,900	10,1	22,0	14,3	1,40			RG
46	**70**	3986,2	23,0	3989,3	1851,9	1855,329	4,1	19,7	10,9	3,40			RG
47	**71**	4009,2	71,2	4055,3	1855,7	1861,200	0,7	38,4	19,1	5,50		RD	
SN12	**72**	4080,4	30,4	4089,0	1870,9	1874,900	6,1	33,3	15,0	4,00			
SN13	**73**	4110,8	18,5	4110,1	1879,1	1885,100	6,2	23,1	26,6	6,00			
50	**74**	4129,3	18,3	4133,8	1890,9	1894,800	14,1	34,2	20,3	3,90			
51	**75**	4147,6	47,2	4177,9	1896,0	1899,521	3,0	35,5	27,1	3,50			
53	**76**	4194,8	84,0	4213,8	1905,3	1905,500	5,5	37,4	23,7	0,00		RD	
SN14	**77**	4278,8	42,3	4281,8	1923,4	1927,400	9,6	17,7	34,6	4,00		RD	
SN15	**78**	4321,1	42,2	4348,1	1930,3	1934,300	3,1	14,1	35,2	4,00			
SN16	**79**	4363,3	21,1	4370,0	1948,3	1952,282	14,9	31,5	22,0	4,00			
SN17	**80**	4384,4	42,2	4410,4	1953,5	1959,500	2,6	26,7	15,9	6,00			
54	**81**	4426,6	77,7	4435,1	1964,0	1967,000	4,8	28,0	29,2	3,00			
SN18	**82**	4504,3	39,7	4521,7	1977,8	1988,800	6,3	24,9	46,1	11,00			
SN19	**83**	4544,0	65,8	4554,0	1995,4	2013,400	7,5	19,2	31,3	18,00			
SN20	**84**	4609,8	56,0	4635,7	2016,9	2028,900	2,4	14,4	34,8	12,00			RG
SN21	**85**	4665,8	13,2	4672,3	2030,5	2046,500	1,3	9,1	31,5	16,00			RG
56	**86**	4679,0	17,6	4691,9	2048,7	2049,700	7,5	12,0	30,2	1,00			RG

N° RTM	ID BIEF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		m	m	m	m	m	°	°	°	m			
57	**87**	4696,6	74,0	4731,6	2052,9	2052,900	8,2	13,9	33,6	0,00			
58	**88**	4770,6	18,0	4784,1	2068,6	2069,600	9,5	14,3	27,0	1,00			
59	**89**	4788,6	96,5	4807,9	2071,3	2072,800	4,3	12,4	34,4	1,50			
60	**90**	4885,1	104,9	4958,7	2091,9	2093,900	8,9	25,4	28,5	2,00		RD	
62	**91**	4990,0	15,5	4992,0	2111,8	2113,972	7,7	29,8	31,3	2,20			
63	**92**	5005,5	19,2	5017,0	2121,6	2121,800	22,1	32,7	34,5	0,00			
64	**93**	5024,7	89,4	5059,5	2124,6	2127,600	6,6	35,0	28,3	3,00			
60+4	**94**	5114,1	9,4	5120,1	2143,8	2144,000	8,2	41,7	26,3	0,00			
65	**95**	5123,5	36,5	5155,0	2144,6	2147,117	2,9	38,3	36,7	2,50			
66	**96**	5160,0	16,0	5170,0	2153,6	2153,800	8,0	37,4	34,7	0,00			
67	**97**	5176,0	13,7	5186,0	2159,4	2161,600	15,7	43,6	31,1	2,20			
68	**98**	5189,7	20,0	5197,7	2164,0	2167,500	7,9	37,4	31,5	3,50			
SN22	**99**	5209,7	21,7	5225,7	2169,2	2172,200	3,8	23,8	22,8	3,00			
69	**100**	5231,4	16,4	5237,4	2175,9	2179,900	7,7	23,9	22,3	4,00			
70	**101**	5247,8	27,0	5258,0	2181,7	2184,702	4,9	19,5	20,6	3,00			
71	**102**	5274,8	16,5	5284,8	2189,1	2192,100	7,3	22,5	21,4	3,00			
72	**103**	5291,3	21,8	5304,0	2193,8	2194,800	4,6	21,9	22,1	1,00			
72'	**104**	5313,1	38,9	5338,1	2197,8	2200,281	6,2	29,9	23,9	2,50			
SN23	**105**	5352,0	82,8	5373,0	2208,1	2208,400	9,0	33,0	21,9	0,00			
SN24	**106**	5434,8	34,7	5441,9	2229,5	2236,500	11,5	28,6	31,3	7,00			
73	**107**	5469,5	159,5	5549,3	2244,0	2249,549	9,7	29,3	32,6	5,50			
74	**108**	5629,0	47,8	5639,0	2313,0	2317,933	17,9	20,1	27,3	4,50			
SN25	**109**	5676,8	54,8	5686,8	2328,8	2329,000	10,2	24,4	26,3	0,00			
SN26	**110**	5731,6	23,4	5752,6	2331,0	2376,000	1,6	18,5	21,0	45,00			
75	**111**	5755,0	245,0	5769,0	2382,0	2388,000	11,5	16,1	25,1	6,00			
			43,0										

*** B=bon, F=enfoui, D=détruit, M=mauvais état, E=endommagé, SN=seuil naturel**

N° RTM	ID BIEF	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
		m	m			m	Ht 10m						
0	**1**	8,0	13,0	U	0,15	4,0	63,4	VA	VA	FS02	FS02		
0	**2**	8,0	13,0	U	0,22	4,0	14,7	VA	VA	FS02	FS02		
1	**3**	7,0	22,0	U	0,18	3,0	290,4	VA	VA	FS02	FS02		
2	**4**	6,0	6,0	U	0,23	5,0	277,2	VA	VA	FS02	FS02, FS01		
3	**5**	8,0	30,0	U	0,26	3,5	249,1	VA	VA	FS02	FS02, FS01		
6	**6**	5,0	35,0	U	0,32	4,0	383,3	VA, SN	VA	FS02	FS02, FS01		
7	**7**	3,0	8,0	U	0,36	2,5	174,0	VA, SN	VA	FS02	FS02, FS01		
8	**8**	9,0	32,0	U	0,32	2,5	399,5	VA, SN	VA	FS02	FS02, FS01		
9	**9**	6,0	26,0	U	0,28	3,0	328,8	VA, SN	VA	FS02	FS02, FS01		
10'	**10**	8,0	24,0	U dys	0,25	3,0	452,6	VA	VA	FS02	FS02, FS01		
10	**11**	5,0	17,0	U dys	0,29	3,0	461,4	VA, SN	VA	FS02	FS02, FS01		
12	**12**	5,0	18,0	U dys	0,29	3,5	249,1	SN	VA	FS02, FS05	FS02, FS01		
13	**13**	5,0	35,0	U dys	0,21	3,0	231,5	VA	VA	FS02	FS02, FS01		
15	**14**	8,0	19,0	V	0,22	5,0	119,4	SN	SN	FS02, FS05	FS02, FS06, FS01		
16	**15**	5,0	21,0	U	0,22	3,5	216,7	SN	SN	FS02, FS05	FS02, FS01		
X	**16**	5,0	5,0	V	0,20	5,0	200,5	VA, SN	SN	FS02	FS02, FS01		
15'	**17**	5,0	5,0	V	0,22	5,0	122,4	VA, SN	SN	FS02	FS02, FS01		
16'	**18**	4,0	4,0	V dys	0,36	5,0	241,8	VA	SN	FS02, FS05	FS02, FS05, FS01		
X'	**19**	5,5	5,5	V dys	0,26	5,0	140,1	VA	VA	FS02	FS02, FS01		
21	**20**	4,20	4,20	V	0,34	5,0	143,0	VA, SN	VA	FS02, FS05	FS02, FS05, FS01		
22	**21**	4,00	4,00	V	0,27	5,0	188,7	VA	VA	FS02, FS05	FS02, FS05, FS01		RD
23	**22**	4,00	4,00	V	0,31	5,0	154,8	VA, SN	VA, SN	FS02, FS05	FS02, FS05, FS01		RD
24	**23**	7,0	20,0	U	0,25	3,5	252,1	VA	VA	FS02, FS05	FS02, FS01		
25	**24**	5,0	25,0	V	0,24	5,0	318,4	VA	VA	FS02	FS02, FS01		
26	**25**	3,0	9,0	V	0,30	3,5	176,9	VA	VA	FS02, FS05, FS01	FS02, FS05, FS01		
27	**26**	5,0	13,0	V	0,22	5,0	403,9	VA, SN	VA	FS02, FS01	FS02		
28	**27**	6,0	16,0	V	0,24	5,0	347,9	VA	VA	FS02, FS01	FS02		
29	**28**	8,0	19,0	U dys	0,22	2,5	324,3	VA	VA	FS02, FS01	FS02		
30	**29**	3,0	23,0	U	0,24	2,5	153,3	VA	VA	FS02, FS01	FS02		
31	**30**	5,0	25,0	U	0,24	5,0	125,3	VA	VA, SN	FS02, FS01	FS02, FS01		
31a	**31**	5,0	27,0	U	0,24	2,0	218,2	VA, SN	VA, SN	FS02, FS01	FS02, FS01		
Gué	**32**	4,0	21,0	U	0,26	5,0	147,4	VA, SN	VA, SN	FS02, FS01	FS02, FS01		
31b	**33**	6,0	27,0	V	0,29	2,5	210,8	VA	VA	FS02, FS01	FS02, FS05, FS01		
31c	**34**	8,0	20,0	V	0,29	5,0	222,6	VA, SN	SN	FS02, FS05, FS01	FS02, FS05	RG	
32	**35**	6,0	18,0	V	0,31	5,0	184,3	VA, SN	VA, SN	FS02, FS06, FS01	FS02, FS05		
SN1	**36**	7,0	7,0	V	0,29	5,0	134,2	VA, SN	VA, SN	FS02, FS05, FS01	FS02, FS05, FS01		
SN2	**37**	7,0	7,0	V	0,31	5,0	117,9	VA, SN	VA, SN	FS02, FS05, FS01	FS02, FS05, FS01		
SN3	**38**	6,0	6,0	V	0,33	5,0	176,9	SN	SN	FS02, FS05	FS02, FS05, FS01		
33	**39**	10,0	20,0	V	0,29	5,0	175,4	VA	VA, SN	FS02, FS05	FS02, FS05, FS01		
34	**40**	10,0	20,0	Vdys	0,33	5,0	235,9	VA	VA, SN	FS02, FS05	FS02, FS05, FS01		
35	**41**	12,0	24,0	Vdys	0,39	5,0	218,2	SN	VA, SN	FS02, FS04, FS01	FS02, FS05, FS01		
36	**42**	4,0	15,0	Vdys	0,34	5,0	156,3	SN	VA, SN	FS04, FS01	FS02, FS05, FS04, FS02		
SN4	**43**	6,0	6,0	V	0,37	5,0	92,9	SN	SN	FS04, FS01	FS02, FS04, FS02		

N° RTM	ID BIEF	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
		m	m			m	Ht 10m						
SN5	**44**	4,0	4,0	V	0,37	5,0	92,9	SN	SN	FS04, FS01	FS02, FS04, FS02		
SN6	**45**	4,0	4,0	V	0,41	5,0	82,6	SN	SN	FS04, FS01	FS02, FS04		
SN7	**46**	4,0	4,0	V	0,38	5,0	119,4	SN	SN	FS04, FS01	FS02		
37	**47**	4,0	4,0	V	0,41	5,0	81,1	VA, SN	VA	FS04, FS01	FS02		
38	**48**	7,0	7,0	V	0,32	5,0	137,1	VA, SN	VA	FS02, FS05, FS04, FS01	FS02		
39	**49**	9,0	20,0	Udys	0,28	3,5	308,1	VA	VA	FS02, FS01	FS02, FS01		RG
39	**50**	9,0	20,0	U	0,25	4,0	321,4	VA	VA	FS02, FS05, FS01	FS02, FS01		
40	**51**	7,0	27,0	U	0,30	2,0	356,8	VA	VA	FS02, FS01	FS02, FS01		
41	**52**	9,0	22,0	U	0,21	2,0	314,0	VA	VA	FS02, FS01	FS02, FS01		
42	**53**	11,0	25,0	V	0,25	2,5	188,7	VA	VA	FS02, FS01	FS02, FS05, FS06, FS01		
42	**54**	11,0	25,0	V	0,26	5,0	333,2	VA	VA, SN	FS02, FS06, FS01	FS02, FS06, FS04, FS01		
SN8	**55**	4,0	4,0	V	0,39	5,0	137,1	VA, SN	SN	FS02, FS06, FS05, FS01	FS04, FS01		
SN9	**56**	4,0	4,0	V	0,49	5,0	225,6	VA, SN	SN	FS02, FS05, FS01	FS04, FS01		
43	**57**	5,0	5,0	V	0,54	2,5	172,5	VA, SN	SN	FS02, FS01	FS02, FS04, FS02		
44	**58**	3,0	3,0	V	0,45	5,0	154,8	VA, SN	VA, SN	FS02, FS06, FS01	FS02, FS06, FS01		
SN10	**59**	4,0	4,0	V	0,43	5,0	275,7	VA	VA, SN	FS02, FS06, FS01	FS02, FS06, FS01		
45	**60**	4,0	4,0	V	0,29	5,0	383,3	VA	VA, SN	FS02, FS06, FS01	FS02, FS06, FS01		
SN11	**61**	4,0	4,0	V	0,31	5,0	253,6	VA, SN	VA	FS02, FS06, FS01	FS02, FS06, FS07, FS01		
85	**62**	6,0	20,0	U	0,21	1,5	421,6	VA, SN	VA, SN	FS02, FS06, FS01	FS07		
86	**63**	6,0	25,0	U	0,18	2,0	287,5	VA, SN	VA, SN	FS02, FS06, FS01	FS07		
87	**64**	5,0	22,0	U	0,19	3,0	328,8	VA, SN	VA, SN	FS02, FS06, FS01	FS07		
88	**65**	8,0	8,0	U	0,18	5,0	427,5	VA, SN	VA, SN	FS02, FS06, FS01	FS07		
42	**66**	6,0	28,0	U	0,21	2,5	294,8	VA, SN	VA, SN	FS02, FS06, FS01	FS07		
43	**67**	6,0	6,0	U	0,24	3,0	367,1	VA, SN	VA, SN	FS02, FS01	FS07		
44	**68**	7,0	7,0	U	0,21	2,5	289,0	SN	VA, SN	FS02, FS01	FS07		
45	**69**	7,0	7,0	U	0,19	3,0	253,6	SN	VA, SN	FS02, FS01	FS07		
46	**70**	5,0	5,0	U	0,20	5,0	521,9	SN	VA, SN	FS02, FS01	FS07	RD	
47	**71**	8,0	25,0	U	0,38	5,0	137,1	VA	VA	FS03, FS07, FS01	FS03, FS07, FS04		
SN12	**72**	8,0	8,0	V	0,36	5,0	126,8	VA, SN	VA, SN	FS03	FS03, FS04		
SN13	**73**	5,0	5,0	U	0,33	5,0	302,2	VA, SN	VA, SN	FS03	FS03, FS04		
50	**74**	12,0	12,0	U	0,46	2,5	359,7	VA	VA	FS03	FS03, FS04		
51	**75**	3,0	25,0	U	0,31	1,5	412,8	VA	VA	FS03	FS03, FS04		RG
53	**76**	7,0	16,0	U	0,33	2,0	255,0	VA	VA	FS03, FS07	FS03		
SN14	**77**	5,0	29,0	U dys	0,34	5,0	424,6	VA, SN	VA	FS03, FS07	FS03		
SN15	**78**	18,0	18,0	U dys	0,41	5,0	318,4	VA, SN	VA	FS03	FS03		
SN16	**79**	17,0	17,0	U	0,29	5,0	464,4	VA	VA, SN	FS03	FS03		
SN17	**80**	14,0	14,0	U dys	0,31	5,0	318,4	VA,VH,SN	VA, SN	FS03	FS03		
54	**81**	5,0	18,0	U dys	0,36	5,0	289,0	VH, SN	VA, SN	FS03	FS02		
SN18	**82**	7,0	7,0	U dys	0,35	5,0	339,1	VA	SN	FS03	FS02		
SN19	**83**	5,5	5,5	U dys	0,35	3,0	452,6	VA, SN	SN	FS03	FS02		
SN20	**84**	7,0	7,0	U dys	0,34	5,0	318,4	VA, VH, SN	SN	FS03	FS03, FS07		
SN21	**85**	8,5	8,5	U dys	0,30	5,0	414,3	VA,VH,SN	SN	FS03	FS03, FS07		
56	**86**	8,5	14,0	U dys	0,35	5,0	0,0	VA, SN	VA, SN	FS03	FS03, FS07		

N° RTM	ID BIEF	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
		m	m			m	Ht 10m						
57	**87**	7,0	14,5	U dys	0,32	3,5	460,0	VH, VA	VH, VA	FS03	FS03		
58	**88**	9,0	15,0	U dys	0,28	3,5	539,6	VH, VA	VH, VA	FS03	FS03		
59	**89**	13,0	17,0	U dys	0,30	5,0	604,4	VH, VA	VH, VA	FS03	FS03		
60	**90**	10,0	10,0	U dys	0,32	5,0	283,1	VA	VH, VA,SN	FS03	FS03		
62	**91**	8,0	18,0	U dys	0,34	3,0	299,3	VH, VA	VH, VA	FS03	FS03		
63	**92**	12,0	19,0	U dys	0,36	2,0	457,0	VA, VH	VA, VH	FS03	FS03, FS04		
64	**93**	11,0	15,0	U dys	0,34	5,0	399,5	VA, VH, SN	VA, VH,	FS03, FS04	FS03		RG
60+4	**94**	5,0	5,0	V	0,41	5,0	258,0	VA, VH, SN	VA, VH,	FS04	FS04		RD
65	**95**	10,0	10,0	V	0,44	5,0	174,0	VH, SN	VH, SN	FS04	FS04		RD
66	**96**	12,0	12,0	V	0,38	5,0	169,5	VH, SN	VH, SN	FS04	FS04		RD
67	**97**	4,5	12,0	V	0,41	5,0	235,9	VH, SN	VH, SN	FS04	FS04		RD
68	**98**	6,0	9,0	V	0,39	5,0	305,2	VH, SN	VH, SN	FS04	FS04		RD
SN22	**99**	7,0	7,0	V	0,29	5,0	460,0	VH, SN	VH, SN	FS04	FS04		RD
69	**100**	13,0	13,0	V	0,25	5,0	647,2	VH, SN	VH, SN	FS04	FS04		RD ,
70	**101**	7,0	21,0	V	0,25	2,5	470,3	VH, SN	VH, SN	FS04	FS04		RD ,
71	**102**	3,0	12,0	V	0,24	5,0	505,7	VH, SN	VH, SN	FS04	FS04		RD ,
72	**103**	6,0	15,0	V	0,24	5,0	433,4	VH, SN	VH, SN	FS04	FS04		RD ,
72'	**104**	8,0	14,0	V	0,32	5,0	350,9	VH, SN	VH, SN	FS04	FS04		RD ,
SN23	**105**	9,0	11,0	V	0,35	5,0	269,8	VH, SN	VH, SN	FS04	FS04		RD ,
SN24	**106**	10,0	12,0	V	0,35	5,0	362,7	VH, SN	VH, SN	FS04	FS04		RD ,
73	**107**	10,0	10,0	V	0,38	5,0	216,7	VH, SN	VH, SN	FS04	FS04		RD ,
74	**108**	6,0	6,0	V	0,33	5,0	429,0	VH, SN	VH, SN	FS04	FS04		RD ,
SN25	**109**	5,0	5,0	V	0,31	5,0	182,8	SN	SN	FS04	FS04		RD ,
SN26	**110**	6,0	6,0	V	0,25	5,0	296,3	SN	SN	FS04	FS04		RD ,
75	**111**	6,0	6,0	V	0,26	5,0	278,6	SN	SN	FS04	FS04		
		5,0	5,0	V	0,41	5,0	258,0	VA, VH, SN	VA, VH,	FS04	FS04		RD

*** B=bon, F=enfoui, D=détruit, M=mauvais état, E=endommagé, SN=seuil naturel**

ANNEXE 6 : Base de données sur les biefs du torrent de Champerousse.

N° RTM	ID BIEF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		m	m	m	m	m	°	°	°	m			
Faucon	**1**	0,00	8,00	3,00	1685,00	1685,00	12,9	8,6	24,7	0,0			
N1	**2**	8,50	15,00	17,50	1687,30	1690,10	0,1	9,8	28,1	2,8	oui		
N2	**3**	23,50	19,00	32,50	1690,13	1693,13	2,4	19,4	44,0	3,0			
N3	**4**	42,50	19,00	50,50	1694,16	1697,16	4,8	18,9	27,0	3,0			
N4	**5**	61,50	21,00	73,50	1699,19	1703,69	2,6	23,8	21,4	4,5			
N5	**6**	82,50	19,00	91,50	1704,92	1708,22	1,5	20,3	14,4	3,3			
N6	**7**	101,50	14,00	110,50	1708,85	1711,75	4,6	15,3	9,8	2,9			
N7	**8**	115,50	26,00	128,50	1713,18	1715,28	5,9	13,6	5,7	2,1			
N8	**9**	141,50	13,00	149,00	1718,70	1721,00	0,3	6,7	6,8	2,3			
N9	**10**	154,50	9,00	160,00	1721,08	1721,68	1,4	11,3	4,6	0,6			
N10	**11**	163,50	8,00	169,00	1721,97	1723,77	9,4	7,7	2,4	1,8			
N11	**12**	171,50	7,00	176,50	1725,45	1726,85	1,0	7,4	0,8	1,4			
N12	**13**	178,50	15,00	186,50	1727,00	1729,40	0,3	4,3	-2,0	2,4			
N13	**14**	193,50	28,00	196,50	1729,50	1733,50	1,3	3,0	-7,0	4,0			
10	**15**	221,50	29,00	225,50	1734,34	1734,34	15,9	12,9	6,3	0,0			
Chemin _A	**16**	250,50	32,00	257,50	1744,57	1744,57	10,6	10,1	21,8	0,0			
11	**17**	282,50	15,00	290,00	1752,11	1752,22	9,9	10,6	18,8	0,1			
11+1	**18**	297,50	12,00	304,00	1755,53	1755,64	9,8	10,6	18,2	0,1			
11+2	**19**	309,50	18,00	318,00	1758,27	1758,38	10,0	11,0	18,9	0,1			
11+3	**20**	327,50	20,00	336,00	1762,38	1762,38	10,1	10,4	17,9	0,0			
12	**21**	347,50	32,00	372,50	1766,87	1768,57	8,8	17,2	27,3	1,7			
13	**22**	379,50	23,00	389,50	1774,84	1774,94	8,8	22,5	27,3	0,1			
14	**23**	402,50	30,00	410,00	1779,41	1781,12	10,2	20,2	27,4	1,7			
15	**24**	432,50	24,00	445,00	1787,91	1789,41	12,6	23,1	19,2	1,5			
16	**25**	456,50	23,00	474,00	1796,14	1797,64	3,8	34,6	15,0	1,5	oui		
17	**26**	479,50	21,00	488,00	1799,57	1801,87	10,1	30,5	28,4	2,3	oui		
18	**27**	500,50	13,00	511,50	1806,57	1807,07	14,3	29,1	20,5	0,5			
19	**28**	513,50	13,00	521,50	1811,20	1812,20	17,7	27,9	17,5	1,0		RG	
20	**29**	526,50	36,00	544,00	1817,33	1818,33	15,9	25,2	17,3	1,0			
22	**30**	562,50	21,00	573,50	1831,08	1833,68	6,9	22,5	15,9	2,6			
23	**31**	583,50	30,00	599,50	1836,88	1836,88	15,4	25,3	13,5	0,0			
24	**32**	613,50	30,00	627,50	1847,18	1848,18	13,2	30,7	7,6	1,0			
25	**33**	643,50	36,00	645,50	1856,97	1857,47	10,5	30,5	7,1	0,5			
26	**34**	679,50	19,00	685,50	1865,89	1866,01	10,7	18,4	13,7	0,1			
27	**35**	698,50	18,00	705,00	1870,51	1871,01	13,0	18,4	13,9	0,5			
28	**36**	716,50	15,00	722,50	1876,22	1876,37	13,4	11,8	12,1	0,1			
29	**37**	731,50	15,00	736,50	1880,83	1881,33	11,2	8,4	10,6	0,5			
30	**38**	746,50	47,00	756,50	1885,08	1886,48	10,2	5,4	12,0	1,4			
31	**39**	793,50	22,00	808,00	1897,14	1897,94	9,0	-0,2	9,7	0,8			
32	**40**	815,50	17,00	821,00	1902,36	1903,16	11,0	-2,3	13,6	0,8			
33	**41**	832,50	17,50	835,00	1907,32	1907,32	15,9	0,4	12,0	0,0			
Chemin _B	**42**	850,00	4,00	852,00	1913,50	1913,50	0,0	0,5	18,2	0,0			
Bassin Recep	**43**	854,00	783,00	1074,00	1913,50	2430,00	29,7	23,3	23,0	0,0			

N° RTM	ID BIEF	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
		m	m			m	Ht 10m						
Faucon	**1**	2,0	30,0	U	3,56	0,20	2,5	SN	SN	FS02	FS02		
N1	**2**	2,5	5,0	U	3,64	0,23	3,5	VA	VA	FS02	FS02		
N2	**3**	3,0	7,5	V	2,53	0,25	4,5	VA	VA	FS02	FS02		
N3	**4**	3,0	7,5	V	3,82	0,21	5,0	VA	VA	FS02	FS02		
N4	**5**	4,5	8,0	Vdys	3,45	0,14	5,0	VA	VA	FS02	FS02		
N5	**6**	4,5	8,0	Vdys	4,34	0,24	5,0	VA	VA	FS02, FS01	FS02, FS01		
N6	**7**	4,5	8,0	Vdys	5,09	0,17	5,0	VA	VA	FS02, FS01	FS02, FS01		
N7	**8**	2,0	8,0	Udys	6,26	0,10	5,0	VA	VA	FS02, FS01	FS02, FS01		
N8	**9**	4,5	8,5	Udys	8,40	-0,14	5,0	VA	VA	FS02, FS01	FS02, FS01		
N9	**10**	1,5	8,5	Udys	8,34	-0,39	5,0	VA	VA	FS02, FS01	FS02, FS01		
N10	**11**	2,5	9,0	Udys	13,55	-0,35	4,0	VA	VA	FS02, FS01	FS02, FS01		
N11	**12**	3,0	9,0	Udys	11,54	-0,07	4,0	VA	VA	FS02, FS01	FS02, FS01		
N12	**13**	4,5	10,0	U	14,45	-0,05	4,0	VA	VA	FS02, FS01	FS02, FS01		
N13	**14**	6,5	12,0	U	9,88	0,12	4,5	VA	VA	FS02, FS01	FS02, FS01		
10	**15**	2,0	4,5	V	7,99	-0,20	3,0	VA	VA	FS02, FS01	FS02, FS01		
Chemin _A	**16**	5,5	9,0	Udys	4,00	0,10	6,5	VA	VA	FS02	FS02		
11	**17**	2,5	7,5	Vdys	4,28	0,28	7,5	VA	VA	FS02	FS02		
11+1	**18**	2,0	7,5	Vdys	4,74	0,26	5,0	VA	VA	FS02	FS02		
11+2	**19**	2,0	7,5	Vdys	4,58	0,24	5,0	VA	VA	FS02	FS02		
11+3	**20**	2,0	7,5	Vdys	5,02	0,17	5,0	VA	VA	FS02	FS02		
12	**21**	4,5	7,0	U	3,46	0,15	3,0	VA	VA	FS02	FS02		
13	**22**	2,5	3,5	V	2,85	0,06	3,5	VA	VA	FS02, FS03	FS02, FS03		
14	**23**	2,5	3,5	V	2,68	0,03	4,0	VA	VA	FS02, FS03	FS02, FS03		
15	**24**	3,0	4,5	V	3,87	-0,08	3,0	VA	VA	FS02, FS03	FS02, FS03		
16	**25**	2,5	5,0	V	2,80	-0,24	3,5	VA	VA	FS02, FS03	FS02, FS03		
17	**26**	3,5	5,0	V	2,64	-0,08	4,0	VA	VA	FS02, FS03	FS02, FS03		
18	**27**	2,5	5,0	V	3,41	-0,09	4,0	VA	VA	FS03	FS03		
19	**28**	2,5	5,0	V	3,40	-0,14	4,0	VA	VA	FS03	FS03		
20	**29**	2,5	5,0	V	3,19	-0,20	3,5	VA	VA	FS03	FS03		
22	**30**	1,5	3,0	V	3,80	-0,09	4,0	VA	VA	FS03	FS03		
23	**31**	2,0	3,5	V	3,55	-0,21	3,5	VA, VH	VA, VH	FS03	FS03		
24	**32**	3,0	5,0	V	2,76	-0,38	4,0	VA	VA	FS03	FS03		
25	**33**	3,5	6,0	U	3,37	-0,37	2,0	VA	VA	FS03	FS03		
26	**34**	3,5	6,0	U	4,82	-0,11	2,5	VA	VA	FS03	FS03		
27	**35**	3,5	6,0	U	4,78	-0,11	3,0	VA	VA	FS03	FS03		
28	**36**	3,0	7,5	U	6,91	-0,14	2,5	VA	VA	FS03	FS03		
29	**37**	3,5	7,5	U	8,97	-0,01	2,0	VA	VA	FS03	FS03		
30	**38**	4,0	6,0	U	8,74	0,27	2,0	VA, VH	VA, VH	FS03	FS03		
31	**39**	4,0	6,0	U	9,10	0,37	1,5	VA, VH	VA, VH	FS03	FS03		
32	**40**	5,0	7,5	U	5,80	0,43	1,5	VA, VH	VA, VH	FS03	FS03		
33	**41**	5,0	7,5	U	8,48	0,22	2,0	VA, VH	VA, VH	FS03	FS03		
Chemin _B	**42**	5,0	7,5	U	4,63	0,35	2,0	VA, VH	VA, VH	FS03	FS03		
Bassin Recep	**43**	3,0	3,0	V	3,24	-0,04	1,5	VH, SN	VH, SN	FS03	FS03		

ANNEXE 7 : Catalogue photographique des seuils du torrent de Faucon.

Id 1 **n° 0** **RTM n°0** Alt.: 1274.1 (GPS) Juillet 2004 Photo 2

Id 1 **n° 1** **RTM n°1** Alt: 1315.5 (GPS) Juillet 2004 Photo 3

Id 3 **n° 1b** **RTM n°2** Alt: 1317.5 Juillet 2004 Photo 7

Id 4 **n° 2** **RTM n°3** Alt: 1327.5 Juillet 2004 Photo 6

Id 5 **n° 3** **RTM n°6** Alt: 1341.5 Juillet 2004 Photo 9

Id 6 **n° 3b** **RTM n°7** Alt: 1346.5 Juillet 2004 Photo 10

Id 7 **n° 4** **RTM n°8** Alt : 1353.51 (GPS) Juillet 2004 Photo 12

Id 8 **n° 5** **RTM n°9** Alt: 1369.4 Juillet 2004 Photo 13

Id 9 **n° 6** **RTM n°10'** Alt: 1375.8 Juillet 2004 Photo 14

Id 10 **n° 7** **RTM n°10** Alt.: 1376.5 Juillet 2004 Photo 15

Id 11 **n° 8** **RTM n°12** Alt : 1381.346 (GPS) Juillet 2004 Photo 16

Id 12 **n° 9** **RTM n°14** Alt.: 1398.2 Juillet 2004 Photo 17

Id 13 **n° 15** **RTM n°15** Alt.: 1411.5 Juillet 2004 Photo 20

Id 14 **n° 16** **RTM n°16** Alt : 1420.039 (GPS) Juillet 2004 Photo 21

Id 15 **n° 16+1** **RTM n°X** Alt.: 1424.1 Juillet 2004 Photo 22
Id 16 **n° 16+2** **RTM n°15'** Alt.: 1424.8 Juillet 2004 Photo 22

Id 17 **n° 16+3** **RTM n°16'** Alt.: 1432.1 Juillet 2004 Photo 23

Id 18 **n° 16+4** **RTM n°X'** Alt.: 1460 Juillet 2004 Photo 24

Id 19 **n° 16+5** **RTM n°21** Alt.: 1466 Juillet 2004 Photo 25

Id 20 **n° 16+6** **RTM n°22** Alt.: 1474 Juillet 2004 Photo 26

Id 21 **n° 16+7** **RTM n°23** Alt.: 1480 Juillet 2004 Photo 27

Id 22 **n° 16+8** **RTM n°24** Alt.: 1495 Juillet 2004 Photo 28

Id 23 **n° 25** **RTM n°25** Alt : 1501.005 (GPS) Juillet 2004 Photo 30

Id 24 **n° 25+1** **RTM n°26** Alt.: 1506.6 Juillet 2004 Photo 31

Id 25 **n° 25+2** **RTM n°27** Alt.: 1525.4 Juillet 2004 Photo 32

Id 26 **n° 25+3** **RTM n°28** Alt.: 1530.3 Juillet 2004 Photo 33

Id 27 **n° 25+4** **RTM n°29** Alt.: 1533.2 Juillet 2004 Photo 34

Id 28 **n° 30** **RTM n°30** Alt.: 1535 Juillet 2004 Photo 35

Id 29 **n° 30+1** **RTM n°31** Alt.: 1541.5 Juillet 2004 Photo 36

Id 30 **n° 30+2** **RTM n°31a** Alt.: 1551.077 (GPS) Juillet 2004 Photo 38

Id 31 **n° 30+3** **RTM n°Gué** Alt.: 1563.9 Mai 2004 Photo 36

Id 32 **n° 30+4** **RTM n°31b** Alt.: 1569.2 Mai 2004 Photo 42

Id 33 **n° 30+5** **RTM n°31c** Alt.: 1579.6 Mai 2004 Photo 44

Id 34 **n° 30+6** **RTM n°32** Alt.: 1584 Mai 2004 Photo 45

Photos Seuils manquants Id 35 (**SN1**), Id 36 (**SN2**) et Id 37 (**SN3**)

Id 38 **n° 30+7** **RTM n°33** Alt.: 1624.9 Mai 2004 Photo 47-48

Id 39 **n° 30+8** **RTM n°34** Alt.: 1627 Mai 2004 Photo 49

Id 40 **n° 30+9** **RTM n°35** Alt.: 1632.234 (GPS) Mai 2004 Photo 50-51

Id 41 **n° 30+10** **RTM n°36** Alt.: 1633.4 Mai 2004 Photo 52

Id 42 **n° SN4** **RTM n°SN4** Alt.: 1643.6 Mai 2004 Photo 54

Id 43 **n° SN5** **RTM n°SN5** Alt.: 1651.8 Mai 2004 Photo 55

Id 44 **n° SN6** **RTM n°SN6** Alt.: 1658.9 Mai 2004 Photo 56

Id 45 **n° SN7** **RTM n°SN7** Alt.: 1665 Mai 2004 Photo 57

Id 46 **n° 30+11** **RTM n°37** Alt.: 1666.1 Mai 2004 Photo 58

Id 47 **n° 30+12** **RTM n°38** Alt.: 1667.2 Mai 2004 Photo 60-61-62

Id 48 **n° 30+13** **RTM n°39** Alt : 1674.186 (GPS) Mai 2004 Photo 64

Id 49 **n° 30+14** **RTM n°40** Alt.: 1710.6 Mai 2004 Photo 69

Id 50 **n° 41** **RTM n°41** Alt.: 1712.4 Mai 2004 Photo 71-72

Id 51 **n° 41+1** **RTM n°42** Alt.: 1714.7 Mai 2004 Photo 76-77

Id 52 **n° SN8** **RTM n°SN8** Alt.: 1759.1 Mai 2004 Photo 80

Id 53 **n° SN9** **RTM n°SN9** Alt.: 1776.3 Mai 2004 Photo 81

Id 54 **n° 41+2** **RTM n°43** Alt.: 1777.3 Mai 2004 Photo 83

Id 55 **n° 41+3** **RTM n°44** Alt.: 1780.3 Mai 2004 Photo 85

Id 56 **n° SN10** **RTM n°SN10** Alt.: 1785.4 Mai 2004 Photo 87

Id 57 **n ° 41+4** **RTM n°45** Alt.: 1788.4 Mai 2004 Photo 88

Id 58 **n° SN11** **RTM n°SN11** Alt.: 1792.4 Mai 2004 Photo 89

Id 59 **n° 41+5** **RTM n°85** Alt : 1816.576 (GPS), Mai 2004 Photo 91

Id 60 **n° 41+6** **RTM n°86** Alt.: 1819.8 Mai 2004 Photo 92

Id 61 **n° 41+7** **RTM n°87** Alt.: 1825.1 Mai 2004 Photo 93

Id 62 **n° 41+8** **RTM n°88** Alt.: 1829.5 Mai 2004 Photo 94

Id 63 **n° 41+9** **RTM n°42** Alt.: 1833.8 Mai 2004 Photo 95
Id 64 **n° 41+10** **RTM n°43** Alt.: 1841.906 (GPS) Mai 2004 Photo 95

Id 65 **n° 41+11** **RTM n°44** Alt.: 1844.6 Mai 2004 Photo 96

Id 66 **n° 41+12** **RTM n°45** Alt.: 1849.9 Mai 2004 Photo 97

Id 67 **n° 41+13** **RTM n°46** Alt : 1855.329 (GPS) Mai 2004 Photo 98

Id 68 **n°41+14** **RTM n°47** Alt : 1861.2 Juillet 2004 Photo 49
Photos Seuils manquants, Id 69 (**SN12**) et Id 70 (**SN13**)

Id 71 **n° 41+15** **RTM n°50** Alt : 1894.8 Juillet 2004 Photo 52

Id 72 **n° 41+16** **RTM n°51** Alt : 1899.521 (GPS) Juillet 2004 Photo 53

Id 73 **n° 53** **RTM n°53** Alt : 1905.5 Juillet 2004 Photo 57-59

Id 74 **n° SN14** **RTM n°SN14** Alt : 1927.4 Juillet 2004 Photo 61

Id 75 **n° SN15** **RTM n°SN15** Alt : 1934.3 Juillet 2004 Photo 63

Id 76 **n° SN16** **RTM n°SN16** Alt : 1952.282 (GPS) Juillet 2004 Photo 64

Id 77 **n° SN17** **RTM n°SN17** Alt : 1959.5 Juillet 2004 Photo 65

Id 78 **n° 53+1** **RTM n°54** Alt : 1967 Juillet 2004 Photo 67-68

Id 79 **n° SN18** **RTM n°SN18** Alt : 1988.8 Juillet 2004 Photo 69

Id 80 **n° SN19** **RTM n°SN19** Alt : 2013.4 Juillet 2004 Photo 74

Photos Seuils manquants Id 81 (**SN20**)

Id 82 **n° SN21** **RTM n°SN21** Alt : 2046.5 Juillet 2004 Photo 75

Id 83 **n° 53+2** **RTM n°56** Alt : 2049.7 Juillet 2004 Photo 77

Id 84 **n° 57** **RTM n°57** Alt : 2052.9 Juillet 2004 Photo 78

Id 85 **n° 58** **RTM n°58** Alt : 2069.6 Juillet 2004 Photo 80

Id 86 **n° 59** **RTM n°59** Alt : 2072.8 Juillet 2004 Photo 81

Id 87 **n° 60** **RTM n°60** Alt : 2093.9 Juillet 2004 Photo 83-84

Id 88 **n° 60+1** **RTM n°62** Alt : 2113.972 (GPS) Juillet 2004 Photo 85

Id 89 **n° 60+2** **RTM n°63** Alt : 2121.8 Juillet 2004 Photo 87

Id 90 **n° 60+3** **RTM n°64** Alt : 2127.6 Juillet 2004 Photo 88-89
Photos Seuils manquants Id 91 (**60+4**)

Id 92 **n° 60+5** **RTM n°65** Alt : 2147.117 (GPS) Juillet 2004 Photo 90-91

Id 93 **n° 60+6** **RTM n°66** Alt : 2153.8 Juillet 2004 Photo 94

Id 94 **n° 60+7** **RTM n°67** Alt : 2161.6 Juillet 2004 Photo 96-97

Id 95 **n° 60+8** **RTM n°68** Alt : 2167.5 Juillet 2004 Photo 98

Id 96 **n° SN22** **RTM n°SN22** Alt : 2172.2 Juillet 2004 Photo 99

Id 97 **n° 60+9** **RTM n°69** Alt : 2179.9 Juillet 2004 Photo 100-101

Id 98 **n° 60+10** **RTM n°70** Alt : 2184,702 (GPS) Juillet 2004 Photo 103-104

Id 99 **n° 60+11** **RTM n°71** Alt : 2192.1 Juillet 2004 Photo 105
Id 100 **n° 60+12** **RTM n°72** Alt : 2194.8 Juillet 2004 Photo 105

Id 101 **n° 60+13** **RTM n°72'** Alt : 2200.3 (GPS) Juillet 2004 Photo 106

Id 102 **n° SN23** **RTM n°SN23** Alt : 2208.4 Juillet 2004 Photo 107
Photos Seuils manquants Id 103 (**SN24**)

Id 104 **n° 60+14** **RTM n°73** Alt : 2249.549 (GPS) Juillet 2004 Photo 109

Id 105 **n° 60+15** **RTM n°74** Alt : 2317.933 (GPS) Juillet 2004 Photo 111

Id 106 **n° SN25** **RTM n°SN25** Alt : 2329 Juillet 2004 Photo 113
Id 107 **n° SN26** **RTM n°SN26** Alt : 2376 Juillet 2004 Photo 113

Id 108 **n° 60+16** **RTM n°75** Alt : 2388 Juillet 2004 Photo 114

ANNEXE 8 : Catalogue photographique des seuils du torrent de Champerousse.

Id 1 **n° N1** **RTM n°** Alt.:

Photo 067 mai 2004 Photo 3376 juillet 2004

Id 2 **n° N2** **RTM n°** Alt.: Photo 3375 juillet 2004

Id 3 **n° N3** **RTM n°** Alt.: Photo 3374 juillet 2004

Id 4 **n° N4** **RTM n°** Alt.: Photo 3373 juillet 2004

Id 5 **n° N5** **RTM n°** Alt.: Photo 3372 juillet 2004

Id 6 **n° N6** **RTM n°** Alt.: Photo 3371 juillet 2004

Id 7 **n° N7** **RTM n°** Alt.: Photo 3370 juillet 2004

Id 8 **n° N8** **RTM n°** Alt.: Photo 3368 juillet 2004

Id 9 **n° N9** **RTM n°** Alt.: Photo 3367 juillet 2004

Id 10 **n° N10** **RTM n°** Alt.: Photo 3366 juillet 2004

Id 11 **n° N11** **RTM n°** Alt.: Photo 3365 juillet 2004

Id 12 **n° N12** **RTM n°** Alt.: Photo 3364 juillet 2004

Id 13 **n° N13** **RTM n°** Alt.: Photo 3363 juillet 2004

Id 14 **n° N14** **RTM n°10** Alt.: Photo 3372 juillet 2004

Id 15 **n° 11** **RTM n°11** Alt.: Photo 5084_5085 juillet 2005

Id 16 **n° 11+1** **RTM n°** Alt.: Photo 3388 janvier 2005

Id 17 **n° 11+2** **RTM n°** Alt.: Photo 3388 janvier 2005

Id 18 **n° 11+3** **RTM n°** Alt.: Photo 5086_5087 juillet 2005

Id 19 **n° 12** **RTM n°12** Alt.: Juillet 2004 Photo 3402

Id 20 **n° 13** **RTM n°13 ?** Alt.: Photo 5088 & 5089 juillet 2005

Id 21 **n° 14** **RTM n°14** Alt.:

Photo 3401 juillet 2004 Photo 5090 juillet 2005

Id 22 **n° 15** **RTM n°15** Alt.: 1784

Photo 3400 juillet 2004 Photo 5091 juillet 2005

Id 23 **n° 14** **RTM n°16** Alt.: 1792

Photo 3399 juillet 2004 Photo 5093 juillet 2005

Id 24 **n° 17** **RTM n°17** Alt.: 1792

Photo 3398 juillet 2004 Photo 5094 juillet 2005

Id 25 **n° 18** **RTM n°18** Alt.: Photo 3397 juillet 2004

Id 26 **n° 19** **RTM n°19** Alt.:

Photo 3396 juillet 2004 Photo 5097 juillet 2005

Id 27 **n° 19+1** **RTM n°** Alt.:

Photo 3395 juillet 2004 Photo 5098 juillet 2005

Id 28 **n° 22** **RTM n°22** Alt.: Photo 3394 juillet 2004

Id 29 **n° 23** **RTM n°23** Alt.: Photo3393 juillet 2004

Id 30 **n° 24** **RTM n°24** Alt.:

Photo 3392 juillet 2004 Photo 5101 juillet 2005

Id 31 **n° 25** **RTM n°25** Alt.: Photo 3391 juillet 2004

Id 32 **n° 26** **RTM n°26** Alt.: Photo 5103_5104 juillet 2005

Id 33 **n° 27** **RTM n°27** Alt.: Photo 3390 juillet 2004

Id 35 **n° 29** **RTM n°29** Alt.:

Photo 3389 juillet 2004 Photo 5106 juillet 2005

Id 36 **n° 30** **RTM n°30** Alt.:

Photo 3388 juillet 2004 Photo 5108 juillet 2005

Id 37 **n° 31** **RTM n°31** Alt.: Photo 3386 juillet 2004

Id 38 **n° 32** **RTM n°32** Alt.:

Photo 3385 juillet 2004 Photo 5112 juillet 2005

Id 39 **n° 33** **RTM n°33** Alt.: Photo 5113_5114 juillet 2005

ANNEXE 9 : Historique de l'état des seuils torrentiels du torrent de Faucon de 1981 à 2005.

N° RTM	Date RTM	Etat seuil	Etat seuil	Etat seuil	Etat seuil	Etat seuil	Etat seuil	Etat seuil	Etat seuil
		16 avril 1981	*5 mai 1982*	*28 avril 1983*	*4 février 1993*	*27 mai 1997*	*25 mai 2000*	*8 juin 2002*	*1 mai 2004*
0	2000						Bon	Enfoui	Bon
0	1964				Endommage	Mauvais	Mauvais	Bon	Bon
1					Bon	Mauvais	Bon	Bon	Bon
2	1950			Endommage	Endommage	Mauvais	Bon	Bon	Bon
3	1964	Endommage		Endommage	Endommage	Mauvais	Mauvais	Bon	Bon
6	1954					Enfoui	Enfoui	Enfoui	Bon
7	1954				Endommage	Mauvais	Bon	Bon	Bon
8	1954			Mauvais	Mauvais	Mauvais	Bon	Bon	Bon
9	2000-2001	Endommage			Mauvais		Bon	Bon	Bon
10'	1954					Endommage	Mauvais	Mauvais	Enfoui
10	> 1950			Endommage	Endommage	Endommage	Endommage	Endommage	Endommage
12	1954				Endommage	Endommage	Endommage	Endommage	Endommage
13	1989-1990				Bon	Bon	Bon	Bon	Endommage
15	1989-1990				Bon	Bon	Bon	Bon	Endommage
16					Détruit				Detruit
X					Détruit	Détruit	Detruit	Détruit	Detruit
15'					Détruit	Détruit	Detruit	Détruit	Detruit
16'					Détruit		Detruit		Detruit
X'					Détruit	Détruit	Detruit	Détruit	Detruit
21					Mauvais	Détruit	Detruit	Détruit	Detruit
22					Détruit	Détruit	Detruit	Détruit	Detruit
23	1880	Mauvais		Mauvais	Mauvais	Mauvais	Mauvais	Mauvais	Mauvais
24				Mauvais	Mauvais	Mauvais	Mauvais	Mauvais	Mauvais
25					Mauvais	Mauvais	Mauvais	Mauvais	Detruit
26	1881				Mauvais	Mauvais	Bon	Bon	Endommage
27					Endommage	Bon	Bon	Bon	Bon
28					Bon	Bon	Bon	Bon	Bon
29					Bon	Mauvais	Mauvais	Mauvais	Detruit
30					Bon	Endommage	Endommage	Endommage	Bon
31	1976-1977				Bon	Bon	Bon	Bon	Bon
31a									Bon
Gué	1988?					Bon	Bon	Bon	Bon
31b									Bon
31c	2002								Bon
32									Naturel
SN1									Naturel
SN2									Naturel
SN3	1881				Bon	Bon	Bon	Bon	Bon
33					Bon	Bon	Bon	Bon	Bon
34					Bon	Bon	Bon	Bon	Bon
35					Détruit	Détruit	Detruit	Détruit	Detruit
36									Naturel
SN4									Naturel

N° RTM	Date RTM	Etat seuil	Etat seuil	Etat seuil	Etat seuil	Etat seuil	Etat seuil	Etat seuil	Etat seuil
		16 avril 1981	*5 mai 1982*	*28 avril 1983*	*4 février 1993*	*27 mai 1997*	*25 mai 2000*	*8 juin 2002*	*1 mai 2004*
SN5									Naturel
SN6									Naturel
SN7					Mauvais	Détruit	Detruit	Détruit	Detruit
37	2000						Bon	Enfoui	Bon
38	**48**					Mauvais	Détruit	Detruit	Détruit
39	**49**					Endommage	Mauvais	Mauvais	Endommage
39	**50**	1880				Endommage	Mauvais	Bon	Bon
40	**51**					Endommage	Endommage	Enfoui	Enfoui
41	**52**					Bon	Endommage	Endommage	Enfoui
42	**53**								
42	**54**								
SN8	**55**	1880				Détruit	Détruit	Detruit	Détruit
SN9	**56**						Détruit	Detruit	Détruit
43	**57**								
44	**58**					Détruit	Détruit		Détruit
SN10	**59**								
45	**60**	2003							
SN11	**61**	2003							
85	**62**	2003							
86	**63**	2003							
87	**64**	2001							Enfoui
88	**65**	2001							Enfoui
42	**66**	2001							Enfoui
43	**67**	2001							Enfoui
44	**68**	1971				Bon	Bon	Bon	Bon
45	**69**	1880				Bon	Bon	Bon	Bon
46	**70**								
47	**71**								
SN12	**72**					Endommage	Endommage	Bon	Bon
SN13	**73**	1880			Endommage	Bon	Bon	Bon	Bon
50	**74**					Mauvais	Détruit	Detruit	Détruit
51	**75**								
53	**76**								
SN14	**77**								
SN15	**78**								
SN16	**79**	1880						Detruit	Détruit
SN17	**80**								
54	**81**								
SN18	**82**								
SN19	**83**								
SN20	**84**	1880						Detruit	Détruit
SN21	**85**							Detruit	Détruit
56	**86**							Endommage	Mauvais

N° RTM	ID BIEF	1	2	3	4	5	6	7	8
		m	m	m	m	m	°	°	°
57	87							Endommage	Mauvais
58	88							Detruit	
59	89							Mauvais	
60	90							Detruit	
62	91							Endommage	
63	92					Mauvais	Détruit	Detruit	Détruit
64	93					Endommage	Mauvais	Mauvais	Endommage
60+4	94								
65	95							Detruit	
66	96							Detruit	
67	97							Detruit	
68	98							Detruit	
SN22	99								
69	100							Endommage	
70	101	1880						Bon	
71	102							Endommage	
72	103							Detruit	
72'	104								
SN23	105								
SN24	106								
73	107							Bon	
74	108							Bon	
SN25	109								
SN26	110								
75	111								

ANNEXE 10 : Mode opératoire des essais d'infiltrométrie (Muntz, Beerkan, simulations de pluie)

1. Essais Muntz et Beerkan

Dans les deux cas, le mode opératoire comprend : (1) une phase de saturation progressive du matériau, (2) le report de la courbe d'infiltration I(t) à intervalles réguliers jusqu'à l'obtention d'un régime quasi-permanent. Quand celui-ci est atteint, le gradient de charge *i* dans les couches imbibées est proche du gradient unitaire et le flux peut être assimilé à la conductivité hydraulique à saturation K_{sat}. Le pas de temps est variable (de cinq secondes au début de l'essai à plusieurs minutes en fin d'essai). L'infiltration s'effectue à l'intérieur d'un cylindre étanche enfoncé de 0.02 à 0.05 m dans le sol. La charge d'infiltration H_{surf} varie entre 0.02 m et 0.25 m dans le sol. **L'essai *Muntz* est à charge variable ; l'essai *Beerkan* est à charge constante**. Les teneurs en eau volumiques sont mesurées au début et à la fin de l'essai (θ_i, θ_r). Les essais ont été réalisés sur des surfaces intactes.

Dans le cas de l'essai *Beerkan*, la résolution de l'écoulement 3-D s'effectue selon la formulation analytique proposée par Soria Ugalde et de Condappa (2002) pour un sol homogène et isotrope. L'algorithme de résolution non linéaire du solveur *Mathematica* (Wolfram Inc, 1999) a été utilisé. La résolution analytique est basée sur l'équation de Parlange (1975) et de Haverkamp *et al.* (1990). Les modèles de Green et Ampt (1911) et de Talsma et Parlange (1972) sont utilisés pour estimer la conductivité initiale K_0 à partir de la teneur en eau volumique initiale θ_i. L'utilisation de l'équation de Green et Ampt conduit à l'estimation de la borne basse de K_{sat}. L'utilisation de l'équation de Talsma et Parlange conduit à l'estimation de la borne haute de K_{sat}. La figure A.101.a présente un exemple d'ajustement.

Dans le cas de l'essai *Muntz*, l'ajustement s'effectue en appliquant la loi de Darcy, selon l'expression proposée par Colombani *et al.* (1972) qui tient compte de la variation du gradient de charge hydraulique *i* pendant l'essai. L'ajustement s'effectue sur la phase de régime permanent de la courbe d'infiltration. La figure A.10.1 présente les valeurs expérimentales et trois exemples d'ajustement.

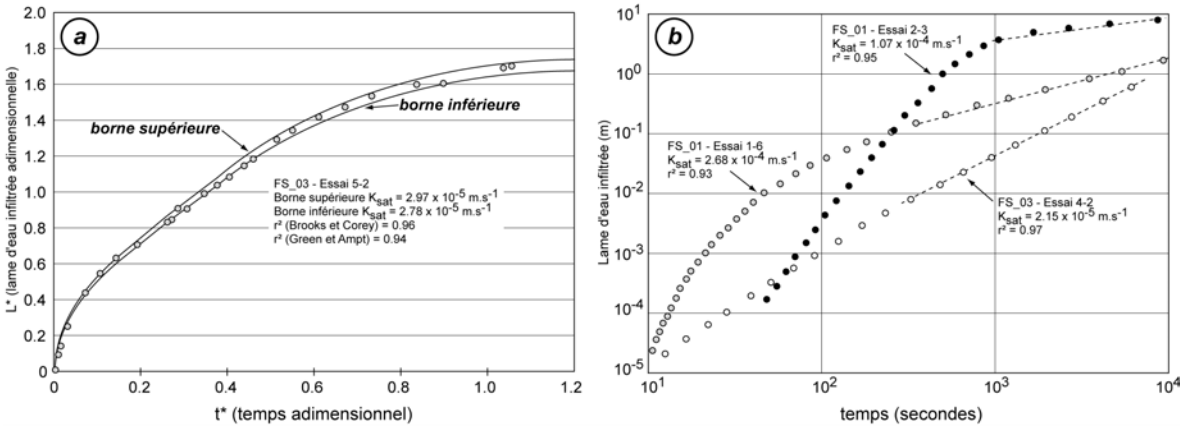


***Figure A.10.1** : Valeurs expérimentales et courbes ajustées pour (a) les essais Beerkan FS03 essai 5-2 et (b) Muntz FS01 essais 1-6, 2-3 et FS03 essai 4-2.*

2. Les simulations de pluie

Le type de simulateur utilisé arrose une surface au sol sensiblement supérieure au mètre carré. Plusieurs bidons de 200 l permettent le stockage de l'eau pompée par gravité dans les rus parcourant la zone d'étude. Le simulateur utilisé est un simulateur à gicleur fixe qui permet de simuler des intensités comprises entre 40 et 80 $mm.h^{-1}$. Un contrôle de l'intensité *in-situ* a été effectué à chaque simulation en disposant des godets aux quatre angles de la parcelle expérimentale. Trois plaques métalliques de 1 m de long, enfoncées de 5 à 10 cm dans le sol, délimitent l'impluvium à l'amont et sur les cotés. Le volume ruisselé est recueilli dans une gouttière en PVC cimentée au sol par un mélange de colle à bois et de terre ; le débit est mesuré manuellement par un lot d'éprouvettes de différentes contenances (de 20 ml à 1 l). L'opérateur peut ajuster la fréquence de mesure au flux, dont l'ordre de grandeur est inconnu a *priori* et fluctue énormément au cours d'une même simulation et a *fortiori* d'une pluie à l'autre. Deux micro-tensiométres gérés par une centrale d'acquisition sont implantés au centre de la parcelle à –3 cm et –10 cm. Les mesures tensiométriques sont relevées toutes les 10 secondes. La teneur en eau volumique est mesurée par prélèvement avant et après la simulation à différentes profondeurs (5, 10 et 15 cm de profondeur).

Quatre phases du ruissellement sont individualisées sous pluie simulée quand le régime pseudo permanent est atteint. Les pluies simulées ont été analysées selon la méthodologie proposée par Casenave (1982) : le coefficient de ruissellement K_R, les temps caractéristiques (début du flaquage, début du ruissellement, etc.) et les lames d'eau précipitées associées ont été calculés. Le flux infiltré est déduit du flux précipité et du flux ruisselé selon l'équation du bilan hydrique ; le terme évaporatoire est négligé.

Le flux d'infiltration a été modélisé selon la fonction exponentielle décroissante de Horton (1940). La diminution exponentielle du flux d'infiltration f(t) avec le temps résulte d'une diminution du gradient hydraulique *i* et de l'évolution de la conductivité au cours du temps. Pendant les expériences de simulation de pluie, comme la surface n'est pas saturée à t=0, le modèle de Horton modifié pour des conditions aux limites de Neumann (Van Dijck, 2000) a été utilisé. Le modèle a été calé sur les flux d'infiltration mesurés lors des 2ème et 3ème simulations de chaque série pour tenir compte de l'homogénéité des teneurs en eau à l'échelle de la parcelle. Le solveur non-linéaire Mathematica (Wolfram Inc, 1999) a été utilisé. Un exemple de diagramme de résultats de simulation de pluie est donné dans la figure A.10.2.

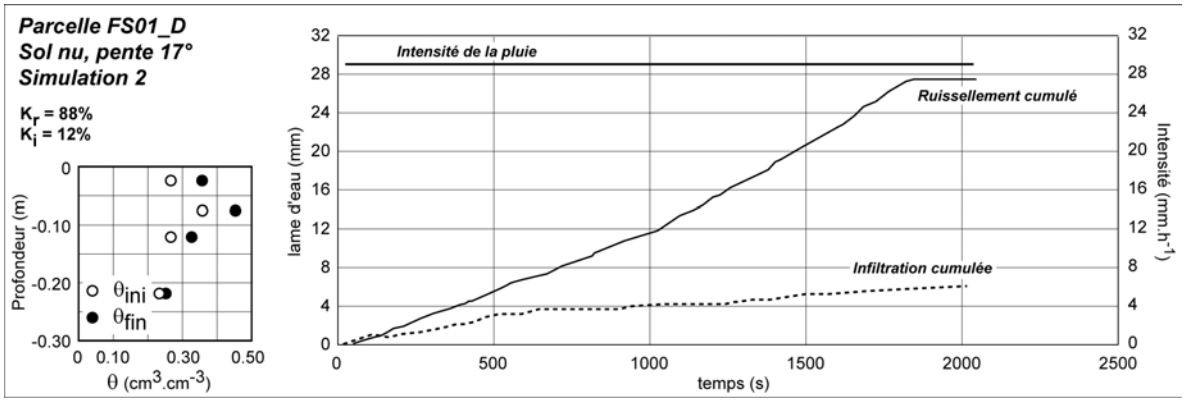


Figure A.10.2 *: Ruissellement cumulé, infiltration cumulée et variation de la teneur en eau pour une simulation de pluie.*

ANNEXE 11 : Courbes contrainte-déformation (cisaillement triaxial)

Les courbes de contrainte-déformation (Fig. A.11.1a et b) obtenues indiquent l'absence de pic ; la résistance ultime (point de plastification) est atteinte approximativement entre 7 et 11% de déformation pour FS03 et entre 6 et 12% pour FS07. Les plans de rupture sont relativement bien définis.

Le gradient de pression interstitielle durant l'application de la charge est positif jusqu'à environ 3-4% de déformation, puis devient négatif suite à l'évolution de la déformation. Les valeurs de pression interstitielle à la rupture varient entre 20kPa (σ_c = 50 kPa) et 75 kPa (σ_c = 200 kPa) pour FS03 et entre 12kPa (σ_c = 50 kPa) et 70 kPa (σ_c = 200 kPa) pour FS07.

Le coefficient de *Poisson v*, déterminé à la décharge dans le plan ε_1- ε_v, varie entre 0.49 et 0.51.

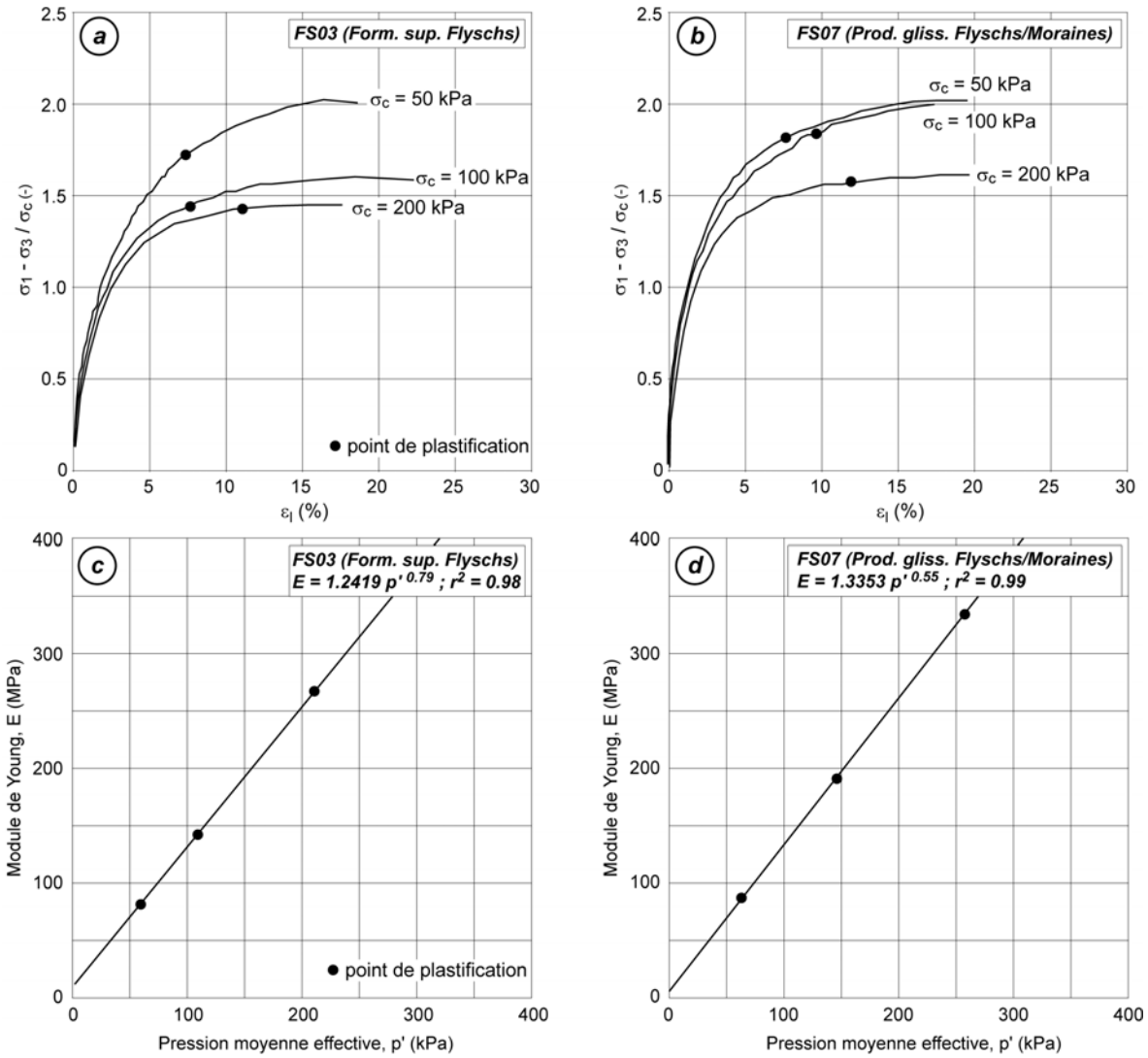


Figure A.11.1 *: Essai triaxial conventionnel consolidé-non drainé. Courbes contraintes-déformations pour les matériaux FS03 (a) et FS07 (b). Evolution du modèle de Young E avec la pression moyenne effective pour les matériaux FS03 (c) et FS07 (d).*

Tableau A.11.1 : *Caractéristiques de résistance en conditions déviatoires (cisaillement triaxial conventionnel CU) et paramètres plastiques des lois de comportement..*

	Mohr – Coulomb			Cam – Clay original		
	M	φ'_{pp}	c'_{pp}	M (-)	λ (-)	N (-)
FS03	1.24	33	3	1.24	0.073	0.79
FS07	1.34	30	1	1.34	0.012	0.55

Mohr-Coulomb : M est la pente de la droite d'état critique ; φ'_{pp} est l'angle de frottement à l'état critique ; c'_{pp} est la cohésion à l'état critique ; M, λ et N sont les paramètres de Cam-Clay.

Les paramètres élastiques (module de *Young*, E ; coefficient de *Poisson*, *v*) ont été évalués à partir d'un cycle de décharge des essais triaxiaux et pour une déformation axiale de 2% (Fig. A.11.1c et d).

ANNEXE 12 : Fondements théoriques de l'ACP

L'ACP, qui ne s'applique qu'à des données quantitatives, est de loin la méthode d'analyse factorielle la plus connue et la plus utilisée (Volle, 1997 ; Georgin, 2002). Le tableau de données contient n lignes (individus) et p colonnes (variables). L'ACP cherche à projeter les individus dans un espace dont le nombre de dimensions est moins élevé que p, et dont chaque axe est une composante principale (ou axe factoriel). Les composantes principales sont déterminées de façon à conserver le plus possible la dispersion des points dans l'espace multidimensionnel initial. Chaque composante traduit des informations communes à plusieurs variables, excepté dans le cas, mais qui est rare, où les variables n'auraient aucun lien entre elles. Plus généralement, chaque composante est liée à toutes les variables, mais selon un degré plus ou moins élevé. C'est ce degré de liaison des composantes avec les variables qui permet d'interpréter la signification des composantes (Chadule, 1994).

Par construction, les composantes sont orthogonales, c'est à dire que les composantes sont totalement indépendantes les unes vis-à-vis des autres. La première composante est celle qui prend en compte le plus d'information ; elle résume donc le mieux le nuage de points dans un espace à une dimension. A cette étape, il subsiste généralement une information résiduelle. La deuxième composante, orthogonale à la première, est définie de façon à ce qu'elle résumé le mieux cette information résiduelle. Le plan formé par ces deux premières composantes est donc celui qui recoupe le mieux le nuage de points dans un espace bidimensionnel. Par la suite, la troisième composante est définie de façon à résumer au mieux l'information non prise en compte par les deux premières composantes, et ainsi de suite (Chadule, 1994).

Il n'existe pas de règle quantitative précise pour définir le nombre de composantes à retenir. D'une manière générale, on admet qu'une composante ne présente un intérêt que si elle traduit un pourcentage d'information supérieur au pourcentage d'information contenu dans une variable. Parmi deux composantes qui se suivent et dont la part d'information est voisine, on considère que si l'on retient la première composante il convient de retenir également la suivante. Enfin, plus pragmatiquement, l'utilisateur retient les composantes, de la plus signifiante à la moins signifiante, jusqu'à ce que leur interprétation lui semble impossible (Chadule, 1994).

Au cours d'une ACP, on obtient pour chaque composante :

- les scores des valeurs de chaque individu projeté sur la composante, ce qui permet de représenter le nuage de points dans un espace dont le nombre de dimensions est inférieur à p ;
- les coefficients de corrélation des variables sur cette composante, ce qui permet d'interpréter la signification de la composante.

ANNEXE 13 : Fondements théoriques de la CAH

Parmi les méthodes de classification automatique, la CAH est sans doute la plus employée (Chadule, 1994 ; Volle, 1997). Une CAH vise à regrouper les individus en groupes de façon à maximiser les variances inter-groupes et à minimiser la variance intra-groupe. L'algorithme de la CAH agrège dans un premier temps les deux points les plus proches. Les coordonnées du centre de gravité de ce groupe et la distance entre ce dernier avec les deux points forment ce groupe sont alors calculées.

Dans un second temps, l'algorithme constitue un deuxième groupe à partir de la distance la plus courte entre deux individus ou entre le premier groupe et un point. Les regroupements sont effectués progressivement de cette manière jusqu'à ce que le dernier groupe associe tous les points (Chadule, 1994). Cette méthode produit un dendrogramme hiérarchique. C'est sur ce dendrogramme que l'utilisateur choisit visuellement le nombre définitif des groupes qui formeront sa partition des points. Notons qu'il est possible de réaliser une CAH après avoir réalisé une ACP à partir des scores factoriels des individus. La réalisation de cette opération, après une ACM, permet donc de réaliser des CAH lorsque le jeu initial de données contient des variables qualitatives.

La mise en œuvre d'une CAH demande que soient définies, dans l'espace multidimensionnel, un mode de la mesure de la distance entre les points et un mode de mesure de la distance entre les groupes. Dans notre travail, nous utiliserons systématiquement, parce que ce sont les modes de calcul les plus courants, une mesure de distance euclidienne et une liaison entre les groupes d'après leurs moyennes (Chadule, 1994). Par ailleurs, les variables ont été systématiquement normalisées, c'est à dire centrées et réduites, afin de leur attribuer a priori le même poids. Pour effectuer les CAH, nous aurons recours au logiciel SPSS, comme précédemment.

ANNEXE 14 : Présentation et formulation des codes numériques Bing, Cemagref 1-D, Cemagref 2-D et J-DFM 1-D

1. Principes généraux (in Malet, 2003)

Les hypothèses suivantes sont considérées pour les modèles de propagation :

- Pour les codes *Bing* et *Cemagref 1-D*, les mécanismes de déclenchement ne sont pas modélisés ; les volumes libérés par la zone de déclenchement selon un scénario prédéfini sont considérés comme une condition initiale. Dans le code *J-DFM 1-D*, le déclenchement est effectif quand le facteur de sécurité du massif est inférieur à l'unité ;

- la masse sédimentaire concentrée, constituée de grains solides et d'un fluide interstitiel (eau) est traitée comme un milieu continu supposé isotrope, monophasique et incompressible de densité constante dans le temps et dans l'espace ;

- la pente d'écoulement est définie comme une zone d'obstacle imperméable à l'intérieur de laquelle la matière ne peut pénétrer et la rugosité du lit est négligée. Pour les modèles *Bing* et *Cemagref 1-D*, la masse de sédiment reste constante au cours de la propagation, les phénomènes de dépôt et de contribution ne sont pas pris en compte. Pour *J-DFM 1-D*, il est possible de faire augmenter artificiellement la masse de sédiments ;

- les caractéristiques rhéologiques ne varient pas pendant l'écoulement ;

- la composante orthogonale au lit de la vitesse est négligée.

Les équations de conservation de la masse, de conservation de la quantité de mouvement, et du transfert de masse sont résolues pour un régime d'écoulement laminaire et pour une distribution hydrostatique des pressions :

- dans les codes *Bing*, par une méthode d'interpolation par différences finies à droite, dans une grille lagrangienne mobile ;

- dans les codes *Cemagref 1-D/2-D*, par une méthode d'interpolation par différences centrées (schéma de *Godunov*) qui permet de suivre la surface libre dans une grille eulérienne fixe.

Les codes de propagation ont en commun de travailler dans une géométrie 1-D filaire (ou 1-D$^{1/2}$) où l'axe O_x correspond à la direction du chenal d'écoulement, et l'axe O_y à l'épaisseur du matériau en mouvement. La géométrie du profil en travers du chenal est supposée égale à un demi-cercle dans *Bing*, à un rectangle dans *J-DFM 1-D* ; elle est ajustée par deux paramètres de formes dans *Cemagref 1-D*. Pour des écoulements super-critiques, les données d'entrée communes aux différents codes sont :

- Le poids volumique ρ du matériau ;
- les caractéristiques rhéologiques. Plusieurs lois empiriques peuvent être utilisées ;
- le volume de matériau au point source et la géométrie d'écoulement ; les codes *Cemagref 1-D* et *2-D* nécessitent en plus un hydrogramme de débit $Q_0(t)$;
- pour le modèle *J-DFM 1D*, les caractéristiques mécaniques (l'angle de frottement interne et la cohésion) du massif initial de matériau source sont nécessaires.

En sortie, le code *Bing* calcule la hauteur d'écoulement, la vitesse et la position de chaque nœud au cours de la propagation ; le code *Cemagref 1-D* calcule les hauteurs d'écoulement dans la section mouillée, la vitesse et le débit de chaque maille ; le code *J-DFM 1D* calcule la hauteur d'écoulement, le débit et le volume de matériau de chaque nœud au cours de la propagation.

2. Notation utilisée

Variables des équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de transfert de masse :

- x, y : système de coordonnées cartésiennes
- u, v : composantes du vecteur vitesse
- g_x, g_y : composantes de l'accélération de la pesanteur g
- p(x, y, t) : pression
- F(x, y, t) : fonction volume du fluide
- ρ : masse volumique (kg.m^{-3})
- ν : viscosité cinématique (Pa.s)

Paramètres du code de calcul *Bing* :

- τ : contrainte de cisaillement (Pa)
- τ_y : seuil d'écoulement (Pa)
- γ : gradient de cisaillement (s^{-1})
- γ_r : gradient de cisaillement de référence (s^{-1})
- μ : viscosité dynamique (Pa.s^{-1})
- n : exposant (-)
- U_p : vitesse de la couche rigide (m.s^{-1})
- U_s : vitesse de la couche cisaillée (m.s^{-1})
- D_p : épaisseur de la couche rigide (m)
- D_s : épaisseur de la couche cisaillée (m)
- D : épaisseur total de l'écoulement (m)
- $\Delta\rho$: masse volumique réduite des matériaux par effet de flottabilité (kg.m^{-3})
- ρ_d : masse volumique des matériaux (kg.m^{-3})
- ρ_w : masse volumique de l'eau (kg.m^{-3})
- g : accélération de la pesanteur (m.s^{-1})
- S : pente du chenal (°)
- t : temps (s)
- x : coordonnées curvilignes sur l'axe x (chenal d'écoulement)
- α_1 : paramètre de forme (-)
- α_2 : paramètre de forme (-)
- β : paramètre de forme (-)

Paramètres des codes *Cemagref 1-D et 2-D :*

- S : section transversale droite de l'écoulement
- Q : débit dans cette section (m^3.s^{-1})
- α : coefficient correctif ($\alpha = \frac{\overline{u^2}}{\overline{u}^2}$)
- Frot : contribution du frottement à la paroi (fond et parois latérales du chenal)
- P (S, x) : contribution de la pression sur la section
- B (S, x) : contribution de la pression latérale due au rétrécissement et élargissement du chenal, avec :

$$\frac{\partial P(S, x)}{\partial x} - B(S, x) = gS\cos(\phi)\frac{\partial h}{\partial x}$$

x : abscisse curviligne définie le long du chenal
θ : angle entre le fond du chenal et l'horizontal (°)
τ_p : contrainte de cisaillement à la paroi (Pa)
h : hauteur d'écoulement (m)
U : vitesse moyenne d'écoulement dans une section transversale
a : paramètre de forme, pris égal à 1.93 pour un canal très large (Coussot, 1994)
τ_p : contrainte de cisaillement à la paroi (Pa)
P_c : périmètre mouillé (m)
ρ : masse volumique du mélange ($kg.m^{-3}$)
h : hauteur d'écoulement locale
u : composante selon l'axe O_x de la vitesse
v : composante selon l'axe O_y de la vitesse
ϕ_x : angle de pente selon l'axe Ox (°)
ϕ_y : angle de la pente selon l'axe Oy (°)

3. Formulation des équations dynamiques de conservation

3.1. Equations de conservation de la masse

En tout point d'un fluide continu, ne contenant ni sources ni puits, l'équation de continuité peut s'écrire sous sa forme classique (a), en incompressible (b) et en géométrie plane :

Eq (1a) $$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho v) = 0$$

Eq (1b) $$\nabla.v = 0$$

Eq (1c) $$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

3.2. Equations de conservation de la quantité de mouvement (forme conservative, équation de Bernoulli) :

Eq (2) $$\frac{\partial v}{\partial t} + v.\nabla v = g - \frac{\nabla p}{\rho} + \nu(\nabla^2 v)$$

Projetée sur les axes x et y l'équation (2) s'écrit :

Eq (3) $$\frac{\partial u}{\partial t} + u.\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = g_x - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u.\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} = g_y - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \nu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)$$

3.3 Equation de transfert de masse

Eq (4) $$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla.(Fv) = 0$$

4. Présentation, formalisme et résolution numérique du code *Bing*

4.1. Présentation du code Bing (in Malet, 2003)

Le code d'écoulement 1-D *Bing* a été développé par Imran *et al.* (1999) au *Saint Anthony Falls Laboratory* (*University of South Carolina*) pour simuler les écoulements concentrés sous-marins et sub-aériens.

4.1.1. Equations constitutives et résolution numérique

Les équations constitutives utilisées pour résoudre l'équation de conservation de la masse et de conservation de quantité de mouvement sont moyennées sur l'épaisseur ; elles sont résolues, dans un référentiel lagrangien (la position de chaque nœud est définie de façon exacte) selon un schéma explicite en différences finies centrées (Savage et Hutter, 1991 ; Pratson *et al.*, 2001). La configuration lagrangienne, bien que moins précise, a été utilisée pour favoriser les temps de calcul et limiter les instabilités numériques du schéma eulérien à maille fixe ; un maillage lagrangien se justifie également pour des simulations à partir d'un volume fini de matériau qui se fluidifie en masse (Jiang et Leblond, 1993).

Les équations de la loi de comportement de *Herschel-Bulkley* (Eq. 5) dans leurs formulations en cisaillement simple, sont implantées pour une couche rigide (Eq. 6) superposée à une couche de cisaillement (Eq. 7). ***La vitesse U***, moyennée sur l'épaisseur totale, est exprimée par l'équation (Eq. 9). L'approximation prend en compte la composante unidimensionnelle τ_{xy}, du seuil d'écoulement où x et y sont des nœuds à l'aval et à l'amont de la maille considérée sur le profil en long. Cette expression est utilisée pour calculer le profil de vitesse et la contrainte de cisaillement à la base de la couche rigide pour un écoulement en régime permanent uniforme. La loi de comportement de *Bingham* est dérivée des équations de *Herschel-Bulkley* avec un exposant ***n*** égal à 1. Pour une loi de comportement bi-linéaire, les formulations sont détaillées dans Imran *et al.* (1999). Les équations constitutives sont transformées dans leur formulation lagrangienne par un maillage déformable (Savage et Hutter, 1991).

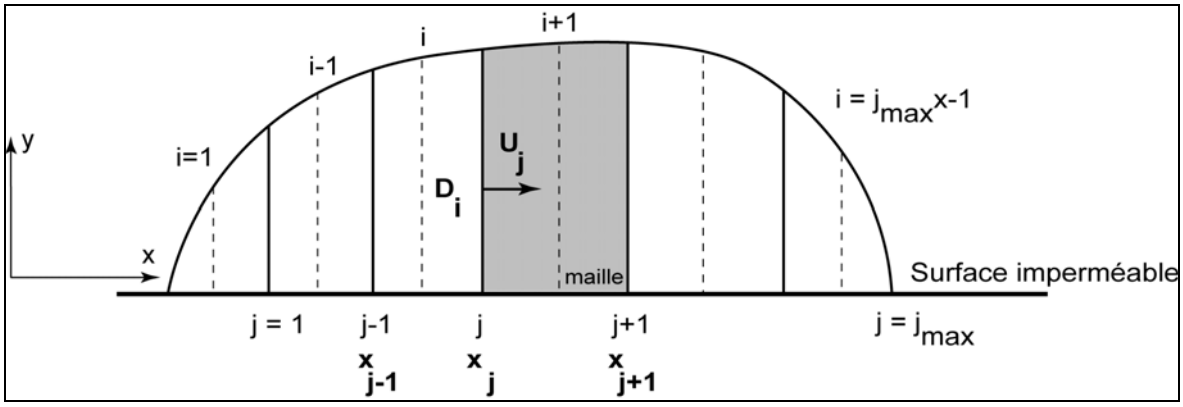


Figure A.14.1 *: Maillage lagrangien dans le code Bing (in Imran et al., 2001).*

Le volume de matériau source est décrit par un nombre fini de nœuds (indice ***j***, Fig. A.14.1). Le nœud du front (***j_{max}***) se propage à la vitesse moyennée locale de l'écoulement, alors que chaque interface de maille (***indice i***, Fig. A.14.1) se déplace à une vitesse locale ***U***. Ce schéma permet que des nœuds se rapprochent ou s'éloignent les uns des autres. La ***vitesse U*** et ***l'épaisseur D*** de l'écoulement sont calculés au barycentre ce chaque ***maille d'indice i***. Le volume de chaque

maille est constant, ce qui permet de réduire l'équation de conservation de la masse aux équations (Eq. 12) et (Eq. 13), intégrées temporellement par différences finies à droite (Eq. 14, Eq. 15). Les gradients spatiaux sont évalués par différences finies centrées pour les nœuds intérieurs, par différences finies à droite pour les premiers nœuds et par différences finies à gauche pour les derniers nœuds. Un terme de viscosité artificielle minimise les instabilités numériques (Eq. 16).

4.1.2. Données d'entrée, conditions initiales et conditions aux limites

Le code *Bing* est construit dans une interface très simple d'utilisation (Fig. A.14.2). La fenêtre est divisée en quatre sous-menu : conditions initiales, paramètres du matériau, paramètres de la modélisation numérique du matériel, paramètres de sorties.

La géométrie initiale, de forme parabolique, est introduite par deux termes **L et H** qui définissent respectivement **la longueur du dépôt** (à l'abscisse x_0 de la pente d'écoulement) et **l'épaisseur du dépôt**. Le poids volumique du matériau, les paramètres rhéologiques (*Herschel-Bulkley*, *Bingham*, *bi-linéaire*) pour la concentration volumique choisie, et le poids volumique du fluide ambiant (air, eau) sont introduits. **Ces paramètres sont constants pour la simulation**. Le nombre de nœuds est sélectionné par l'utilisateur ; le pas de temps le plus adapté par rapport à la géométrie du modèle est optimisé directement. Les résultats du calcul sont exprimés, pour chaque pas de temps, par la vitesse locale moyenne de chaque maille, l'épaisseur et la position de chaque maille sur le chenal d'écoulement.

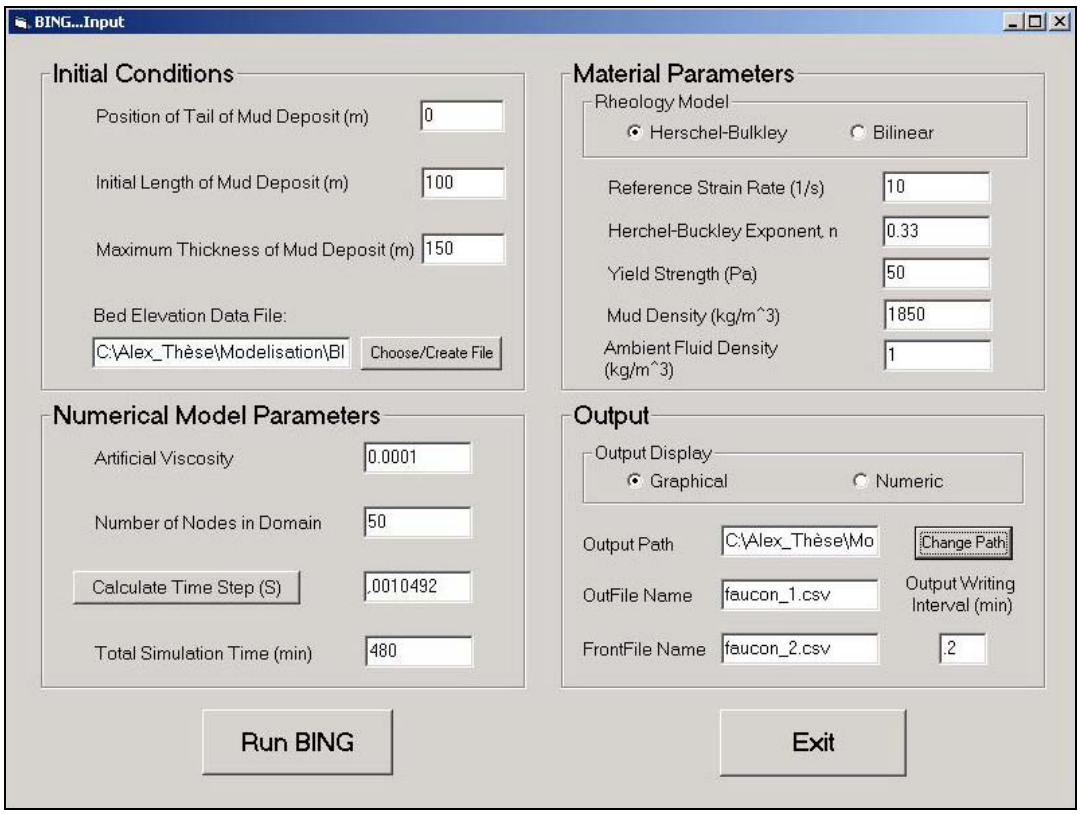


***Figure A.14.2** : Interface de paramétrage des données d'entrée du code Bing.*

4.2. Equations de la loi de comportement (formulation en cisaillement simple) :

Modèle rhéologique de *Herschel-Bulkley* (Coussot, 1994) :

Eq (5)
$$\left|\frac{\gamma}{\gamma_r}\right|^n = 0 \qquad \text{if} \qquad |\tau| < \tau_y,$$
$$\frac{\tau}{\tau_y \operatorname{sgn}(\gamma)} - 1 \qquad \text{if} \qquad |\tau| \leq \tau_y,$$

Formulation de l'équation de conservation de la masse pour une couche rigide :

Eq (6)
$$\frac{\vartheta D}{\vartheta t} + \frac{\vartheta}{\vartheta x}\left[U_p(D_p + \alpha_1 D_s)\right] = 0$$
$$\frac{\vartheta}{\vartheta t}(U_p D_p) + U_p \frac{\vartheta D_s}{\vartheta t} + \frac{\vartheta}{\vartheta x}(U_p^2 D_p) + \alpha_1 U_p \frac{\vartheta}{\vartheta x} U_p D_s$$
$$= -\Delta\rho g D_p \frac{\vartheta D}{\vartheta x} + \Delta$$

Formulation de l'équation de conservation de la masse pour une couche cisaillée :

Eq (7)
$$\frac{\vartheta}{\vartheta t}(U_p D_p) + U_p \frac{\vartheta D_s}{\vartheta t} + \frac{\vartheta}{\vartheta x}(U_p^2 D_p) + \alpha_1 U_p \frac{\vartheta}{\vartheta x} U_p D_s$$
$$= -\Delta\rho g D_p \frac{\vartheta D}{\vartheta x} + \Delta\rho g D_p S - \frac{\tau_y \operatorname{sgn}(U_p)}{\rho_d}$$

Formulation de l'équation de conservation de la quantité de mouvement :

Eq (8)
$$\alpha_1 \frac{\vartheta}{\vartheta t}(U_p D_s) - U_p \frac{\vartheta D_s}{\vartheta_t} + \alpha_2 \frac{\vartheta}{\vartheta x}(U_p^2 D_s) - \alpha_1 U_p \frac{\vartheta}{\vartheta x}(U_p D_s)$$
$$= -\Delta\rho g D_s \frac{\vartheta D}{\vartheta x} + \Delta\rho g D_s S - \beta \frac{\tau_y}{\rho_d}\left|\frac{U_p}{\gamma_r D_s}\right|^n \operatorname{sgn}(U_p)$$

Intégration de la vitesse moyenne sur l'épaisseur totale :

Eq (9)
$$U = \frac{U_p(D_p + \alpha_1 D_s)}{D}$$

4.3. Formulation lagrangienne des équations constitutives

Dérivation généralisée par intégration de l'accélération locale et convective (Frederick et Chang, 1972) :

Eq (10)
$$\frac{d}{dt} = \frac{\vartheta}{\vartheta t} + U \frac{\vartheta}{\vartheta x}$$

Intégration des Eqs 5 et 10 pour une rhéologie de *Herschel-Bulkley* :

Eq (11)
$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{D}\frac{\vartheta}{\vartheta x}\left(U^2 D + \frac{\alpha_1 \alpha_2}{1-\alpha_1} U_p^2 D - \frac{1-\alpha_2}{1-\alpha_1} U_p U D\right) - \Delta\rho g \frac{\vartheta D}{\vartheta x}$$

$$- \frac{\tau_y \operatorname{sgn}(U_p)}{\rho_d D} - \frac{\beta \tau_y}{\rho_d D} \left| \frac{U_p}{\gamma_r D_s} \right|_n \operatorname{sgn}(U_p)$$

4.4. Résolution numérique des équations constitutives

Calcul de la vitesse :

Eq (12) $$D_i (x_{j+1} - x_j) = \text{constant}$$

Eq (13) $$U_{pj}^{t+\Delta t} = U_{pj}^{t} + \left[(U - U_p) \frac{\vartheta U_p}{\vartheta x} - g\Delta\rho \frac{\vartheta D}{\vartheta x} + gS\Delta\rho - \frac{\tau_y}{\rho_d D_p} \operatorname{sgn}(U_p) \right] \Delta t$$

Eq (14) $$U_j^{t+\Delta t} = U_j^{t} + \left[\frac{1}{D} \frac{\vartheta}{\vartheta x} (U^2 D + \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{1 - \alpha_1} U_p^2 D - \frac{-1 - \alpha_2}{1 - \alpha_1} U_p U D) - g\Delta\rho \frac{\vartheta D}{\vartheta x} \right.$$
$$\left. - \frac{\tau_y \operatorname{sgn}(U_p)}{\rho_d D} - \frac{\beta \tau_y \operatorname{sgn}(U_p)}{\rho_d D} - \frac{\beta \tau_y \operatorname{sgn}(U_p)}{\rho_d D} \left| \frac{U_p}{\gamma_r D_s} \right|^n \right] \Delta_t$$

Eq (15) $$U_j^{t+\Delta t} = U_j^{t} + \left[\left(1 - \frac{\alpha_2}{\alpha_1^2} \right) \frac{1}{D} \frac{\vartheta}{\vartheta x} (U^2 D) - \Delta\rho g \frac{\vartheta D}{\vartheta x} \right.$$
$$\left. + \Delta\rho g S - \frac{\tau_{ya} \operatorname{sgn}(U_p)}{\rho_d D} \phi \right] \Delta t$$

Formulation de la viscosité artificielle :

Eq (16) $$U_j + v_m (U_{j+1} - 2U_j + U_{j-1})$$
$$U_{pj} = U_{pj} + v_m (U_{pj+1} - 2U_{pj} + U_{pj-1})$$

5. Formalisme et résolution numérique du code *Cemagref 1-D*

Le code d'écoulement *Cemagref 1-D* a été développé par Villa (1986) pour les avalanches de neige dense et adapté par Laigle et Coussot (1994, 1997) aux écoulement concentrés viscoplastiques. Le code est construit sur l'architecture classique des outils de calculs utilisés en hydraulique (calcul des hauteurs maximales, calcul des vitesses locales, calcul des débits locaux) pour des écoulements laminaires, transitoires dans un chenal de géométrie constante dans le temps.

5.1. Equations constitutives et résolution numérique

A l'inverse du code *Bing*, le schéma numérique utilisé pour résoudre l'équation de conservation de la masse et de conservation de la quantité de mouvement est construit sur les équations de *Barré de Saint-Venant*. Ce schéma se justifie par la faible profondeur relative de l'écoulement (rapport de la hauteur à la longueur caractéristique de l'écoulement faible), le caractère transitoire du phénomène.

Les équations de *Barré de Saint-Venant* sont écrites dans leur forme conservative (Eq. 17, Eq. 18) pour vérifier la condition d'interface de *Rankine-Hugoniot* (équation de transfert de masse entre l'amont et l'aval d'une discontinuité d'écoulement telle qu'un ressaut pour un écoulement à surface libre) qui permet de traiter un front d'écoulement comme n'importe quel point courant. Cette relation impose une divergence nulle pour les mailles contenant la surface

libre. La densité du fluide est supposée constante et la courbure des lignes de courant est faible. Le front d'écoulement est représenté schématiquement sur quelques points du maillage par des discontinuités (Fig. A.14.3). Ce système d'équations hyperboliques strictement non linéaires est résolu dans un maillage eulérien filaire selon un schéma explicite en différences finies.

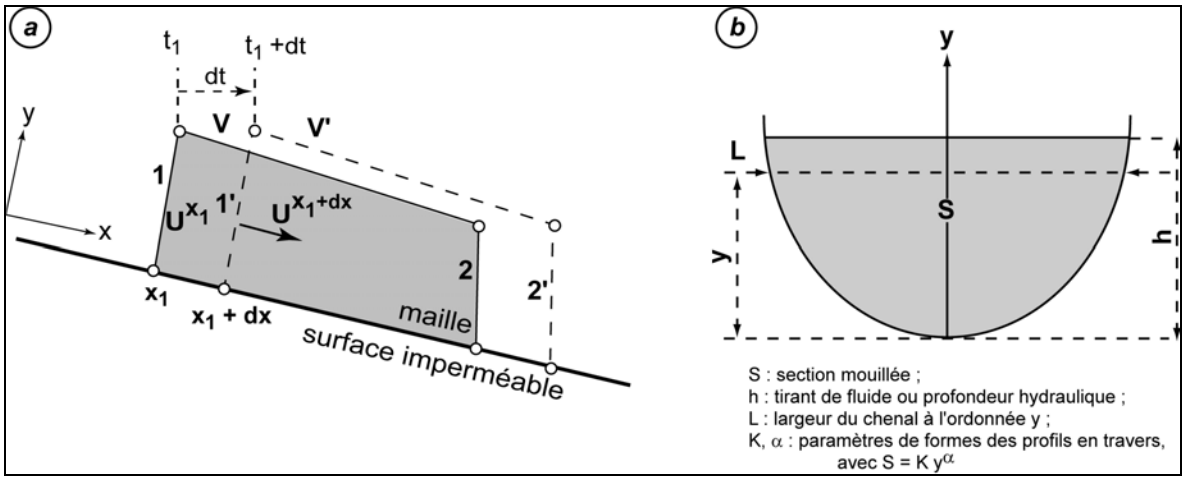


Figure A.14.3 *: Maillage eulérien filaire dans le code Cemagref 1-D (Malet, 2003).*

a : méthode de contrôle du transfert de masse à la vitesse moyenne U par variation de volume (V, V') entre les interfaces (1,2) et (1',2') pendant l'intervalle de temps dt, x est l'abscisse curviligne définie le long du chenal ;
b : gestion de profils en travers avec les paramètres de forme K et α (in Martinet, 1992).

Brièvement, la procédure de recherche d'une solution par incrémentation du temps ***dt*** s'effectue en trois étapes : évaluation à partir des valeurs à l'instant t_{-1} des vitesses provisoires au temps ***t*** par une approximation explicite des équations de mouvement ; utilisation d'une méthode itérative de *Godunov* (Vila, 1986) pour la résolution des équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement ; une nouvelle configuration au fluide est définie par résolution de l'équation de transfert de masse. Une approximation du problème étant obtenue, une correction est ensuite réalisée pour tenir compte de la gravité et de la loi de frottement utilisée (second membre de l'équation Eq. 19, Eq. 20).

Pour un problème où les conditions initiales, les conditions aux limites et la géométrie du chenal d'écoulement sont connues, la loi de comportement reste la seule inconnue des équations de *Barré de Saint-Venant*. Seule une loi de type *Herschel-Bulkley* est introduite dans le code. Les expressions de la contrainte de cisaillement moyenne à la paroi (pour un écoulement permanent uniforme à surface libre dans un plan infiniment large, -Eq. 21a-) sont issues des travaux théoriques de Coussot (1994). L'hypothèse suivante est réalisée : la résistance locale à l'écoulement transitoire est égale au frottement calculé pour un même débit et une même hauteur d'écoulement locaux par la formule établie en régime permanent uniforme (Eq. 21b). L'expression du terme de frottement introduit dans les équations de mouvement est calculée à partir du périmètre de la section mouillée et de la masse volumique du matériau (Eq. 22). Le modèle a été calé au laboratoire par comparaison à des écoulements transitoires de fluide modèle (Laigle, 1998).

5.2. Données d'entrées, conditions initiales et conditions aux limites

Les données d'entrée géométriques sont un profil en long du chenal d'écoulement et plusieurs profils en travers caractéristiques, implantés dans le code par deux coefficients (K, α, Eq. 23).

Les caractéristiques du matériau sont ***le poids volumique*** ρ et les caractéristiques rhéologiques de *Herschel-Bulkley* (***seuil d'écoulement*** τ_c***, paramètre de forme*** κ) exprimés par les ratios τ_c / ρ et κ / τ_c. Les conditions aux limites sont définies par un hydrogramme de l'écoulement (qui correspond au débit de l'écoulement concentré au cours du temps). Les conditions initiales correspondent à l'épaisseur de l'écoulement à l'instant t_0 pour chaque maille. Le nombre maximal de mailles de calcul est limité à 30 000 (Coussot et Laigle, 1994).

5.3 Formulation monodimensionnelle eulérienne des équations de Saint-Venant et résolution numérique pour un écoulement de type Herschel-Bulkley

Equation de l'évolution d'une de la surface libre dans un repère eulérien :

Eq (17) $$\frac{dF}{dt} = 0$$

Le transfert de matière d'une maille à l'autre s'écrit sous une forme conservative :

Eq (18) $$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla.(Fv) = 0$$

Formulation conservative monodimensionnelle des équations de Barré de Saint-Venant :

Eq (19) $$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{S}{Q}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q}{\alpha \frac{Q^2}{S} + P(S, x)}\right) = \left(\frac{0}{gS\sin(\phi) - Frot + B(S, x)}\right)$$ où,

Frot est la contribution du frottement à la paroi avec :

Eq (20) $$\frac{\partial P(S, x)}{\partial x} - B(S, x) = gS\cos(\phi)\frac{\partial h}{\partial x}.$$

Expression de la contrainte de cisaillement moyenne à la paroi (régime permanent uniforme) :

Eq (21a) $$\tau_p = \tau_c(1 + a(H_b)^{-0.9})$$

Eq (21b) $$H_b = \frac{\tau_c}{K}\left(\frac{h}{U}\right)^{1/3}$$

Expression du terme de frottement :

Eq (22) $$Frot = \frac{\tau_p}{\rho} P_e$$

Données d'entrées géométriques – gestion des profils en travers

Eq (23) $$S = K * \gamma^{\alpha}$$

6. Formalisme et résolution numérique du code *Cemagref 2-D*

Le code d'étalement *Cemagref 2-D* est également issu de travaux de Vila (1986) pour les avalanches de neige dense et les ruptures de barrages (Vila, 1987). Il a été adapté par Laigle (1996, 1997) aux écoulements concentrés viscoplastiques. De façon analogue au modèle

Cemagref 1-D, le modèle bidimensionnel est fondé sur les équations de *Barré de Saint-Venant*, dans leur forme bidimensionnelle, associées à une loi de comportement déduite des travaux de Coussot (1994).

6.1. Equations constitutives et résolution numérique

L'écoulement, fonction de la gravité, de la pression et de la viscosité frictionnelle, est considéré comme instable et non-uniforme. Les hypothèses retenues sont les suivantes :

- comme pour la 1-D, l'expression de la contrainte à la paroi est considérée comme équivalente localement à celle obtenue en régime permanent uniforme pour une même hauteur d'écoulement et une même vitesse moyenne ;

- les termes de contraintes de cisaillement introduits par les différences de vitesse dans un plan horizontal sont dans un premier temps négligé ;

- les contraintes normales s'exerçant sur un élément de fluide se réduisent au terme de pression dont la répartition est supposée hydrostatique ;

- les aspérités du cône torrentiel, le comportement spécifique du front et son influence sur le comportement global de la lave et l'érosion sont négligés.

Les équations (Eq. 24, Eq. 25, Eq. 26, Eq. 27) sont résolues par un schéma explicite de *Godunov* (Vila, 1986), proche de celui utilisé par le modèle monodimensionnel, utilisé dans le cadre d'une approximation aux volumes finis (Laigle, 1997).

6.2. Données d'entrée, conditions initiales et conditions aux limites

Le code bidimensionnel est intégré dans une interface SIG (Arcview 3.1, Esri Inc.) pour représenter graphiquement les résultats sur un modèle numérique de terrain. Pour chaque maille de calcul, l'épaisseur et la vitesse de l'écoulement sont représentées à chaque pas de temps.

Les données d'entrées géométriques consistent en une grille topographique du cône de déjection du torrent, dans laquelle une importance particulière doit être apportée au creux et bosses (décimétriques) qui peuvent faire obstacle ou détourner l'écoulement ; les obstacles artificiels (digues, seuils torrentiels) sont introduits dans la grille topographique comme un terme de sursol. La grille d'élévation, constituée au maximum de 30 000 mailles, est orientée. La résolution optimale et les algorithmes d'interpolation sont discutés dans Laigle (1996) et Laigle *et al.* (2003). Les caractéristiques du matériau sont introduites selon le même formalisme que pour le modèle monodimensionnel.

Les conditions initiales correspondent au débit liquide imposé au point de débordement (l'apex du cône de déjection torrentiel ou le point de débordement du torrent) et la hauteur de débordement. Cette maille de calcul correspond au point d'entrée de l'écoulement (hydrogramme et hauteur de débordement issu du modèle monodimensionnel) sur le cône. Les conditions aux limites sont définies à l'amont par un débit imposé en un point d'entrée. Le modèle a été calé sur des événements réels observés en Suisse, en Autriche et en Italie (Laigle et Marchi, 2000 ; Laigle *et al.*, 2003).

Formulation conservative bidimensionnelle de l'équation de continuité de Barré de Saint-Venant :

Eq (24) $$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = 0$$

Formulation de la conservation de la quantité de mouvement selon l'axe Ox :

Eq (25) $$\frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial\left[h\delta\bar{u}^2 + \frac{g\beta h^2}{2}\right]}{\partial x} + \frac{\partial(h\delta\overline{uv})}{\partial y} = g\sin(\theta_x)h - \frac{\bar{u}}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}\frac{\tau_\rho}{\rho}$$

Formulation de la conservation de la quantité de mouvement selon l'axe O_x

Eq (26) $$\frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\delta\overline{uv})}{\partial x} + \frac{\partial\left[h\delta\overline{v^2} + \frac{g\beta h^2}{2}\right]}{\partial y} = g\sin(\theta y)h - \frac{\bar{v}}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}\frac{\tau_\rho}{\rho}$$

Expression du terme de frottement :

Eq (27) $$\tau_\rho = \tau_c\left[\left[1 + 1{,}93\left[\frac{\tau_c}{K}\left(\frac{h}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}\right)^{1/3}\right]^{0{,}9}\right]\right]$$

7. Formalisme et résolution numérique du code J-DFM 1-D

Eq (28) $$v = \frac{1}{\eta}(\tau - \tau_0)$$

Eq (29) $$F^t = \frac{\sum\left[c'L + \left(W^t - (U^t_{normal} + U^{t-1}_{excess})\right)\tan\varphi'\right]/n_\alpha}{\sum W^t \tan\alpha}\left(=\frac{\Sigma S}{\Sigma T}\right)$$

Eq (30) $$n_\alpha = \cos^2\alpha\left(1 + \tan\alpha\frac{\tan\varphi'}{F^{t-1}}\right)$$

où :

- W is the weight of an individual slice j (kN);
- U=the pore water force on the slip surface of slice j, (kN);
- c' =is the cohesion (kPa);
- ϕ' =the friction angle of the material (-);
- α= slope angle of slice i (degrees);
- L= the length of the slip surface of slice j (m);
- S= τ_{00}L is the resisting force in this case the yielding force of slice j (kN);
- T= τL is the mobilized shearing force of slice j (kN);

Eq (31) $$q = \tfrac{1}{2}v\Delta t\left(h_p + h_j\right)$$

Eq (32) $$h_p = \frac{cLh_j}{T - N' tan\varphi'}$$

Eq (33) $$N' = W/cos\alpha - U - Ttan\alpha$$

Eq (34) $$\Delta q_j = q_{j-1} - q_j$$

Eq (35) $$p_u = \frac{h_w \gamma_w}{h_j \gamma_s}$$

Eq (36) $$U = p_u h_j \gamma_s L$$

Eq (37) $$p_u^{excess} = p_u - \frac{\gamma_w}{\gamma_s}$$

Eq (38) $$\overset{t=i}{Fr} = 1 - \frac{8}{\pi^2}\left[e^{-(\pi^2/4)T_v} + \frac{1}{9}e^{-(9\pi^2/4)T_v} + \frac{1}{25}e^{-(25\pi^2/4)T_v} \ldots\right]$$

Eq (39) $$T_v = \frac{C_v t_i}{d^2}$$

Eq (40) $$p_u^{\overset{t=i}{excess}} = p_u^{\overset{t=0}{excess}} - Fr\, p_u^{\overset{t=0}{excess}}$$

Table des matières

SOMMAIRE **3**

REMERCIEMENTS **5**

INTRODUCTION GENERALE **11**

AVANT-PROPOS **19**

1ERE PARTIE : ACTIVITE TORRENTIELLE : DU BASSIN DE 'RISQUE' AU BASSIN VERSANT **25**

Chapitre 1 : 'LES LAVES TORRENTIELLES' : MORPHOLOGIE, CINEMATIQUE ET MODELES **27**

1.1. Concepts et classification des écoulements de masse dans les zones montagneuses et place des laves torrentielles 28
1.1.1. Où se situent les écoulements torrentiels par rapport aux mouvements de terrain ? 28
1.1.2. Typologie des écoulements torrentiels 32
1.2. Caractéristiques des laves torrentielles et éléments de définition 34
1.2.1. Les caractéristiques générales des laves torrentielles 34
1.2.2. Entités morphologiques fonctionnelles des laves torrentielles 35
1.2.3. Granulométrie des laves torrentielles 35
1.3. Cinématique des laves torrentielles 37
1.3.1. Le déclenchement 39
1.3.1.1. Conditions climatiques associées au déclenchement 39
1.3.1.2. Mécanismes de déclenchement et facteurs de prédisposition 41
1.3.2. La propagation des laves torrentielles 44
1.3.3. Le dépôt des laves torrentielles 46
1.3.4. Lois de comportement des laves torrentielles 47
1.3.5. Conclusion 49
1.4. Modélisation numérique des laves torrentielles 50
1.4.1. Les modèles de propagation 51
1.4.1.1. Les modèles mécaniques 51
1.4.1.2. Les modèles rhéologiques 51
1.4.2. Les modèles d'étalement 53
1.5. Evaluation de l'aléa 'lave torrentielle' : de l'investigation morphologique à la modélisation numérique 53
1.5.1. La phase de déclenchement 57
1.5.2. La phase de propagation (contribution et écoulement) 59
1.5.3. La phase de dépôt (débordement/étalement) 61
1.5.4. Conclusion 62
1.6. Conclusion du chapitre 1 63

Chapitre 2 : MORPHOLOGIE, CLIMAT ET ACTIVITE TORRENTIELLE DU BASSIN DE BARCELONNETTE **65**

2.1. Le pays des 'Terres Noires' 65
2.1.1. Le contexte morphostructural : la 'fenêtre' de Barcelonnette 68
2.1.2. L'héritage glaciaire 71
2.1.3. Evolution historique du couvert forestier et de l'anthropisation 72
2.1.4. Conclusion 74

2.2. Historique de l'activité torrentielle 75
2.2.1. Le recueil des données : sources et pertinence 75
2.2.2. Analyse historique des événements torrentiels 76
2.2.3. Distribution saisonnière des événements torrentiels 80
2.3. Un climat agressif et favorable aux instabilités 81
2.3.1. Choix des postes et données disponibles 82
2.3.2. Conditions climatiques générales 85
2.3.3. Précipitations totales 86
2.3.3.1. Distribution annuelle et inter-annuelle 86
2.3.3.2. Distribution saisonnière et mensuelle 87
2.3.3.3. Les précipitations journalières 89
2.3.4. Conclusion 94
2.4. Laves torrentielles et précipitations 94
2.4.1. Relations avec les précipitations à l'échelle journalière 99
2.4.2. Relations avec les précipitations horaires 100
2.4.3. Conclusion 101
2.5. Analyses des facteurs de prédisposition de l'activité torrentielle 102
2.5.1. Morphologie générale des bassins versants torrentiels 104
2.5.2. Morphométrie des bassins versants torrentiels 106
2.5.3. Conclusion 110

Chapitre 3 : SITES D'ETUDES ET EVENEMENTS TORRENTIELS SURVENUS ENTRE 1996 ET 2004 113

3.1. Présentation des sites d'études 114
3.1.2. Le site d'étude principal : le bassin versant du torrent de Faucon 114
3.1.2.1. Morphologie du torrent de Faucon 115
3.1.2.2. Morphologie du torrent de Champerousse 120
3.1.3. Les sites d'études secondaires 122
3.1.3.1. Le bassin versant du torrent de Sanières 122
3.1.3.2. Le torrent du Bourget 124
3.1.3.3. Le torrent de l'Abeous 129
3.2. Evénements torrentiels dans le bassin de Barcelonnette entre 1996 et 2004 131
3.2.1. L'événement du 19 août 1996 sur le torrent de Faucon 131
3.2.2. Les événements du 4 juin 2002 sur les torrents de Faucon et des Sanières 132
3.2.3. Les événements de l'été 2003 sur les torrents de l'Abeous, du Bourget et de Faucon 133
3.2.3.1. L'événement du 27 juillet 2003 : torrent de l'Abeous 134
3.2.3.2. Les événements du 5 août 2003 135
a) Le torrent de Faucon 135
b) Le torrent du Bourget 138
3.3. Conclusion du chapitre 3 139

2ème PARTIE : EVENEMENTS TORRENTIELS A L'ECHELLE DU CHENAL : 141

Chapitre 4 : EVOLUTION MORPHO-DYNAMIQUE DU CHENAL TORRENTIEL DE FAUCON DE 1998 à 2003 143

4.1. Méthodologie et moyens mis en œuvre pour les investigations 145
4.1.1. Cartographie morphologique de l'appareil torrentiel 146
4.1.1.1. Eléments de définitions 146
a) Morphologie torrentielle 146
b) Formations superficielles 147
4.1.1.2. Critères de description 148
a) Morphologie du lit torrentiel 148
b) Morphologie des versants et formations superficielles 150
4.1.1.3. Principes et modes de représentation 150

a) Principes d'établissement du profil en long et représentation des caractéristiques du lit torrentiel et des versants contigus 151
b) Morphologie du lit torrentiel, des versants des formations superficielles et aménagements anthropiques..... 152
c) Représentation des événements de laves torrentielles 154
4.1.2. Caractérisation des formations superficielles et suivi d'un glissement de terrain : Réseau d'auscultation et de surveillance 156
4.2. Morphologie du chenal torrentiel de Faucon de 1998 à 2004 159
4.2.1. Observations après la lave torrentielle du 19 août 1996 162
4.2.1.1. Zone A : dépôt 163
4.2.1.2. Zone B : dépôt 166
4.2.1.3. Zone C : dépôt et incision 166
4.2.1.4. Zone D : dépôt 171
4.2.1.5. Zone E : dépôt et incision 173
4.2.1.6. Zone F : non fonctionnelle 177
4.2.1.7. Zone G : non fonctionnelle 179
4.2.2. Observations après l'épisode torrentiel du 5 juin 2002 182
4.2.3. Observations après la lave torrentielle du 5 août 2003 186
4.2.3.1. Les observations sur le torrent de Faucon 187
a) Zone A : dépôt 187
b) Zone B : dépôt et incision 187
c) Zone C : incision 189
d) Zone D :°incision 191
e) Zone E : dépôt 191
f) Zones F et G : non fonctionnelles 191
4.2.3.2. Les observations sur le torrent de Champerousse 193
a) Zone A : dépôt 193
b) Zone B : incision 193
c) Zone C : incision 194
4.2.3.3. Les observations sur le ravin des Trois Hommes 195
4.2.4. Conclusion 197
4.3. Etude détaillée du glissement de terrain de Champerousse : zone source potentielle de laves torrentielles 198
4.3.1. Les principaux désordres observés 198
4.3.1.1. Les escarpements en aval du chemin pédestre vers Soleil-Bœuf (E1, E2 et E3). ... 198
4.3.1.2. Les désordres observés sur les chemins 199
a) Chemin pédestre reliant la citerne DFCI au torrent de Faucon 199
b) Route forestière vers Soleil-Bœuf (B1 et B6) 200
4.3.1.3. La base du versant et les berges du Faucon 201
4.3.1.4. Le versant de rive droite 201
4.3.2. Activité du glissement 202
4.4. Conclusion du chapitre 4 203

Chapitre 5 : CARACTERISATION PHYSIQUE, HYDRODYNAMIQUE, GEOMECANIQUE ET RHEOLOGIQUE DES LAVES TORRENTIELLES ET DES FORMATIONS SUPERFICIELLES SOURCES 205

5.1. Stratégie de caractérisation des matériaux et description des dépôts 207
5.1.1. Stratégie de caractérisation des matériaux 207
5.1.2. Localisation, description et nomenclature des échantillons testés 208
5.2. Propriétés physiques des matériaux 215
5.2.1. Caractéristiques sédimentologiques 215
5.2.1.1. Caractéristiques granulométriques 215
a) Les dépôts de laves torrentielles 216
b) Les formations superficielles sources 219
5.2.1.2. Identification pétrographique 220
5.2.2. Caractéristiques physiques et de consistance 222
5.3. Propriétés hydrodynamiques des formations superficielles sources 224
5.3.1. Conductivité à saturation 225

5.3.2. Mesure de la conductivité hydraulique et des coefficients d'infiltration et de ruissellement par des expériences de pluies artificielles 226
5.4. Caractéristiques de résistance à gradient de cisaillement faible des formations superficielles sources 228
5.5. Caractéristiques de résistance à gradient de cisaillement élevé des dépôts torrentiels et des formations superficielles sources. 231
5.5.1. Caractérisation rhéologique : méthodologie et protocoles 232
5.5.1.1. Fraction < 400 µm : essais rhéométriques 232
5.5.1.2. Fraction < 400 µm et < 20 mm : essais d'affaissement (cône d'Abrams et cylindre) 235
5.5.1.3. Fraction < 20 mm : essais au plan incliné 236
5.5.1.4. Fraction 'totale': mesures terrain 238
5.5.2. Analyse du comportement des dépôts de laves et des formations superficielles 238
5.5.3. Comparaison des caractéristiques physiques des laves torrentielles avec des mélanges artificiels théoriques 240
5.6. Synthèse des caractérisations 243
5.6.1. Typologie des dépôts de laves et évolution spatiale des caractéristiques granulométriques et pétrographiques 243
5.6.2. Base de données physiques des formations superficielles sources 245
5.7. Conclusion du chapitre 5 246

Chapitre 6 : ANALYSE DE LA DYNAMIQUE TORRENTIELLE DU TORRENT DE FAUCON 247

6.1. Interprétation des trois événements torrentiels du torrent de Faucon 247
6.1.1. Estimation des paramètres hydrauliques globaux pour le torrent de Faucon 248
6.1.1.1. Estimation des volumes globaux 248
6.1.1.2. Estimation des caractéristiques d'écoulement 251
6.1.1.3. Conclusion 253
6.1.2. Reconstitution des événements torrentiels du Faucon 253
6.1.2.1. Les conditions de déclenchement 254
a) La lave torrentielle du 19 août 1996 254
b) La crue torrentielle du 4 juin 2002 258
c) La lave torrentielle du 5 août 2003 260
6.1.2.2. Les conditions de dépôts : volumes globaux écoulés, débordements associés et étalement 261
a) La lave torrentielle du 19 août 1996 262
b) La crue torrentielle du 4 juin 2002 263
c) La lave torrentielle du 5 août 2003 263
6.1.2.3. Les conditions de propagation 265
a) La lave torrentielle du 19 août 1996 266
b) La lave torrentielle du 5 août 2003 268
6.1.3. Synthèse 272
6.2. Identification des facteurs contrôlant la dynamique torrentielle du torrent de Faucon 273
6.2.1. Choix des méthodes et des variables 273
6.2.2. Analyse en Composantes Principales (ACP) 274
6.2.3. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) 278
6.2.4. Discussion 280
6.3. Conclusion du chapitre 6 281

3EME PARTIE : CINEMATIQUE DES LAVES TORRENTIELLES : APPORT DES SIMULATIONS NUMERIQUES 283

Chapitre 7 : SIMULATIONS NUMERIQUES DES LAVES TORRENTIELLES : STRATEGIE, CHOIX et VALIDITE DES CODES 285

7.1. Proposition de scénarios de laves torrentielles 285
7.2. Déclenchement des laves torrentielles par rupture de versant : l'approche par calcul de stabilité 288

7.3. Analyse numérique de la propagation et de l'étalement (dépôt) des laves torrentielles boueuses 293
7.3.1. Présentation et validité des codes 293
7.3.1.1. Le code de propagation J-DFM 1D : hypothèse, algorithme et données d'entrée ... 293
a) Equations constitutives et résolution numérique 294
b) Données d'entrées, conditions initiales et conditions aux limites 295
7.3.1.2. Sensibilité et analyse paramétrique 295
a) Erreur relative 295
b) Analyse de sensibilité 297
7.3.2. Calage aux événements observés sur le torrent de Faucon en 1996 et en 2003..... 299
7.3.2.1. Calage des modèles de propagation 299
7.3.2.2. Calage du modèle d'étalement..... 302
7.4. Conclusion du chapitre 7 303

Chapitre 8 : ANALYSE ET SIMULATION DE LAVES TORRENTIELLES : APPLICATION A DES SCENARIOS SUR LE TORRENT DE FAUCON 305

8.1. Scénarios de déclenchement 306
8.1.1. Déclenchement par glissement de terrain (Trois Hommes) 307
8.1.2. Déclenchement par glissement de terrain (Champerousse) 308
8.1.3. Déclenchement par rupture de berges (Les Clots)..... 309
8.1.4. Synthèse 310
8.2. Scénarios de propagation..... 312
8.2.1. Propagation avec contribution 312
8.2.2. Influence des seuils torrentiels sur la propagation 316
8.2.2.1. Influence du nombre de seuils torrentiels sur les caractéristiques d'écoulement..... 318
8.2.2.2. Influence de la répartition spatiale des seuils torrentiels sur les caractéristiques d'écoulement 319
8.2.2.3. Conclusion..... 320
8.2.3. Définition des volumes minimaux de matériaux libérés lors du déclenchement pour atteindre le cône de déjection et identification des points de débordement..... 320
8.2.3.1. Définition des volumes minimaux de matériaux à libérer pour atteindre le cône de déjection 320
8.2.3.2. Identification des points de débordement 321
8.3. Scénario d'étalement (dépôt) 323
8.4. Synthèse et discussion..... 327

CONCLUSION GENERALE.....331

Références bibliographiques 339

Table des Figures 359
Table des Tableaux 367
Liste des symboles 371

ANNEXES : 373

TABLE DES MATIERES