

MÉTHODOLOGIE DE DIAGNOSTIC DES LAVES TORRENTIELLES SUR UN BASSIN VERSANT ALPIN

THÈSE N° (2002)

PRÉSENTÉE AU DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES TECHNIQUES

PAR

Eric BARDOU

Ingénieur du génie rural diplômé EPF
de nationalité suisse et originaire de Thônex (GE)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. L. Vulliet, directeur de thèse
Dr Ch. Ancey, rapporteur
Dr. D. Bérod, rapporteur
Ch. Bonnard, rapporteur
Prof. A. Musy, rapporteur
Dr. D. Rickenmann, rapporteur
Dr. M. Zimmermann, rapporteur

Lausanne, EPFL
2002

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement le Pr. L. Vulliet et le Dr D. Bérod qui ont rendu cette thèse possible, l'un en acceptant de diriger cette thèse et l'autre en ayant trouvé le financement auprès de l'état du Valais et la PLANAT.

Mes remerciements vont aussi à mes collègues du CREALP, F. Baillifard, R. Bovier, J.-Y. Délèze, P. Ornstein, M. Sartori, et ainsi qu'à ceux du laboratoire de mécanique des sols et des roches de l'EPFL, Ch. Bonnard, P. Dubey, L. Gastaldo, G. Gruaz, M. Jaboyedoff, F. Mayoraz, G. Steinmann, S. Tschöpätt, S. Turnheer.

Les personnes suivantes ont aussi contribué la réussite de cette thèse, Dr Ch. Ancey, et M. Meunier du CEMAGREF, P. Bowen du laboratoire de technologie des poudres, P. Boivin et F. Favre du laboratoire de pédologie, R. Delaloye de l'IGUF, M. Zimmermann du bureau GEO7, ainsi que F. Dufour et D. Rickenmann du WSL. Qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance.

Je tiens à remercier aussi ceux qui m'ont accompagné sur le terrain Ph. Aviolat, N. Bretz, S. Fracheboud, F. Genolet, F.-X. Marquis, R. Praz, A. Vogel, ainsi que les étudiants dont les travaux de diplôme ont permis d'intéressantes discussions, F. Fournier, F. Hugon, Y. Lettry.

Je remercie aussi, tous ceux que j'ai pu rencontrer dans les divers instituts, conférences, cours que j'ai fréquenté et qui m'ont par leurs remarques permis de mûrir ma réflexion, ainsi que les témoins anonymes qui m'ont fournis des informations sur le terrain.

Dans l'espoir de n'oublier personne, je terminerai ces remerciements par les plus importants qui vont à A. Seydoux ainsi que le reste de ma famille pour m'avoir supporté durant ces années.



Vernamiège, février 2002

Résumé

La méthodologie de diagnostic des laves torrentielles proposée repose sur les développements de cinq points importants. Ces développements ont été nécessaires pour qu'un diagnostic équilibré puisse être donné. Ils ne représentent toutefois qu'une étape vers une meilleure compréhension du problème posé. La méthodologie a de ce fait été imaginée de façon à pouvoir évoluer au gré des avancées scientifiques. Ces développements ont été faits dans les domaines suivants :

- le positionnement du phénomène lave torrentielle parmi les autres mouvements de masse a permis de le définir, de façon univoque, comme "un écoulement granulaire lubrifié cinématiquement monophasique à l'échelle macroscopique" (chap. 2);
- les possibilités de liaisons entre la pluviométrie et l'apparition des laves torrentielles ont été évaluées. Ce chapitre analyse les difficultés de mesures de la pluie en région montagneuse. Ces difficultés permettent de fixer le niveau de confiance à donner aux modèles présentés (chap. 3);
- intuitivement, il existe un lien entre les laves torrentielles et leur bassin versant. La détermination relativement aisée des caractéristiques *in situ* (topographie, géomorphologie, géologie) fait de ce lien un outil primordial pour l'estimation du danger. Les travaux présentés montrent l'importance de la surface, de la pente, de la géologie, etc. pour prévoir le type de phénomène prépondérant, le volume, etc. (chap. 4);
- le déclenchement des laves torrentielles est essentiellement dû à deux mécanismes (l'érosion et la fluidification d'une masse glissée), qui peuvent apparaître selon plusieurs modalités. La connaissance de ces mécanismes permet de délimiter des zones de déclenchement potentielles, sur lesquelles les investigations seront concentrées (chap 5);
- pour refléter les observations de terrain, il est nécessaire de distinguer trois familles de laves torrentielles. Chacune de ces familles a une loi de comportement qui lui est propre. Il est donc important de bien pouvoir les distinguer pour pouvoir choisir le modèle de propagation adéquat. Des outils basés sur des essais rhéométriques sont donnés pour permettre ce choix (chap. 6).

Sur la base de ce corps de connaissances, il a été possible de donner une méthodologie pour poser le diagnostic d'un bassin versant alpin. Ce diagnostic se décompose en quatre étapes. Tout d'abord le diagnostic préliminaire vise à fournir les éléments minimaux nécessaires à une estimation grossière du danger. Les trois autres étapes peuvent être faites plus ou moins en parallèle et constituent le diagnostic proprement dit. Ce diagnostic ne traite pas de la propagation, mais doit fournir tous les éléments nécessaires aux modèles qui seront employés par la suite. La figure 7-5 résume ce diagnostic.

Summary

The proposed methodology is based on the developments of five significant points. These developments were necessary in order to give a balanced diagnosis. They represent however only one stage towards a better comprehension of the arising problem. The methodology is thus imagined to evolve with future scientific progress. These developments were made in the following fields :

- the positioning of the debris flow phenomenon among the other mass movements makes it possible to define it, in a univocal way, like "a lubricated granular flow, kinematically monophasic on a macroscopic scale" (chap. 2);
- the possibilities of connection between the pluviometry and the triggering of debris flows were evaluated. This chapter analyses the difficulties of measurements of the rain in a mountainous area. These difficulties make possible to fix the degree of confidence to be given to the presented models (chap. 3);
- intuitively, there is a link between the debris flows and their catchment area. The relatively easy determination of the *in situ* characteristics (topography, geomorphology, geology) makes of this link a useful tool to estimate the danger. The presented works show the importance of surface, slope, geology, etc. to forecast which is the dominating phenomenon, volume, etc. (chap. 4);
- the release of the debris flows is primarily due to two mechanisms (erosion and fluidification of a sliding mass), which can appear according to several modalities. The knowledge of these mechanisms makes possible to delimit potential zones of release, on which the investigations will be concentrated (chap 5);
- to reflect field's observations, it is necessary to distinguish three families of debris flows. Each one has a proper constitutive's law. It is thus significant to distinguish between these families to be able to choose the appropriate propagation's model. Tools based on rheometrical tests are given to allow this choice (chap. 6).

On the basis of this knowledge's body, it is possible to give a methodology in order to make a diagnosis of an alpine catchment area. This diagnosis is broken down into four stages. First of all the preliminary diagnosis aims to provide the minimum elements necessary for a coarse estimate of the danger. The three other stages can be made more or less in parallel and constitute the diagnosis itself. This diagnosis does not deal with propagation, but has to provide all the elements necessary to the models which will be used thereafter. Figure 7-5 summarizes this diagnosis.

Zusammenfassung

Die vorgeschlagene Methodologie ist auf den Entwicklungen von fünf wichtigen Punkten basiert. Diese Entwicklungen waren notwendig, damit eine ausgewogene Diagnose gegeben werden kann. Sie stellen allerdings nur eine Etappe in der Richtung eines besseren Verständnisses des entstandenen Problems dar. Die Methodologie ist daher vorgestellt, um entwicklungsfähig zu sein. Diese Entwicklungen wurden in den folgenden Bereichen gemacht :

- die Positionierung des Phänomens Murgang unter den anderen Massenbewegungen erlaubt, ihn in einer eindeutigen Weise, als "granularer und geschmierter Absatz, der kinematisch monophasic auf einer makroskopischen Skala ist", zu definieren (Kap. 2);
- die Verbindungsmöglichkeiten zwischen der Regenmessung und der Auslösung der Murgänge wurden geschätzt. Dieses Kapitel gibt eine Analyse der Schwierigkeiten, den Regen in gebirgiger Region zu messen. Diese Schwierigkeiten erlauben, der Vertrauensniveau der vorgestellten Modellen festzulegen (Kap. 3);
- intuitiv gibt es eine Verbindung zwischen den Murgängen und ihrem Einzugsgebiet. Die ziemlich leichte Bestimmung der Eigenschaften *in situ* (Topographie, Geomorphologie, Geologie) macht von dieser Verbindung ein wesentliches Werkzeug für die Schätzung der Gefahr. Die vorgestellten Arbeiten zeigen die Wichtigkeit der Oberfläche, des Abhanges, der Geologie usw., um die ausschlaggebende Art des Phänomens, das Volumen, usw. vorzusehen (Kap. 4);
- die Auslösung der Murgänge ist zwei Mechanismen hauptsächlich zurückzuführen (die Erosion und die Verflüssigung einer gerutschten Masse), die nach mehreren Modalitäten erscheinen können. Die Kenntnis dieser Mechanismen erlaubt, potentielle Auslösungszonen abzugrenzen, auf die die Feldarbeit konzentriert wird (Kap. 5);
- um die Feldbeobachtungen widerzuspiegeln ist es notwendig, drei Murgänge Familien zu unterscheiden. Jede dieser Familien hat ein Verhaltensgesetz, das ihm eigen ist. Es ist also wichtig, diese Familien zu unterscheiden, um den passenden Verbreitungsmodell wählen zu können. Werkzeuge, die auf rheometrischen Versuchen basiert sind, werden gegeben, um diese Wahl zu erlauben (Kap. 6).

Auf Grund dieses Kenntniskörpers war es möglich, eine Methodologie zu geben, um die Diagnose eines alpinen Einzugsgebiets zu schätzen. Diese Diagnose zersetzt sich in vier Etappen. Zuerst die vorläufige Diagnose, die darauf abzielt, die minimalen Elemente zu liefern, die für eine grobe Schätzung der Gefahr notwendig sind. Die drei anderen Etappen können mehr oder weniger parallel dazu gemacht werden, und stellen die eigentliche Diagnose dar. Diese Diagnose behandelt nicht nur von der Verbreitung, sondern soll auch alle Elemente liefern, die für die Modelle notwendig sind, die später gebraucht wird. Die Abb. 7-5 fasst diese Diagnose zusammen.

Riassunto

La metodologia proposta è basata sugli sviluppi di cinque punti significativi. Questi sviluppi sono necessari per dare una diagnosi equilibrata. Rappresentano tuttavia soltanto una fase verso una comprensione migliore del problema presentante. La metodologia è immaginata così per evolversi con progresso scientifico futuro. Questi sviluppi sono stati fatti nei seguenti settori :

- posizionare del fenomeno di colata detritica fra gli altri movimenti di massi permette di definirlo, in un modo univoco, come "un flusso granulare lubrificato, cinematicamente monofasico su una scala macroscopica" (cap. 2);
- le possibilità di collegamento fra la pioggia e le scatto dei colate detritiche sono state valutate. Questo capitolo analizza le difficoltà delle misure della pioggia in una zona montagnosa. Queste difficoltà permettono che può riparare il grado di riservatezza da dare ai modelli presentati (cap. 3);
- intuitivo, ci è un collegamento fra le colate detritiche ed il loro bacino idrologico. La determinazione relativamente facile delle caratteristiche in situ (topografia, geomorfologia, geologia) fa di questo collegamento uno strumento utile per valutare il pericolo. Gli impianti presentati mostrano l'importanza di superficie, del pendio, della geologia, ecc. per prevedere quale è il fenomeno prevalente, il volume, ecc. (cap. 4);
- lo scatto dei colate detritiche è soprattutto dovuto a due meccanismi (erosione e fluidificazione di slittate masse), che possono comparire secondo parecchie modalità. La conoscenza di questi meccanismi permette di delimitare le zone potenziali delle scatto, su cui le indagini saranno concentrate (cap. 5);
- per riflettere le osservazioni di terreno, è necessario da distinguere tre famiglie dei colate detritiche. Ognuna ha una legge cosituante adeguata. È così significativo distinguersi fra queste famiglie per potere scegliere il modello di propagazione adatto. Gli strumenti basati sulle prove rheometriche sono dati per permettere questa scelta (cap. 6).

In base a questo corpo di conoscenze è possibile dare una metodologia per fare una diagnosi d'un bacino idrologico alpino. Questa diagnosi è suddivisa in quattro fasi. In primo luogo la diagnosi preliminare, tende a fornire gli elementi minimi necessari per una valutazione del pericolo. Le tre altre fasi possono essere effettuate più o meno parallelamente e costituire la diagnosi in se. Questa diagnosi non si occupa della propagazione, ma deve fornire tutti gli elementi necessari ai modelli quale sarà usato da allora in poi. La figura 7-5 ricapitola questa diagnosi.

Symbole et abbréviation

-A-

A	⇒	aire, surface	[m ²]
A_b	⇒	surface basale de l'écoulement	[m ²]
A_{dev}	⇒	surface développée du bassin versant	[m ²]
A_{topo}	⇒	surface projetée orthogonalement	[m ²]
alt	⇒	altitude	[m _s m]
alt_{max}	⇒	altitude maximum du bassin versant	[m _s m]
alt_{min}	⇒	altitude minimum du bassin versant, ou altitude de l'exutoire	[m _s m]
a_j	⇒	élément j de surface élémentaire du bassin versant	[m ²]

-B-

B	⇒	paramètre de lieux de la formule de l'EAWAG	[-]
----------	---	---	-----

-C-

C	⇒	couple	[N m]
C_h	⇒	coefficient de rugosité de Chézy	[m ^{1/2} /s]

-D-

D_i	⇒	date de disparition de la neige après le 1 ^{er} septembre	[-]
D	⇒	diamètre	[m]
d	⇒	distance à la crête	[m]
D_s	⇒	dénivellée spécifique	[-]
D_u	⇒	durée des précipitations	[h]

-E-

e	⇒	productivité linéaire en sédiments	[m ³ /m]
ETP	⇒	évapotranspiration	[mm/j]
EX	⇒	exposition	[°]

-F-

F	⇒	fréquence cumulée	[%]
FN	⇒	fraction des pluies tombant sous forme de neige	[%]
F_i	⇒	fraction i de matériel mis en mouvement lors d'un événement[%]	
f_s	⇒	coefficient de forme de la section	[Pa]

-G-

g	⇒	accélération de la gravité	[m/s ²]
----------	---	----------------------------	---------------------

G_l	⇒	apports dus aux glaciers	[mm/j]
-H-			
h	⇒	hauteur	[m]
-I-			
I	⇒	entrée (input)	[mm]
I_c	⇒	intensité pluviale critique	[mm/h]
I_{eros}	⇒	indice d'érodibilité	[-]
I_g	⇒	indice géologique	[-]
IPA	⇒	indice des précipitations antécédentes	[m ²]
-J-			
J	⇒	pente	[°, ou %]
J_c	⇒	pente du cône	[°, ou %]
J_t	⇒	pente de la zone de transport	[°, ou %]
-K-			
K	⇒	paramètre de consistance	[Pa /s ⁻ⁿ]
K^{cas}	⇒	paramètre de consistance de casson	[Pa /s ⁻¹]
K	⇒	paramètre de temps de retour de la formule de l'EAWAG	[-]
K_{a1}	⇒	apports d'eau souterraine	[mm/j]
K_{a2}	⇒	perte en eau souterraine	[mm/j]
K_g	⇒	coefficient de Gravelius	[-]
-L-			
L	⇒	longueur du torrent	[m]
-M-			
MNT	⇒	modèle numérique de terrain	
-N-			
n	⇒	index du comportement de l'écoulement	[mm/j]
n_m	⇒	rugosité de manning	[s/m ^{1/3}]
N_e	⇒	apports retardés du à la neige	[mm/j]
-O-			
O	⇒	sorties (output)	[mm]
-Q-			

Q	⇒	débit ou lame ruisselée hors du système du bassin versant	[m ³ /s ou mm/j]
-P-			
P	⇒	précipitations	[mm]
P₁₀₀	⇒	quantité de pluie sur 24 h d'un temps de retour de 100 ans	[mm]
Pr	⇒	probabilité	
-R-			
R	⇒	facteur de rugosité	[-]
r	⇒	rayon d'un grain	[mm]
R_h	⇒	rayon hydraulique	[m]
-S-			
S	⇒	section	[m ²]
s_e	⇒	section érodable	[m ²]
SIG	⇒	système d'information géographique	
-T-			
T_m	⇒	température mensuelle moyenne	[°]
-U-			
U	⇒	vitesse moyenne	[m/s]
-V-			
V	⇒	volume	[m ³]
V_{ev}	⇒	volume événementiel	[m ³]
-X-			
x	⇒	coordonnée de longitude	[m]
-Y-			
y	⇒	coordonnée de latitude	[m]

Symbole grec

– α –		
α	\Rightarrow	angle plan par rapport à l'axe du torrent [°]
– χ –		
χ	\Rightarrow	coefficient de transformation du débit liquide en débit solide [-]
– Δ –		
ΔS	\Rightarrow	différences stockage [mm]
– ϕ –		
ϕ	\Rightarrow	angle de friction interne [°]
– γ –		
$\dot{\gamma}$	\Rightarrow	taux de cisaillement [s ⁻¹]
γ_m	\Rightarrow	poids volumique de la matrice [N/m ³]
γ_s	\Rightarrow	poids volumique des grains [N/m ³]
γ_w	\Rightarrow	poids volumique de l'eau [N/m ³]
– η –		
η	\Rightarrow	viscosité [Pa s]
– λ –		
λ	\Rightarrow	distance parcourue [m]
– μ –		
μ_b	\Rightarrow	viscosité de Bingham [Pa s]
– π –		
π	\Rightarrow	nombre "pi" [-]
– θ –		
θ	\Rightarrow	pente du lit [° ou %]
– τ –		
τ	\Rightarrow	effort de cisaillement [Pa]
τ_c	\Rightarrow	seuil de contrainte [Pa]

τ_c^{cas}	\Rightarrow	seuil de contrainte de Casson	[Pa]
τ_b	\Rightarrow	seuil de contrainte de Bingham	[Pa]
τ_o	\Rightarrow	seuil de contrainte au fond	[Pa]
τ_p	\Rightarrow	seuil de contrainte au paroi	[Pa]
– ξ –			
ξ	\Rightarrow	paramètre global des caractéristique du grain et de la concentration	[1/s m ⁻²]
– Ψ –			
Ψ_0	\Rightarrow	coefficient de réduction de la lame ruisselée due à l'infiltration	[-]

Table des matières

Remerciements.....	ii
Résumé, Summary, Zusammenfassung, Riassunto.....	iii
Notations, symboles	vi

Chapitre 1

1. Introduction - - - - -	1
1.1. Problématique	2
1.1.1. Place du diagnostic proposé dans le schéma d'étude actuel	2
1.1.2. Faiblesse des outils de diagnostic actuels pour les laves torrentielles	4
1.2. Spécificité du travail	4
1.2.1. Multidisciplinarité de l'étude des laves torrentielles	4
1.2.2. Représentativité spatiale.....	5
1.2.3. Le problème d'échelle.....	6
1.2.4. Phénomène naturel et temporalité.....	6
1.2.5. Sources des informations de base	6
1.3. Structure du document	10
1.3.1. Plan de travail.....	10
1.3.2. Guide de lecture	10

Chapitre 2

2. Le phénomène lave torrentielle - - - - -	11
2.1. Introduction.....	11
2.1.1. La terminologie	12
2.2. Descriptions des laves torrentielles.....	12
2.2.1. Les composantes d'une lave torrentielle.....	12
2.2.2. Les entités fonctionnelles d'une lave torrentielle.....	14
2.2.3. Quelques grandeurs caractéristiques	15
2.2.4. La phénoménologie des laves torrentielles	16
2.2.4.1. Le déclenchement.....	16
2.2.4.2. L'écoulement	17
2.2.4.3. La déposition.....	17
2.2.5. Les séquences d'écoulement	17
2.2.5.1. La phase pré-événement.....	17
2.2.5.2. La phase frontale	18
2.2.5.3. La phase principale	18
2.2.5.4. La phase terminale	20

2.2.5.5. La phase post-événement	20
2.3. L'environnement des laves torrentielles.....	21
2.3.1. La relation entre les laves torrentielles et le bassin versant	21
2.3.2. Les prédispositions du bassin versant	22
2.3.3. Le contexte géographique	23
2.4. Les classifications existantes	25
2.4.1. Classifications de Varnes	25
2.4.2. Classifications Brundsen et Innes	27
2.4.3. Classification de Pierson et Costa	28
2.4.4. Classifications adaptée de Meunier, Coussot, Davies.....	29
2.5. Proposition de nouvelle classification.....	31
2.5.1. Classification par rapport aux mouvements de masse	31
2.5.1.1. Buts	31
2.5.1.2. Démarche	31
2.5.1.3. Résultat.....	33
2.5.2. Les phénomènes similaires	34
2.5.3. Typologie des laves torrentielles.....	34
2.6. Conclusion.....	35

Chapitre 3

3. Lien entre la composante eau et les laves torrentielles - - - - -	37
3.1. Introduction.....	37
3.2. Relations entre la composante eau et les laves torrentielles.....	38
3.3. Analyse phénoménologique de l'hydrologie alpine	40
3.3.1. Généralités.....	40
3.3.2. Forme des précipitations	42
3.3.2.1. Précipitations sous forme liquide ou sous forme solide.....	42
3.3.2.2. Effets de la fonte des neiges.....	42
3.3.3. Quantité des précipitations	44
3.3.3.1. Quantité des précipitations en fonction de l'altitude.....	44
3.3.3.2. Quantité de précipitation en fonction du relief	44
3.3.3.3. Quantité de précipitation au sein d'une averse	46
3.4. Les modèles de déclenchement liés à la pluviométrie	47
3.4.1. Formule de Caine	47
3.4.2. Formules de Zimmermann et al.	49
3.4.3. Discussion des formules proposant un seuil global	50
3.4.3.1. Pour le Valais (Alpes centrales).....	50
3.4.3.2. Pour le Chablais (bordure des Alpes).....	51

3.4.3.3. Synthèse	51
3.4.4. Seuil de déclenchement pour les pluies convectives.....	51
3.4.5. Seuil de déclenchement pluviométrique et état hydrique antécédent	52
3.5. Conclusion.....	55

Chapitre 4

4. Liens entre le bassin versants et les laves torrentielles - - - - -	57
4.1. Introduction.....	57
4.2. Sélection des bassins versants	58
4.2.1. Généralités.....	58
4.2.2. La dangerosité	60
4.3. Caractéristiques morphologiques.....	63
4.3.1. Surface.....	63
4.3.2. Altitude.....	65
4.3.2.1. Exemple de l'effet de l'altitude lors des événements d'octobre 2000	65
4.3.3. Relief	68
4.3.4. Pente.....	70
4.4. Les caractéristiques hydrologiques	72
4.4.1. Forme du bassin versant.....	72
4.4.2. Réponse hydrologique du bassin versant	73
4.5. Caractéristiques géomorphologiques	74
4.5.1. Les indicateurs géomorphologiques.....	74
4.5.1.1. Les éléments géomorphologiques à reporter.....	74
4.5.1.2. Remarques sur les couvertures quaternaires	77
4.5.2. Utilisation.....	78
4.6. Volume transporté.....	78
4.6.1. Remarques préliminaires.....	78
4.6.2. Estimation grossière du volume en fonction des processus de transport	79
4.6.2.1. Méthode du GHO 96.....	79
4.6.3. Estimation du volume par des formules empiriques globales.....	81
4.6.3.1. Kronfellner-Kraus 84	81
4.6.3.2. D'Agostino 96.....	82
4.6.3.3. Hampel 80	82
4.6.3.4. Rickenmann 97.....	83
4.6.4. Critiques des formules empiriques globales	83
4.6.4.1. Influence de la surface	84
4.6.4.2. Influence de la variabilité du substrat sur un bassin versant	85
4.6.5. Variabilité temporelle du volume.....	86
4.6.5.1. Estimation d'une plage de volume événementiel moyen.....	86

4.6.5.2. Nouvelle possibilité d'estimation de la variabilité du volume	87
4.6.6. Estimation du volume par des méthodes géomorphologiques	88
4.6.6.1. Hungr 84.....	89
4.6.6.2. Méthode des sections érodables	89
4.6.7. Utilisation des formules géomorphologiques.....	90
4.7. Caractéristiques géologiques.....	93
4.7.1. Âge des roches	93
4.7.2. Le domaine paléogéographique	94
4.7.3. Lithologie	94
4.7.3.1. Lithologie et dangerosité.....	94
4.7.3.2. Lithologie et comportement des laves torrentielles	96
4.7.4. Synthèse sur l'influence de la géologie.....	96
4.8. Conclusion.....	98

Chapitre 5

5. Le déclenchement - - - - -	99
5.1. Introduction.....	99
5.2. Les mécanismes de déclenchement des laves torrentielles	99
5.2.1. Déclenchement par fluidification d'un glissement de terrain	100
5.2.2. Déclenchement par érosion	102
5.2.3. Les modalités de déclenchement.....	103
5.2.3.1. La déstabilisation du lit	103
5.2.3.2. La rupture de digue	104
5.2.3.3. Causes anthropiques favorisant le déclenchement.....	104
5.3. Détection des zones de déclenchement	106
5.4. Le déclenchement de laves torrentielles par érosion	108
5.4.1. Généralités.....	108
5.4.2. Séquences du déclenchement par érosion	108
5.4.3. Importance pour le diagnostic	109
5.4.4. Erosivité des pluies	110
5.4.5. Erodibilité des sols	110
5.4.6. Mise en évidence expérimentale du déclenchement par érosion	111
5.4.6.1. Description de l'expérience	111
5.4.6.2. Résultats	113
5.4.6.3. Discussion	113
5.5. Conclusion.....	114

Chapitre 6

6. Les caractéristiques intrinsèques des laves torrentielles - - - - -	117
6.1. Introduction.....	117
6.2. Rappels et énoncé du problème	119
6.2.1. Rhéologie	119
6.2.2. Rhéologie des entités fonctionnelles.....	120
6.2.2.1. Le front.....	120
6.2.2.2. Le corps.....	122
6.2.2.3. La queue.....	122
6.2.3. Variations des caractéristiques des laves torrentielles	122
6.3. Différenciation rhéologique des laves torrentielles	123
6.3.1. Base mécanique.....	123
6.3.2. Démarche	124
6.3.3. Résultats des observations de terrain	124
6.4. Résultats des essais rhéométriques.....	125
6.4.1. La caractérisation rhéologique des dépôts	127
6.4.2. Détermination des caractéristiques rhéologiques.....	129
6.4.3. Résultats	131
6.4.4. Effets perturbateurs	132
6.4.4.1. Glissement aux outils et fracturation de l'échantillon.....	132
6.4.4.2. Evolution du matériau durant l'essai.....	133
6.4.5. Discussion	135
6.5. Comparaison des mesures de terrain avec celles du laboratoire.....	135
6.5.1. Rappel théorique	135
6.5.2. Résultats	136
6.5.3. Discussion	138
6.6. Caractérisation minéralogique et granulométrique	139
6.6.1. Minéralogie	139
6.6.1.1. Types d'argile.....	139
6.6.1.2. Effet sur la rhéologie.....	140
6.6.1.3. Mise en évidence expérimentale	141
6.6.2. Granulométrie	142
6.6.2.1. Détermination du type rhéologique en fonction de la granulométrie	142
6.6.3. Discussion	144
6.7. Conclusion.....	145

Chapitre 7

7. Le diagnostic d'un bassin versant- - - - -	147
7.1. Introduction.....	147
7.2. Diagnostic préliminaire	150
7.2.1. Acquisition des données de base.....	150
7.2.1.1. Cartes.....	150
7.2.1.2. Photos aériennes.....	150
7.2.1.3. Archives	151
7.2.2. Analyse succincte.....	151
7.2.2.1. Données morphométriques.....	151
7.2.2.2. Mise en place d'une base de donnée géoréférencée.....	152
7.2.2.3. Estimation du volume	152
7.2.2.4. Estimation du débit et de la vitesse	153
7.2.2.5. Première estimation des points critiques.....	153
7.2.3. Première campagne de terrain.....	154
7.2.3.1. Planification	154
7.2.3.2. Levé de terrain.....	154
7.2.4. Rapport de diagnostic préliminaire	154
7.3. Analyse spatiale	155
7.3.1. Complément d'information.....	155
7.3.1.1. Géologie	155
7.3.1.2. Hydrogéologie.....	155
7.3.1.3. Géomorphologie.....	157
7.3.1.4. Profil en long.....	157
7.3.1.5. Ouvrages	157
7.3.1.6. Divers	157
7.3.2. Identification des zones de déclenchement potentiel.....	158
7.3.2.1. Détermination grossière des zones de déclenchement.....	158
7.3.2.2. Détermination plus fine des zones de déclenchement.....	158
7.3.3. Deuxième campagne de terrain.....	158
7.3.3.1. Planification	158
7.3.3.2. Levé de terrain.....	158
7.3.4. Rapport de diagnostic intermédiaire	159
7.3.4.1. Carte des zones de déclenchement.....	159
7.3.4.2. Profil en long.....	159
7.3.4.3. Points critiques	159
7.3.4.4. Liste des besoins	159
7.4. Analyse fonctionnelle	160
7.4.1. Troisième campagne de terrain	160

7.4.1.1. Planification	160
7.4.1.2. Terrain	160
7.4.2. Analyse des échantillons	161
7.4.3. Analyse du phénomène lave torrentielle	161
7.4.3.1. Processus sédimentaire.....	161
7.4.3.2. Estimation des paramètres de l'écoulement.....	161
7.4.3.3. Analyse hydrologique	162
7.4.3.4. Susceptibilité des zones de déclenchement.....	162
7.4.3.5. Liens entre les zones de déclenchement et le torrent	163
7.4.3.6. Etablissement de scénarios.....	163
7.4.4. Rapport sur les caractéristiques du phénomène	163
7.5. Analyse fréquentielle.....	163
7.5.1. Récolte d'information	164
7.5.1.1. Archives	164
7.5.1.2. Cadastre des événements.....	164
7.5.1.3. Données météo-climatiques	164
7.5.2. Estimation de la fréquence du phénomène.....	164
7.5.2.1. Moyens opérationels de détermination de la fréquence	165
7.5.2.2. Reconstruction d'événement.....	165
7.6. Diagnostic du danger	166
7.7. Conclusion.....	168
 Chapitre 8	
8. Conclusion - - - - -	169
9. Bibliographie - - - - -	173
10. Annexes - - - - -	189

Liste des Figures

Figure 1-1: Place du diagnostic du danger dans une étude relative aux dangers naturels (SIA 1999).	2
Figure 1-2: Importance de l'interprétation (SIA 1999).....	2
Figure 1-3: Exemple de l'importance de l'interprétation lors de la cartographie des phénomènes.	3
Figure 1-4: Eléments minimums de la légende	4
Figure 1-5: Aperçu des divers domaines impliqués dans l'étude des laves torrentielles.	5
Figure 1-6: Passage du corps d'une lave torrentielle sur un barrage (Illgraben).....	7
Figure 1-7: Prélèvement dans un dépôt frais (encore mou) dans l'Illgraben.	8
Figure 1-8: Mini-lave torrentielle déclenchée artificiellement dans l'Illgraben.	8
Figure 1-9: Bassin versant de l'Illgraben (partie facilement érodable).	9
Figure 2-1: Diagramme conceptuel représentant le mélange adéquat.....	13
Figure 2-2: Les entités fonctionnelles d'une lave torrentielle.	14
Figure 2-3: Forte érosion ponctuelle d'environ 250 m ² dans le Luegelbach, Mattertal.	16
Figure 2-4: mouvement des blocs en surface de l'écoulement.....	18
Figure 2-5: Description des différentes phases d'une lave torrentielle en un point donné du lit.	19
Figure 2-6: Chenal d'écoulement avec un profil en "U" typique d'un torrent à lave torrentielle.	21
Figure 2-7: Le système bassin versant subdivisé en trois zones.	22
Figure 2-8: Illustration qualitative de la relation entre les prédispositions du bassin versant.....	23
Figure 2-9: Partie occidentale de l'arc alpin et le canton du Valais.	24
Figure 2-10: Illustration de l'ambiguïté de la traduction des termes, éboulement de Frank, Alberta.	26
Figure 2-11: Classification des écoulements de débris selon Innes (1987).	27
Figure 2-12: Ecoulement catastrophiques dans la Zavràgia.	28
Figure 2-13: Classification rhéologique pour une granulométrie grossière et hétérogène.	30
Figure 2-14: Nouvelle classification proposée pour les mouvements de masse.	32
Figure 3-1: Pont sur l'Ouvèze à Vaison-La-Romaine (84).	38
Figure 3-2: Cycle hydrologique en montagne.	40
Figure 3-3: Variation altitudinale de l'isotherme du 0°C sur 7 ans et altitude des bassins versants.	41
Figure 3-4: Réaction hydrologique de divers bassins versants traduite par le débit spécifique.	42
Figure 3-5: Rose des vents de l'altitude de disparition de la neige.....	43
Figure 3-6: Gradient pluviométrique annuel dans les vallées des Dranses.	44
Figure 3-7: Répartition spatiale de l'averse du 9 juin 2000 à Thonon.....	45
Figure 3-8: Averse du 8 mai 2000 sur les Agettes (VS).....	46
Figure 3-9: Images radar de l'averse du 8 août 1999 ayant déclenché des laves torrentielles.....	48
Figure 3-10: Seuils de déclenchement pluviométriques de Caine et de Zimmermann.....	50
Figure 3-11: Caractéristiques des pluies inférieures à 1 heure, supposées convectives.....	52
Figure 3-12: Seuils d'alarme pluviométriques valables pour la région de Beijing.....	53
Figure 3-13: Analyse des pluies ayant provoqué des laves torrentielles dans l'Illgraben.	54
Figure 3-14: Lave torrentielle due à la fonte, vallée de Hunza (Pakistan).....	55
Figure 4-1: Distribution des bassins versants de base de cette étude.	59
Figure 4-2: Répartition des types de surface en Valais.....	60
Figure 4-3: Haut du bassin versant du Ritzibach, avec une combe plus fortement soumise à l'érosion.	64
Figure 4-4: Surfaces classées des 126 sous-bassins versants retenus dans le 1er échantillonnage.	64
Figure 4-5: Aiguilles de glace extrudée du sol à une altitude de 2300 m dans la région de Fully (VS).	66
Figure 4-6: Carte de différence d'élévation de l'isotherme du 0°C entre le 11 et le 14 octobre 2000.	67
Figure 4-7: Courbe hypsométrique de trois bassins versants.	68
Figure 4-8: Rapport entre la dénivelée spécifique et la pente du cône fluvial.	69
Figure 4-9: Différence entre la moyenne des courbes hypsométriques des bassins versants.....	70
Figure 4-10: Distribution des valeurs de l'indice Iéros pour différentes dangersités de bassins versants....	71

Figure 4-11: Différenciation entre l'indice de Gravelius pour différentes dangersités.....	72
Figure 4-12: Courbe aire distance pour plusieurs bassins versants.....	73
Figure 4-13: Bloc diagramme d'un bassin versant alpin.	75
Figure 4-14: Glissement de terrain, cause d'une lave torrentielle le 15 mai 1999 dans le torrent des Marais. 76	
Figure 4-15: Les différents volumes de matériaux transportés par un torrent et leur mode de détermination. 79	
Figure 4-16: Diagramme pour l'estimation qualitative de la quantité de matériaux solide.....	80
Figure 4-17: Exemple de distortion entre les courbes de niveau et un MNT.....	83
Figure 4-18: Comparaison des volumes estimés pour des torrents du Val Ferret et du Mattertal.	85
Figure 4-19: Comparaison du volume estimé pour l'Ilgraben et pour l'Altebach.....	86
Figure 4-20: Distribution des volumes en fonction de la surface.	87
Figure 4-21: Principe du calcul de la variabilité temporelle du volume.	88
Figure 4-22: image des laves torrentielles survenues à Fully le 18 novembre 1939.	91
Figure 4-23: Aperçu géologique et géomorphologique des bassins versants de Saxé et du Métin.	92
Figure 4-24: Les différents volumes estimés pour les laves torrentielles de Fully en 1939.	93
Figure 4-25: Différence de dangerosité des bassins versants en fonction du domaine paléogéographique. ..	94
Figure 4-26: Familles lithologiques et comportement des laves torrentielles.....	96
Figure 4-27: Les seuils de pluies nécessaires pour le déclenchement dans deux régions géologique.....	97
Figure 5-1: Comparaison entre la hauteur de la nappe et la fréquence de déclenchement.	101
Figure 5-2: Développement de la pression d'eau interstitielle dans le temps pour trois hydrogrammes.....	101
Figure 5-3: Cannelure d'érosion tapissant toute la partie supérieure du bassin versant de l'Ilgraben.....	102
Figure 5-4: Déclenchement par déstabilisation du lit, Ilgraben.	103
Figure 5-5: Pente du lieu de la déstabilisation du lit en fonction de la surface contributive.....	104
Figure 5-6: Lave torrentielle de Fully.....	105
Figure 5-7: Surface contributive de 0,5 ha (en rouge) dans une pente de la région des Dents du Midi.	106
Figure 5-8: Laves torrentielles emboîtées, région du Chavalard.....	107
Figure 5-9: Schéma de formation des laves torrentielles.	108
Figure 5-10: Taille des gouttes en fonction de l'intensité pluviale.	110
Figure 5-11: Disposition schématique des sites d'expérience.....	111
Figure 5-12: Seuil de mise en mouvement des grains.....	114
Figure 6-1: Origines des diverses modélisations possibles des laves torrentielles.	118
Figure 6-2: Divers types de comportements rhéologiques pour les fluides.	120
Figure 6-3: Hauteurs d'écoulement déterminées sur les torrents du Moscardo et de l'Ilgraben.....	121
Figure 6-4: Classification des dépôts de 35 torrents selon le type rhéologique.	125
Figure 6-5: Correspondance entre les courbes d'écoulement prévues et celles observées.	127
Figure 6-6: Début d'un essai réalisé sur un rhéomètre Haake Rheostress RS100.	128
Figure 6-7: Définition de la mesure pour les courbes d'écoulement.....	128
Figure 6-8: Comparaison de l'ajustement par un modèle de Herschel-Bulkley et un modèle de Casson. ...	129
Figure 6-9: Détermination du seuil de contrainte pour la lave torrentielle du torrent de Verrette.....	131
Figure 6-10: Mise en place du matériel lors de la première montée.....	132
Figure 6-11: Granulométrie d'un matériau frictionnel-visqueux avant et après le cisaillement.	133
Figure 6-12: Exemples d'essais qui n'ont pas réussi suite à l'apparition de divers effets perturbateurs.....	133
Figure 6-13: Evolution de l'éprouvette lors d'un essai au rhéomètre plan-plan.....	134
Figure 6-14: Mesure d'un bourrelet latéral sur le torrent de Batsoule.	136
Figure 6-15: Valeurs des seuils de contraintes déterminées au laboratoire et sur des bourrelets latéraux....	137
Figure 6-16: Effet d'échelle lors de la préparation des échantillons pour le passage au rhéomètre.	138
Figure 6-17: Diffractogramme X pour des échantillons, contenant des interstratifiés illite / smectite	140
Figure 6-18: Effet des argiles interstratifiées illite-smectite sur le seuil de contrainte.	141
Figure 6-19: Effet de la présence et de la forme des argiles sur les échantillons écrêtés à 400 mm.	142
Figure 6-20: Fuseaux granulométriques en fonction des types de comportement rhéologique.....	143
Figure 6-21: Utilisation de fuseaux granulométrique pour estimer le comportement rhéologique.	144

Figure 7-1: Place du diagnostic dans la gestion des risques naturels.	147
Figure 7-2: Les diverses étapes du diagnostic du danger.	148
Figure 7-3: Exemple de profil en long sur la partie supérieure du St-Barthélémy.....	156
Figure 7-4: Dynamique du bassin versant traduite en terme de prédispositions.	166
Figure 7-5: Méthodologie de diagnostic d'un bassin versant à laves torrentielles.....	167

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Observations directes de laves torrentielles en mouvement	6
Tableau 1.2: Torrents où les traces d'événements récents ont été analysées	7
Tableau 1.3: Observation de mini-laves torrentielles déclenchées artificiellement.....	8
Tableau 1.4: Films montrant des laves torrentielles.....	9
Tableau 2.1: Valeurs typiques de concentration solide et de densité du mélange pour les laves torrentielles	15
Tableau 2.2: Caractéristiques moyennes des laves torrentielles	15
Tableau 2.3: Portrait type des bassins versants étudiés.....	25
Tableau 2.4: Valeurs approximatives des divers paramètres d'écoulement selon Costa (1984)	29
Tableau 2.5: Récapitulatif des ressemblances et des différences les plus significatives	35
Tableau 3.1: Quelques déclenchements avec leur phénomène météo-climatique prépondérant	39
Tableau 4.1: Dangerosité des bassins versants retenus pour l'étude.	63
Tableau 4.2: Valeurs de productivité spécifique (m ³ /km ²), suivant diverses géologies	80
Tableau 4.3: Valeur de l'indice géologique pour la formule de D'Agostino (1996)	82
Tableau 4.4: valeurs de productivité linéaire (Hungar, 1984)	89
Tableau 4.5: valeurs des sections d'érosion (Haerberli et al., 1992).....	90
Tableau 4.6: Répartition par dangerosité des différentes lithologies présentes sur les bassins versants.	95
Tableau 5.1: Caractéristiques des sites de déclenchement potentiel (Zimmermann et al. 1997).....	106
Tableau 5.2: Résultats des divers essais de déclenchement artificiel effectués au cours de cette étude.....	112
Tableau 6.1: Classification rhéologique des laves torrentielles	123
Tableau 6.2: Principaux résultats rhéologiques obtenus sur des échantillons viscoplastiques	130
Tableau 6.3: Différentes valeurs du seuil de contrainte de déposition déterminées sur un même dépôt.....	137
Tableau 6.4: Représentation semi-quantitative du type d'argile parmi quelques bassins versants.....	139
Tableau 6.5: Caractéristiques physico-chimiques de quelques argiles (McBride 1994)	140

*"[L'âne sauvage] se rit du tumulte des vil-
les, il n'entend pas les cris d'un maître. Il
parcourt les montagnes pour trouver sa pâtu-
re, il est à la recherche de tout ce qui est vert"*

Job, XXXIX, 8-11

Chapitre 1

Introduction

Le site choisi pour une infrastructure est-il sûr vis à vis d'un danger naturel ? Telle est l'une des questions que se pose l'ingénieur lorsqu'il doit planifier et/ou réaliser une construction. Pour répondre à cette question, il devra faire le tour de tous les dangers naturels pouvant affecter le site choisi. En zone montagneuse, il devra tenir compte des avalanches, des chutes de pierre, des éboulements, des glissements de terrain et des laves torrentielles. Ces dernières constituent le thème central de ce travail, bien que les interrelations entre ces phénomènes demandent une vue d'ensemble des dangers potentiels.

Que ce soient les phénomènes de pente ou les phénomènes climatiques, l'ensemble du territoire alpin est soumis à rude épreuve. Durant la période consacrée à ce travail, il y a eu plus d'une vingtaine de morts lors des avalanches de Montroc et d'Evolène et près d'une dizaine de morts durant les intempéries d'octobre 2000 (en comptant le Piémont et le Valais). Malgré cela, les Alpes sont peuplées depuis très longtemps. Des traces d'installations fixes sur le passage du G^d-S^t-Bernard remontent à plus de 3000 ans. D'autres traces attestent de l'occupation des vallées latérales au Rhône pendant le Néolithique. Il est donc possible de vivre dans ces régions. La qualité de vie que l'on y trouve est même très prisée par les habitants des villes. Pourtant aujourd'hui l'acceptation du risque par la société a changé. La pression sur l'utilisation du territoire aussi. Savoir si un site est sûr devient alors un grand défi à relever pour l'ingénieur, comme pour le responsable de l'aménagement du territoire.

Dans ce contexte il faut reconnaître que les laves torrentielles sont l'un des dangers naturels dont l'étude scientifique est la moins avancée. Cela peut s'expliquer par leur faible probabilité d'apparition (par rapport aux avalanches) ou par la faible durée du phénomène (par rapport aux glissements de terrain). Surtout cela peut s'expliquer par la complexité de la mécanique et de la physique du phénomène. En effet l'étude des laves torrentielles fait intervenir des connaissances très pointues dans le domaine de l'hydraulique, de l'hydrologie, de la physique des milieux granulaires, de la rhéologie, de la géomorphologie, etc.

L'étude des laves torrentielles doit donc être envisagée dès son début comme une étude multidisciplinaire. Les approches originales contenues dans ce travail sont réparties tout au long des chapitres. Ce travail avait pour but d'aboutir à **une méthodologie de diagnostic et de prévision des laves torrentielles sur un bassin versant alpin**. Le bassin versant est l'unité de travail dans le domaine des dangers hydrologiques. Cela répondait à un vœu de l'état du Valais, canton fortement soumis aux dangers naturels, qui a assuré en grande par-

tie le financement de ce travail. La thèse présentée ici a pour but d'apporter un outil supplémentaire à l'arsenal de l'ingénieur. C'est une partie de la réponse au défi posé par la Nature. On peut résumer cet outil par une question :

"Comment prédire les caractéristiques d'une lave torrentielle à partir d'un minimum d'informations ?"

1.1. Problématique

1.1.1. Place du diagnostic proposé dans le schéma d'étude actuel

Aujourd'hui le déroulement d'une étude de danger est recommandé par la SIA (cf. figure 1-1). Les informations et les mesures peu denses concernant les laves torrentielles dans les Alpes nécessitent qu'une phase de diagnostic soit entreprise avant la modélisation de la propagation du danger (carte des dangers). Ce diagnostic, outre une carte des phénomènes, devrait contenir les informations décrites dans la méthodologie donnée au chapitre 7.

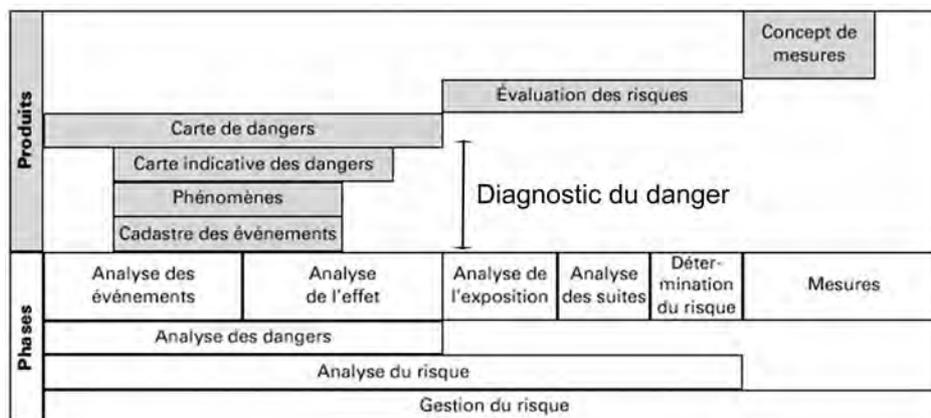


Figure 1-1: Place du diagnostic du danger dans une étude relative aux dangers naturels (SIA 1999).

Pour pouvoir fournir les éléments essentiels à l'établissement de scénarios et pouvoir fournir les paramètres nécessaires aux modèles, il est primordial de pouvoir évaluer l'intensité et la probabilité d'un phénomène potentiel (cf. figure 1-2). Cette interprétation doit se faire en parallèle avec le report des phénomènes observés, afin d'en assurer la qualité. Cette part interprétative n'est actuellement pas assez mise en avant.

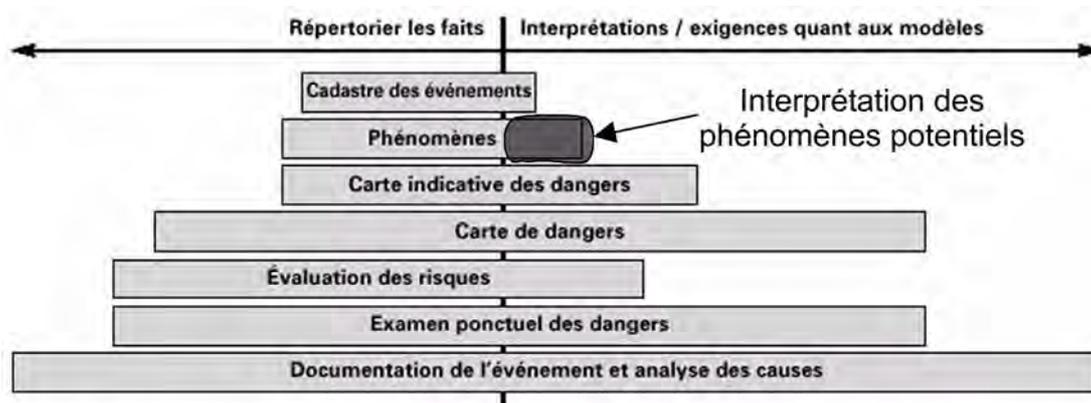


Figure 1-2: Importance de l'interprétation (SIA 1999).

La figure 1-3 montre quelle importance peut avoir l'interprétation des phénomènes. C'est le torrent de l'Ilgraben qui sert d'exemple (partie supérieure de la figure 1-3). La carte du haut a été faite juste après une lave torrentielle. Trois érosions de berges dans du terrain meuble (croissants verts) ont pu être observées. Une analyse un peu plus poussée a montré (carte du bas) que toute la berge gauche du torrent pouvait potentiellement lui fournir des matériaux. En effet le talus de la berge gauche est formée par une masse éboulée composée de matériaux fins et grossiers (cf. bilan eau-fines-granulats § 7.4.3.). Toute la berge doit donc être indiquée comme pouvant être érodable (surface beige).

En fait la carte supérieure ne devrait être qu'un élément du cadastre des événements. Dans l'absolu, après plusieurs années, la superposition des divers éléments du cadastre donnerait l'image de la carte interprétative (image inférieure). Dans cet exemple, l'interprétation doit être intégrée au diagnostic du danger, car elle permet d'estimer le volume.

Ce travail de cartographie interprétative doit toujours pouvoir être différencié des phénomènes observés. Pour cela toutes les informations reportées (sous forme numérique dans un SIG) doivent comporter la mention de phénomène avéré ou de phénomène potentiel, en plus des champs minimaux (auteur, date, etc.).

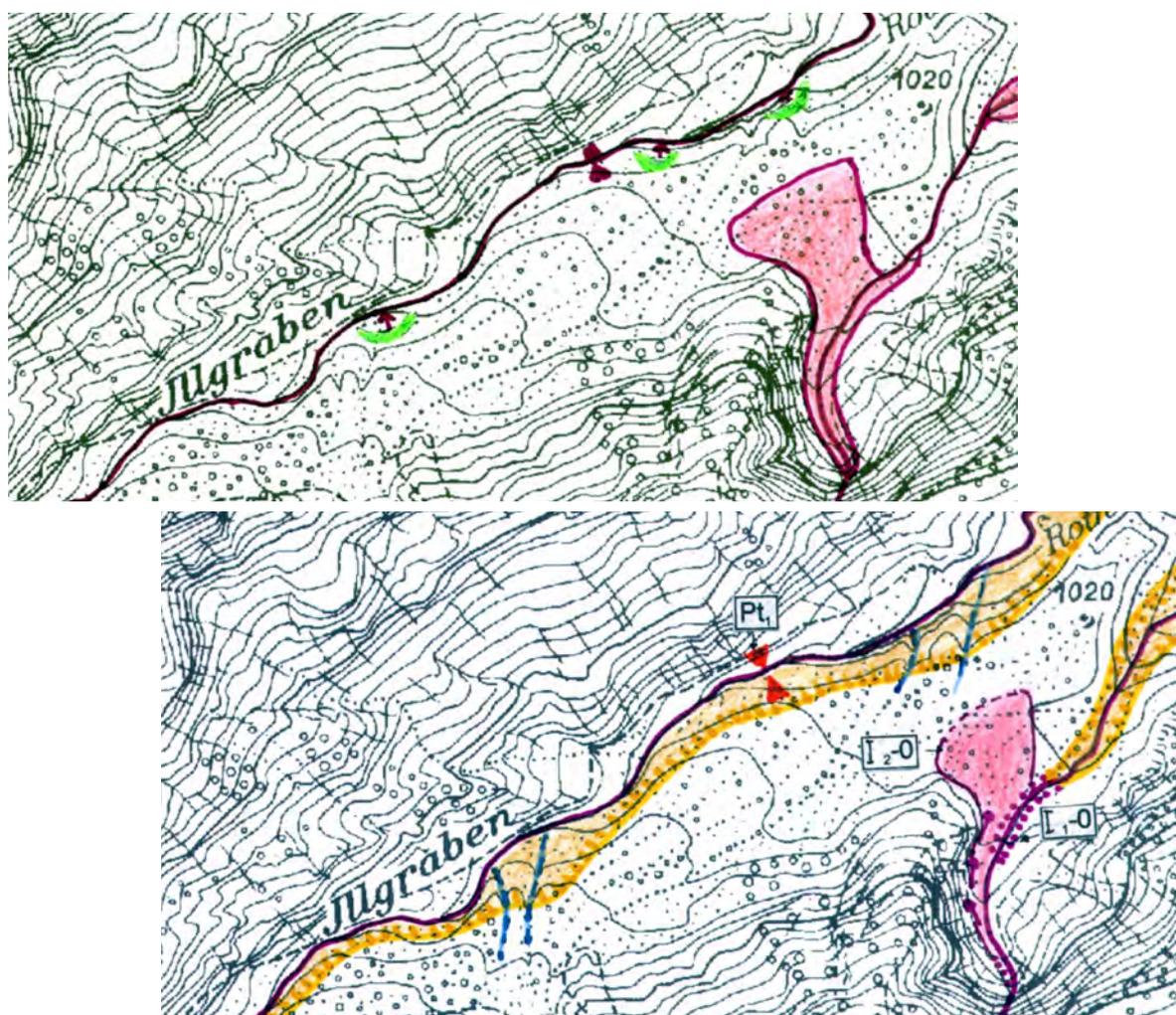


Figure 1-3: Exemple de l'importance de l'interprétation lors de la cartographie des phénomènes. Cas de l'Ilgraben. L'image du haut montre la carte des phénomènes telle qu'elle serait faite en suivant les recommandations actuelles (Kienholz et Krummenacher 1995). L'image du bas montre la même portion du bassin versant avec une carte interprétative des phénomènes.

1.1.2. Faiblesse des outils de diagnostic actuels pour les laves torrentielles

Pour que le diagnostic du danger lave torrentielle puisse être posé, il faut rajouter quelques taxons à la légende existante. Ces éléments nouveaux sont présentés à la figure 1-4. Le point essentiel est le report des bourrelets latéraux (ou des lobes frontaux s'ils sont présents) avec la mention de leur comportement rhéologique (cf. chap. 6) et l'indication de l'âge de ces dépôts (Strunk 1995, Fournier 2001). Ces lacunes montrent que ce phénomène complexe est mal défini dans le milieu alpin.

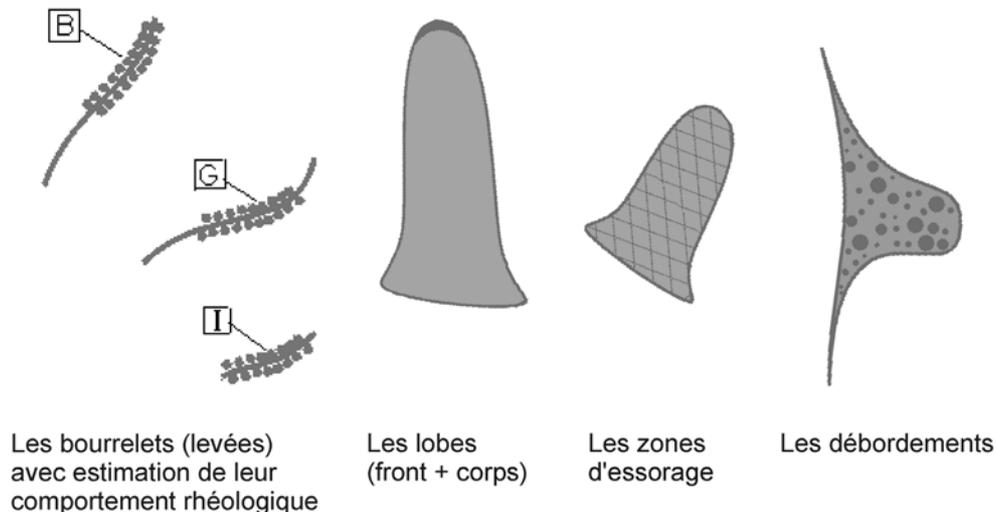


Figure 1-4: Éléments minimums de la légende concernant le phénomène lave torrentielle. Sur la carte, ils doivent apparaître en rose. Les lettres B, G, I, se rapportent respectivement aux comportements boueux, granulaire et indéterminé (cf. chap. 6). Les dépôts de laves torrentielles au comportement fluide sont indiqués sur les dépôts (lobes) par un F.

1.2. Spécificité du travail

L'Etat du Valais et la Planat, qui ont soutenu financièrement ce travail, avaient la volonté de faire un transfert de technologie de la recherche fondamentale vers la pratique de l'ingénieur. Ceci m'a poussé à limiter le niveau de détail au bénéfice de la généralisation des résultats.

1.2.1. Multidisciplinarité de l'étude des laves torrentielles

Pour commencer, l'étude des laves torrentielles nécessite l'établissement d'une image aussi juste que possible du bassin versant. Cette image est établie après une description naturaliste de l'ensemble du territoire concerné (cf. figure 1-5). Cette image sert à établir une zonation des points de déclenchements potentiels. Ces derniers sont ensuite analysés dans une optique de mécanique des sols (au sens large). Cela nécessite de savoir combien d'eau est disponible dans les zones de déclenchement préférentiel.

Une fois la lave torrentielle en mouvement, ce sont les spécialistes de la dynamique des écoulements qui prennent le relais de l'étude. Ce sont eux qui déterminent dans quelles conditions il y a débordement et si débordement il y a, quelle est sa portée.

La partie de l'étude portant directement sur les laves torrentielles s'arrête ici. Les résultats sont fournis aux personnes s'occupant de l'aménagement du territoire pour qui les la-

ves torrentielles sont un intrant parmi d'autres (avalanches, chute de blocs, etc.) dans la réalisation des cartes de dangers. Suite à la confection de ces cartes, des ouvrages devront peut-être être construits. Ils solliciteront à nouveau les spécialistes de la dynamique de l'écoulement pour obtenir les données de base pour le dimensionnement des ouvrages.

En bout de chaîne, comme le risque zéro n'existe pas, on trouve les personnes qui gèrent les éventuels risques résiduels. Pour eux une bonne connaissance des amplitudes possibles du phénomène est primordiale.

Parallèlement à toutes ces études sectorielles, l'établissement d'un système d'information géographique est nécessaire. Il servira à stocker et à hiérarchiser l'information, qui pourra ainsi être mise à disposition des divers spécialistes durant l'étude. Ce système pourra ensuite être transformé en un outil de gestion.

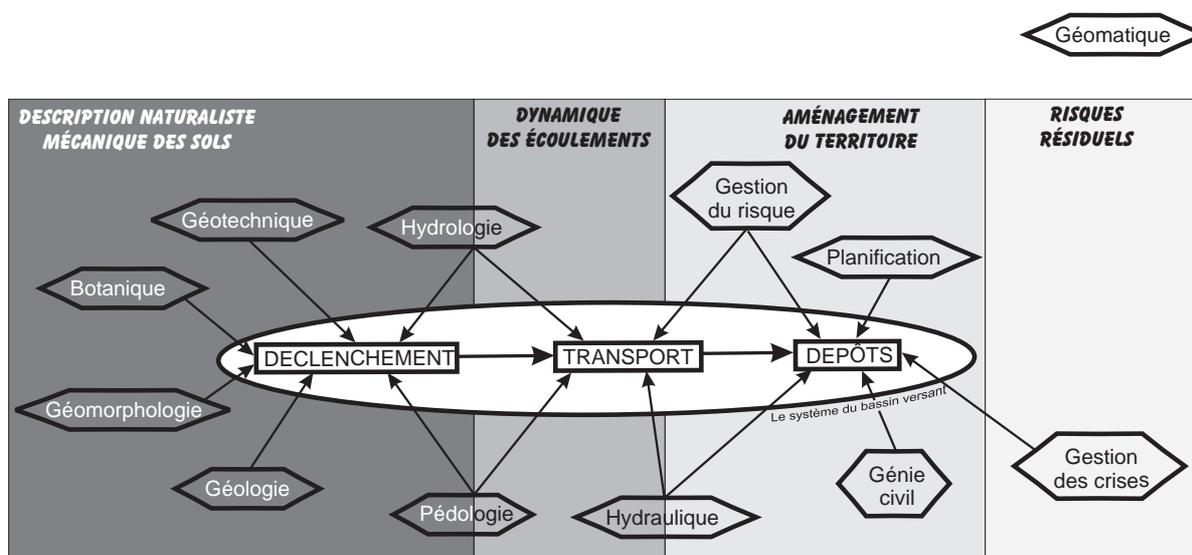


Figure 1-5: Aperçu des divers domaines impliqués dans l'étude des laves torrentielles.

Comme on peut le voir, il est essentiel que l'information puisse circuler pour que la valeur d'une étude d'un bassin à lave torrentielle puisse être maintenue de bout en bout. Par expérience, ce transfert d'information n'est pas aussi facile. Chaque domaine a son jargon, ses déformations professionnelles. Un effort de normalisation et la création de passerelles devront être entrepris dans le futur. Ce travail essaie de faire un premier pas dans ce sens en donnant une définition des laves torrentielles basée sur une nouvelle classification des mouvements de masse (chapitre 2) et en proposant diverses passerelles inter-domaines.

1.2.2. Représentativité spatiale

Le territoire étudié se limite aux frontières du canton du Valais (cf. figure 2-11 et chap. 4). Cependant les **domaines paléogéographiques** présents permettent d'étendre la validité des résultats à une grande partie des Alpes européennes. Cependant, s'il existe des différences parfois notables avec d'autres massifs montagneux, les résultats obtenus restent valables dans une première approche.

A cette évidence géographique, j'ai essayé d'introduire une partie de mon expérience acquise en parcourant le reste des Alpes (France, Italie, Autriche), la chaîne des Tatras et

les massifs d'Asie centrale (Karakoram, Pamir). Dans une moindre mesure, j'ai essayé de voir quelles similitudes pouvaient exister avec des zones volcaniques (Sicile, Tenerife, Arc Indonésien). Les différences que j'ai pu constater dans ces divers massifs ont été riches d'enseignement et m'ont permis de faire ressortir les points communs.

1.2.3. Le problème d'échelle

Le travail s'articulera autour de deux échelles : l'échelle du bassin versant (échelle spatio-temporelle en kilomètres et en années) et l'échelle des constituants (échelle en millimètres et en secondes). Je rends le lecteur attentif à ce saut d'échelle qui implique un niveau de détail différent. De plus, les outils utilisés montreront que l'étude des laves torrentielles doit souvent se faire à une échelle plus détaillée que celle d'une étude hydrologique classique.

1.2.4. Phénomène naturel et temporalité

La gageure de ce travail a été de concilier la forte variabilité naturelle avec des essais relativement pointus. Si les résultats quantitatifs peuvent être remis en cause, il faut être conscient que lors d'une modélisation de la Nature, des résultats qui s'écartent de $\pm 10\%$ de la réalité sont jugés bons, et que des écarts de $\pm 20\%$ sont acceptables.

D'autre part, les laves torrentielles sont des phénomènes relativement rares en un point donné, et l'intérêt vis à vis des dangers naturels n'a crû au XX^{ème} siècle que parallèlement à l'urbanisation. Il existe donc peu de données chiffrées. Le recul et la connaissance par rapport au danger lié aux laves torrentielles sont faibles. Actuellement la réponse vis à vis de ce danger se fait au cas par cas, en parant au plus pressé. Les chercheurs sont donc pour l'instant relativement mal fournis en données utilisables.

1.2.5. Sources des informations de base

L'une des difficultés de ce travail a été d'essayer de traduire des observations de grandeurs difficilement quantifiables en outils quantitatifs utilisables. Ces outils se basent sur des observations directes de laves torrentielles résumées dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1: Observations directes de laves torrentielles en mouvement

Lieu	Nombre d'événements observés
Val de Morgins	1
Illgraben	4
Karakoram	3
total	8

Ces observations m'ont permis de déterminer les séquences d'un événement, l'utilité des modèles rhéologiques, ainsi que les interactions entre une lave torrentielle et les ouvrages, comme le montre la figure 1-6.



Figure 1-6: Passage du corps d'une lave torrentielle sur un barrage (Illgraben)

Une partie des informations servant de base à ce travail a été obtenues par l'analyse de traces fraîches (< 48 heures après l'événement) qui sont données dans le tableau 1.2.

Tableau 1.2: Torrents où les traces d'événements récents ont été analysées

Lieu	Nombre d'événements observés
Altebach, octobre 2000	1
Anzère, torrent de Vernet, mai 1999	1
Bieudron, anthropique, décembre 2000	1
val Ferret, Batsoule, juillet 1999, juillet 2000	2
val Ferret, torrent de La Fouly, juillet 2000	1
val Ferret, torrent Idrou, juin 1999	2
Fully, anthropique, octobre 2000	1
Grimentz, torrent des Marais, mai 1999	1
Illgraben, plusieurs rigoles	13
Rufibach, juillet 1998, août 2000	2
Täschbach, juin 2001	1
Verbier, octobre 2000, juin 2001	2

C'est sur l'analyse de ces traces que se base la réflexion portée sur la rhéologie des laves torrentielles. Les traces fraîches ont ainsi pu être comparées avec des essais en laboratoire (cf. figure 1-7)



Figure 1-7: Prélèvement dans un dépôt frais (encore mou) dans l'Ilgraben (photo M. Sartori).

Une autre part des informations provient de l'observation de mini-laves torrentielles déclenchées artificiellement (cf. tableau 1.3 et figure 1-8)

Tableau 1.3: Observation de mini-laves torrentielles déclenchées artificiellement

Lieu	Nombre	Source
Propres essais	14	
Essai dans la goulotte de l'USGS (video)	4	Iverson, 1997, USGS



Figure 1-8: Mini-lave torrentielle déclenchée artificiellement dans l'Ilgraben.

Je recommande de même à toutes les personnes qui débutent dans l'étude des laves torrentielles de visionner les films mentionnés au tableau 1.4 car ils permettent de se faire une bonne idée de ce qu'est une lave torrentielle.

Tableau 1.4: Films montrant des laves torrentielles

Lieu	nb.	Source
Video de l'Illgraben (WSL)	8	Rickenmann D. 2000 - ...
Video du Schipfenbach (WSL)	1	Rickenmann D. 2000
Video du Dorfbach (WSL)		Rickenmann D. 2000
Torrent d'Acquabona	1	Berti M. 1997
Ravine de Jiang Gia (Chine)	1	Coussot Ph, 1997
Maurienne, divers torrents	7	Coussot Ph. 1996, Les laves torrentielles, CEMAGREF
Toutle River (USA)	1	Emission E = M6 juin 2001
Japon	1	Emission E = M6 juin 2001
Japon	1	DPRI, Kyoto
Torrent du Prêcheur	1	Ancey Ch., CEMAGREF
Ritigraben	1	Zimmermann M., GEO 7, Bern

Parallèlement à ces observations une base de données photographiques (1655 images en septembre 2001) a été réalisée. Elle a permis d'alimenter cette thèse en illustrations et de créer un lien aussi étroit que possible avec la réalité (cf. figure 1-9).

Figure 1-9: Bassin versant de l'Illgraben (partie facilement érodable).



1.3. Structure du document

1.3.1. Plan de travail

Le plan de travail a été construit avec un effet zoom. Il est constitué de quatre parties :

- Une partie introductive qui rappelle et affine les connaissances de base nécessaires. Elle propose une nouvelle classification des mouvements de masses permettant une définition plus précise des laves torrentielles (chap. 1 et 2).
- Une partie qui ausculte les paramètres influençant les laves torrentielles à l'échelle régionale - météorologie - et à l'échelle du bassin versant - hydrologie, géomorphologie et géologie (chap. 3 et 4).
- Une partie visant à estimer les caractéristiques des laves torrentielles elles-mêmes, en particulier leur comportement rhéologique (chap. 5 et 6).
- La méthodologie de diagnostic incorporera les outils développés dans les chapitres précédents (chap. 7).

1.3.2. Guide de lecture

Le graphisme suivant a été adopté. Les mots (ou groupe de mots, max. 3 mots) en caractère gras, sont expliqués dans un glossaire en fin de travail (annexe 13). Les phrases en caractère gras sont celle qui ont une importance particulière.

Enfin les mots en italiques sont des mots en langue étrangère (principalement allemand et anglais) qui souvent permettent d'exprimer une nuance supplémentaire.

"Les chercheurs sont plus motivés par la recherche que par l'application de leurs découvertes. Il y a une quête de l'élévation qui n'a pas besoin de justification. C'est la nature humaine..."

Gérard d'Aboville

Chapitre 2

Le phénomène lave torrentielle

2.1. Introduction

Ce chapitre est dédié aux définitions nécessaires à l'étude des laves torrentielles. Vu la complexité de ce phénomène, des connaissances pointues dans plusieurs domaines scientifiques sont nécessaires. Afin d'intégrer ces connaissances en un tout, des passerelles entre ces divers domaines sont nécessaires.

Cette phase descriptive s'est avérée incontournable pour partir sur des bases précises et robustes. En effet, durant les trois dernières années, les contacts que j'ai eu avec les divers spécialistes des domaines abordés montrent clairement qu'il manquait une définition univoque et commune du phénomène. Parfois le phénomène lave torrentielle était bien identifié, mais l'appréciation de sa physique restait lacunaire. D'autres fois le phénomène lave torrentielle était mal identifié. Des moyens inadéquats étaient alors utilisés pour les étudier. Ce constat m'a poussé à porter une attention particulière à la définition du mouvement. Pour y arriver deux étapes ont été nécessaires.

Une première étape a consisté à définir les laves torrentielles au niveau de leurs composantes et de leur phénoménologie. Cette définition a été complétée par une description de l'environnement des laves torrentielles.

Ensuite une revue des différentes classifications existantes a été faite. L'analyse des problèmes résultant de ces classifications a permis les réflexions nécessaires pour une amélioration.

Enfin, une proposition de classification, ayant pour but de lier les laves torrentielles à un concept univoque, a été réalisée. La première partie donne un arbre de classement qui replace les laves torrentielles parmi les autres phénomènes de transport de masse. Cela permet de montrer certaines ressemblances avec d'autres phénomènes, comme les écoulements de débris sous-marins, les avalanches et les laves volcaniques. La deuxième partie est une classification des laves torrentielles elles-mêmes, ce qui permet d'intégrer la variabilité naturelle dans la définition.

2.1.1. La terminologie

La première apparition du terme de lave pour définir le type de mouvement de tels phénomènes date du XIX^{ème} siècle. C'est Lechalias (1884) qui l'utilisa, associé à l'adjectif boueux, pour définir une lave torrentielle. Le dessin des dépôts qu'il a observés ne laisse aucun doute. Le terme torrentielle a été ajouté par la suite pour indiquer le lien qui existait avec le réseau hydrographique.

Il existe une quantité de termes vernaculaires, dont certains sont cités dans Blijenberg (1998), ou Innes (1987). Chaque vallée, chaque dialecte a son propre terme pour définir les laves torrentielles. Dans le val d'Hérens, par exemple, on parle de *rougne*. Ce qui n'est pas sans rappeler *Runse* en dialecte germanique, majoritaire autrefois dans cette région. Un petit répertoire de termes utilisés dans le monde se trouve à l'annexe 1.

Pour des raisons historiques, il est très difficile de traduire le concept rattaché aux laves torrentielles dans d'autres langues. En allemand toutefois, une bonne correspondance existe avec le terme *Murgang*.

En anglais, la traduction pose plus de problèmes. Le terme adopté dans ce travail est celui de *debris flow*. Comme il définit une gamme de phénomènes plus étendue que les seules laves torrentielles, quelques mises en garde sont nécessaires (cf. annexe 1). Un troisième terme d'origine indonésienne a une importance particulière. C'est celui de **lahars**. Ce sont des laves torrentielles composées majoritairement de matière fine et au comportement très fluide. Cette fluidité est à l'origine d'une classe d'écoulement particulière (cf. § 6.2.1).

Dans le grand public aujourd'hui, on parle plutôt de coulée de boue. Ce terme a été associé, dans le domaine spécialisé, au déclenchement d'une coulée sur un versant sans préexistence d'une rigole. Cette distinction se retrouve dans toutes les langues de l'arc alpin. Par exemple, en allemand, c'est le terme *Hangmur* qui traduit ces écoulements particuliers qui se produisent dans la pente (d'autres traductions sont données à l'annexe 1). Il n'existe cependant que peu de différence de mécanisme avec les laves torrentielles. Il ne sera fait référence à cette distinction que lorsqu'on abordera la question de l'analyse fonctionnelle d'un bassin versant (cf. § 7.4.3.5) et de la classification des laves torrentielles au paragraphe 2.5.1.

2.2. Descriptions des laves torrentielles

La description suivante donne une image générale des laves torrentielles dans le milieu alpin. Des exceptions existent et ce caractère général n'est pas valable dans d'autres environnements (Chine par exemple). Comme certains outils utilisés pour mitiger le danger dû aux laves torrentielles ne sont valables que pour ces phénomènes, il est nécessaire d'avoir une vision qui permette d'éviter toute confusion.

Les termes et définitions qui suivent sont ceux dont l'acceptation est la plus générale. En cas de différence avec d'autres travaux, ce sont ceux qui font référence dans le reste de ce travail.

2.2.1. Les composantes d'une lave torrentielle

A première vue une lave torrentielle se présente comme une pâte parsemée d'éléments rocheux (grains). A l'échelle macroscopique (soit la vision d'un homme à pied), cette pâte se comporte comme un fluide homogène, cinématiquement monophasique et qui se déforme de façon continue. Les trois composantes de base sont :

- l'eau.
- les particules rocheuses fines (définie ici comme la fraction $< 400 \mu\text{m}$).
- les particules rocheuses grossières (éléments grossiers dans figure 2-1).

La taille des deux composantes minérales couvre tout le spectre granulométrique entre les argiles minéralogiques ($2 \mu\text{m}$) et les blocs ($>1\text{m}$). Il n'existe actuellement pas de définition univoque de la plage granulométrique dédiée aux particules fines. Toutefois on peut dire qu'elles forment la **matrice** de la pâte. Ce thème sera repris plus en détail dans le chapitre 6. La figure 2-1 montre que seul le mélange d'une plage restreinte de ces trois composantes permet de former une lave torrentielle (surface foncée au centre du diagramme).

A ma connaissance une seule étude a été menée sur la présence de bulles d'air dans la masse en mouvement. Elle fait état d'une teneur d'environ 2 % en air (Jan et al. 2000). Les forces rencontrées sont telles qu'on négligera les effets d'éventuelles bulles d'air dans le mélange, même si celles-ci semblent avoir une influence sur le **seuil de contrainte**.

Parfois des éléments végétaux peuvent avoir une influence non négligeable sur l'ensemble. Certains auteurs incluent la matière organique dans les éléments de base des laves torrentielles. Hungr (1987) affirme qu'elle peut se retrouver en pourcentage élevé, atteignant jusqu'à 6 %. Des événements atteignant de telles teneurs en matière organique sont formés majoritairement de troncs. Des écoulements de ce type ont été observés durant cette étude. Par exemple, en juillet 2000, dans l'Ilgraben, un front formé uniquement d'arbustes précédait une petite lave torrentielle. La présence de végétaux inclus dans une lave torrentielle permet le cas échéant de dater l'événement (Fournier 2001). Cependant, si certaines similitudes existent, la forme et la densité de ces éléments ne peuvent être assimilées à celles des blocs rocheux. Dans la suite de cette étude, de tels événements seront considérés comme relevant d'une autre problématique¹.

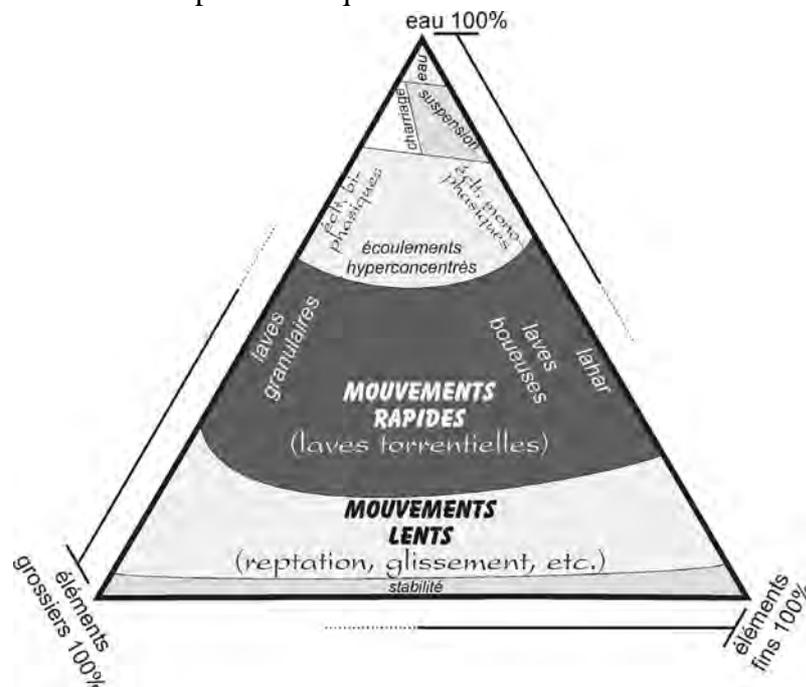


Figure 2-1: Diagramme conceptuel (échelle non linéaire !) représentant le mélange adéquat, entre les éléments fins, les éléments grossiers et l'eau, pour obtenir une lave torrentielle, représentée par la zone foncée (adapté de Davies 1988, Meunier 1991 et Coussot et Meunier 1996).

1. Cette problématique des bois flottants est par ailleurs bien décrite dans Rickenmann (1997a), ou Hartlieb et Bezzola (2000).

2.2.2. Les entités fonctionnelles d'une lave torrentielle

Dans la plupart des cas, on peut diviser une lave torrentielle en quatre entités fonctionnelles distinctes. Chacune d'entre elles est définie par la prépondérance de l'un ou l'autre des éléments de base. L'agencement de ces éléments est schématisé à la figure 2-2. Il s'agit :

- du **front** où la présence d'éléments grossiers est prépondérante. Cependant il peut exister des cas où ces éléments sont absents du front. Lors de l'analyse de terrain, les traces laissées par le front sont représentatives de la plus grande section d'écoulement (dans les tronçons rectilignes).
- du **corps** où aucun des divers composants ne prédomine, le mélange est alors relativement homogène. C'est le corps qui est majoritairement responsable de la création du volume de l'événement.
- des **bourrelets latéraux** (appelés aussi **levées**), dont la composition ressemble à celle du front, et qui se déposent parallèlement à l'axe de la coulée. Les observations que j'ai pu faire durant ce travail montrent que ces bourrelets se forment en partie par perte des grains grossiers par le front. Ce sont les dépôts les plus courants dans les Alpes.
- de la **queue** qui n'est plus, rhéologiquement parlant, un écoulement de lave torrentielle, mais plutôt un **écoulement hyperconcentré**. Elle érode souvent les derniers dépôts qui ont été faits par le corps. Cette capacité d'érosion du lit peut parfois être causée par le corps et créer des surfaces d'érosion très importantes (cf. tableau 2-2). La zone bordée par un trait plein sur la figure 2-6 montre la partie du chenal érodée par la queue d'une lave torrentielle.

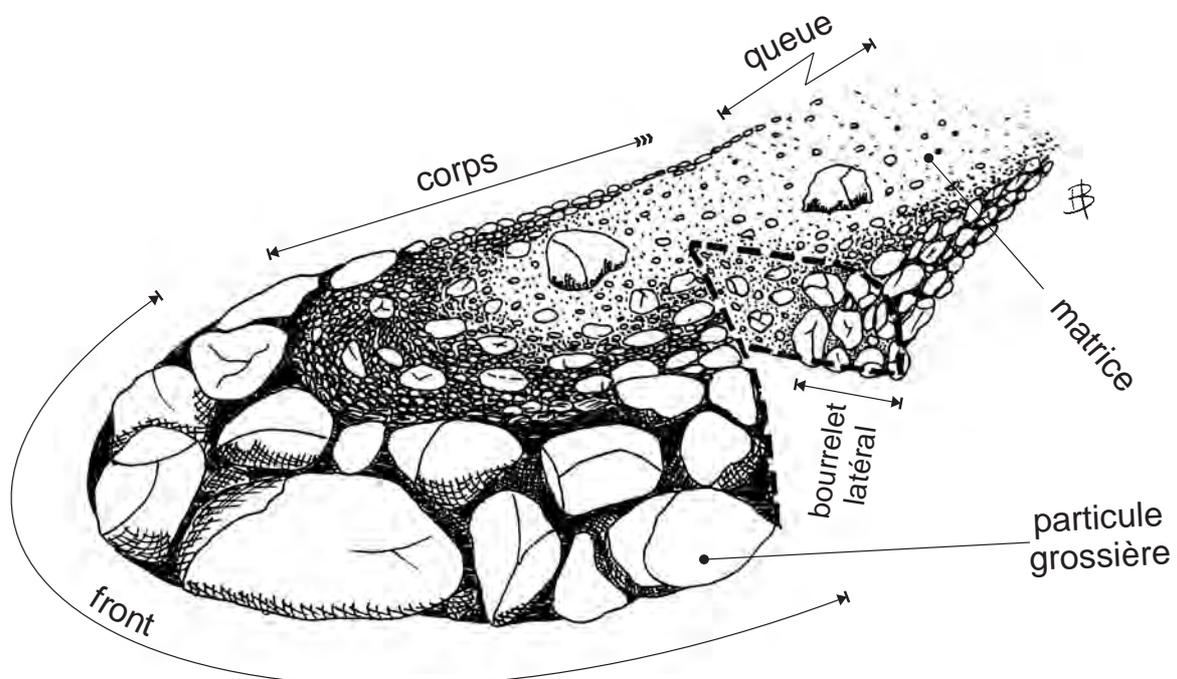


Figure 2-2: Les entités fonctionnelles d'une lave torrentielle.

2.2.3. Quelques grandeurs caractéristiques

En analysant laves torrentielles survenues dans divers régions montagneuses du globe (Dolomites, Alpes suisses, françaises et japonaises, Tien-Shan, Pamir) on constate que :

- les valeurs de densité du mélange et de concentration solide semblent être relativement peu variables par rapport à la taille de l'événement. Le tableau 2-1 souligne les valeurs élevées de ces paramètres. Par exemple la densité du mélange vaut en moyenne 2300 kg/m³. De même les valeurs de concentrations solides sont aussi très élevées, elles correspondent à des valeurs de teneur en eau (massique) proches de 10 %. Cela place les laves torrentielles bien au delà des valeurs représentatives des écoulements hyperconcentrés (teneur en eau d'environ 40%).

Tableau 2-1: Valeurs typiques de concentration solide et de densité du mélange pour les laves torrentielles.

	maximum	minimum	moyenne	écart-type %
Concentration solide ^a [% _{vol}]	80	77	78	-
Densité ^b [kg/m ³]	2'500	1'980	2290	8

^a) Peu de données existent pour cette valeur pourtant primordiale; les quatres cas utilisés ici (propres données et Genevois et al. 1999) ne représentent pas un échantillonnage représentatif.

^b) Les données proviennent de Arattano & Marchi 2000, Coussot 1996, Genevois et al. 1999, Khagai et al. 1999, Rickenmann 2001a, Haeberli et al. 1992, Takahashi 1991.

- Le volume, la durée, la profondeur d'érosion sont très variables. Il est possible de différencier ces caractéristiques en fonction de la taille des événements. La connaissance des ordres de grandeur pour les événements exceptionnels, ainsi que celles des événements de moindre ampleur, est primordiale pour une bonne gestion du risque. Ces valeurs, provenant du dépouillement d'une trentaine de cas de laves torrentielles traités dans la littérature, sont présentées dans le tableau 2-2.

Tableau 2-2: Caractéristiques moyennes des laves torrentielles (données acquises pendant l'étude, Arattano & Marchi, 2000, Coussot, 1996, Genevois et al., 1999, Khagai et al., 1999, Rickenmann, 2001a, Haeberli et al., 1992, Takahashi, 1991).

	temps de retour élevé	temps de retour faible
volume [m ³]	30'000 - 200'000	1'000 - 10'000
nb. vagues [-]	1-10	1-3
vitesse [m/s]	1-15	1-7
durée du phénomène [-]	plusieurs dizaines de minutes	quelques minutes
section érodée max. [m ²]	10-3000 ^a	0 (bilan érosion-dépôt nul)
hauteur d'écoulement [m]	2-10	1-3

a) Cette valeur a été mesurée à l'Alpe di Mulinet dans les Alpes Grées lors des événements de 1993 (Tonanzi & Troisi, 1996). Une section du même ordre de grandeur a été mesurée à l'aval du village des Arcs en France (Bonnard, 2001). Elles représentent des valeurs extrêmes, mais il n'est pas rare d'observer des sections érodées de l'ordre de 100 m², comme par exemple dans le Luegelbach lors des intempéries d'octobre 2000 (cf. figure 2-3).

La connaissance de ces ordres de grandeur est importante car ils permettront par la suite de vérifier l'estimation des paramètres d'une lave torrentielle et ainsi vérifier les modèles.

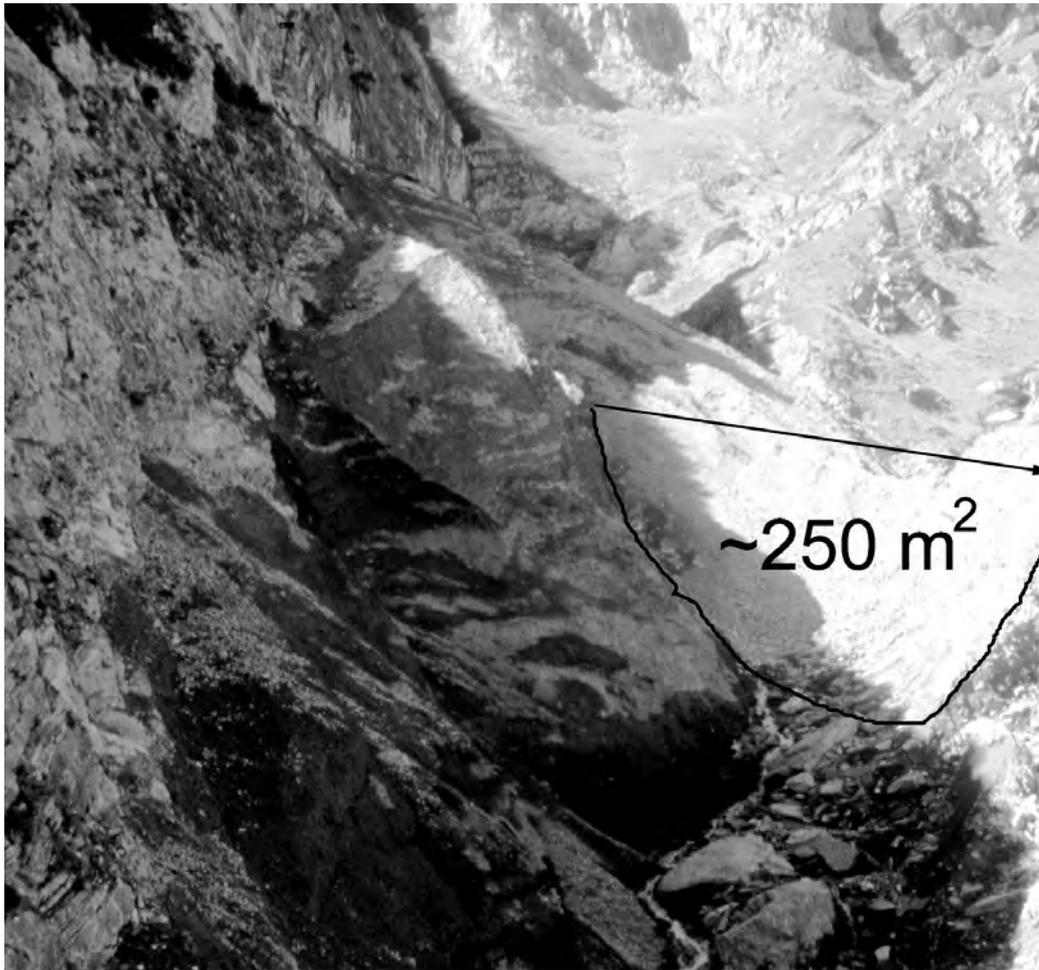


Figure 2-3: Forte érosion ponctuelle d'environ 250 m² dans le Luegelbach, Mattertal.

2.2.4. La phénoménologie des laves torrentielles

2.2.4.1. Le déclenchement

Quatre modes de déclenchement des laves torrentielles ont été répertoriés. Il s'agit :

- d'une soudaine alimentation en matériaux solides de la rigole. Cette alimentation peut provenir d'un glissement de terrain (alimentation ponctuelle), ou aussi de l'érosion des berges (alimentation linéaire).
- de l'alimentation de la rigole en matériaux solides par un processus d'érosion s'étendant à tout le bassin versant (alimentation surfacique). Ce type de déclenchement est aussi appelé lave torrentielle à genèse hydrologique (Meunier, 1991).
- d'une déstabilisation du lit (ou du fond du talweg). Cette déstabilisation est rarement la cause unique d'une lave torrentielle.
- de la rupture d'un barrage momentané sur un torrent. Ce mode de déclenchement suit un processus d'embâcle-débâcle. Si le barrage s'érode lentement, une lave torrentielle se déclenche. Si le barrage se rompt brutalement, on assiste à une déferlante (*Dammbruchwelle*) qui peut rapidement se transformer en lave torrentielle.

2.2.4.2. L'écoulement

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. Si on essaie de faire le bilan énergétique d'un tel mouvement on s'aperçoit que la dissipation d'énergie se fait par :

- des frottements visqueux
- des collisions
- la turbulence
- le passage des grains d'une lame d'écoulement à l'autre
- les frottements entre les lames d'écoulement

De plus il faut généralement dépasser un certain seuil d'énergie pour permettre la mise en mouvement de tels fluides. Malgré la prédominance d'un mode de dissipation d'énergie sur les autres et des différences dans le type d'écoulement qui en résulte, les essais conduits au chapitre 6 semblent montrer que le taux d'augmentation de la viscosité diminue parallèlement à l'augmentation du taux de déformation. Cette caractéristique est appelée la rhéofluidification. Plusieurs approches existent pour traiter ce genre de fluide (cf. chap. 6). Aucune ne permet pour l'instant une description complète du phénomène.

Les laves torrentielles sont un fluide en écoulement transitoire. Chaque **bouffée** peut être regardée comme un ensemble indépendant. Ces bouffées peuvent être la conséquence d'une alimentation en matériaux solides supplémentaires, ou de la remise en mouvement d'une lave torrentielle stagnant dans la rigole.

2.2.4.3. La déposition

L'existence d'un seuil énergétique à dépasser pour permettre l'écoulement implique la formation de dépôts tridimensionnels. Ces dépôts peuvent se présenter sous forme de lobes frontaux ou de bourrelets latéraux. Ces dépôts ne sont pas toujours visibles, soit parce que l'écoulement est resté latéralement confiné dans le lit, soit parce qu'ils ont eu lieu après l'embouchure, où ils ont été dilués, ou ont été érodés par l'émissaire.

Lors d'événement de grande ampleur, la capacité hydraulique du chenal peut être dépassée et il y a débordement. Les matériaux suivent alors les talwegs et peuvent provoquer des dégâts, soit par impacts directs, soit par alluvionnement. Le volume de ces dépôts est pris comme signe de l'intensité de l'événement (qu'il ait causé ou non des dégâts).

2.2.5. Les séquences d'écoulement

L'aperçu du déroulement d'un événement permet de comprendre comment s'articulent les différentes entités fonctionnelles d'une lave torrentielle lors d'un événement. Les écoulements de lave torrentielle que j'ai pu observer peuvent être divisés en 5 phases de durées inégales. Cette séquence est représentative d'un événement de moyenne ampleur qui ne débord pas du chenal.

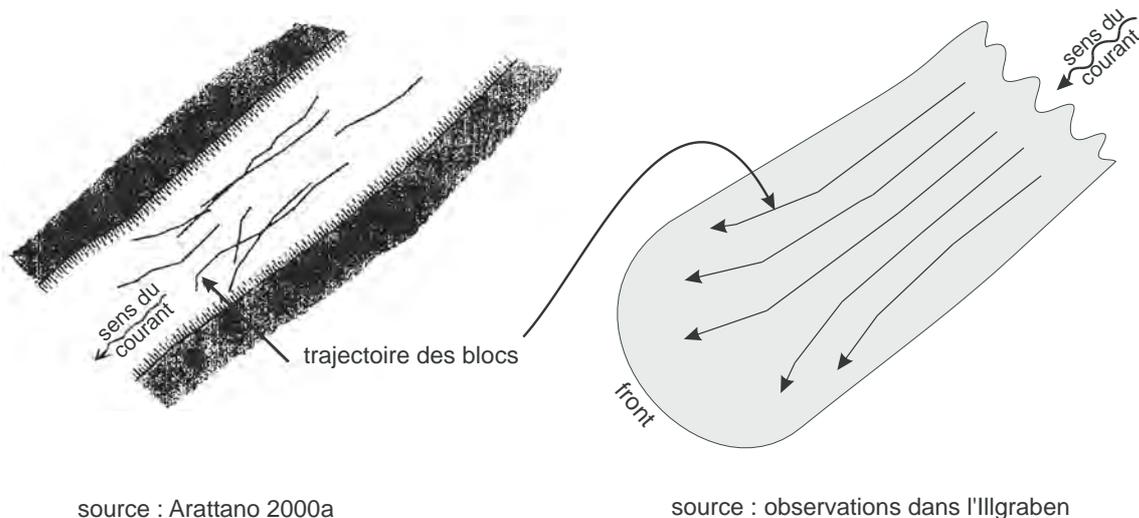
2.2.5.1. La phase pré-événement

La première phase (couple profil-plan noté A sur la figure 2-5) représente l'état avant l'arrivée de la lave torrentielle. On peut y observer, au numéro 1, le bulbe d'humectation

sous-jacent à l'écoulement (pas toujours présent). Ce profil type a été déterminé grâce à des forages dans le lit et l'observation d'écoulement dans les barbacanes de seuils. La profondeur à laquelle se développe la zone saturée n'est pas connue.

2.2.5.2. La phase frontale

Le front (couple B), composé de matériel plus grossier que le corps, apparaît (n° 3). Les gros blocs qui le composent ne sont pas entièrement baignés par la matrice. Ses caractéristiques rhéologiques sont différentes de celles du corps. La section occupée pendant le passage du front correspond à la section maximum d'écoulement. Le front est parfois accompagné de fortes turbulences créant un nuage d'embruns boueux. Cette turbulence et l'observation du mouvement des blocs en surface (cf. figure 2-4) ne montrent pas l'existence d'un écoulement **piston** (*plug flow*, Johnson et Rodine 1984). En effet les blocs sem-



source : Arattano 2000a

source : observations dans l'Illgraben

Figure 2-4: Mouvement des blocs en surface de l'écoulement dans le torrent du Moscardo (Arattano 2000a) et dans l'Illgraben (propres observations).

blent partir en éventail sans former de zone rigide au milieu de l'écoulement. De plus la forme en plan du front (cf. dessin de droite sur la figure 2-4), mesurable sur des lobes frontaux, donne à peu près la forme du profil de vitesse (Coussot 2000). Cette contradiction avec les écoulements théoriques est probablement due aux effets de bords, généralement négligés dans ces études. Le passage du front dure généralement moins de 10 secondes.

Il est parfois précédé par un pré-front (n° 2). Les **lavogrammes** de la figure 6-3, montre l'existence de ce phénomène. Le liquide qui forme le pré-front a l'allure d'un écoulement hyperconcentré; il pourrait provenir soit d'un essorage du corps à travers le front, soit d'une chasse du liquide interstitiel du lit due à la surcharge provoquée par la lave torrentielle. Cette deuxième hypothèse est corroborée avec les essais en canal expérimental mené par Tognacca (1999). Le pré-front semble être une caractéristique commune des laves torrentielles, même s'il n'est pas toujours bien observable.

2.2.5.3. La phase principale

Le corps (couple C) s'écoule le plus souvent pendant plusieurs dizaines de minutes. Cependant dans des torrents particuliers, cet écoulement peut durer plus d'une heure. C'est durant cette phase que la part la plus importante du volume de la lave torrentielle se constitue. On ne sait pas comment évolue la zone saturée durant cette phase (n° 4). La masse du corps (n° 5) est constituée d'un mélange eau-fine-granulats. Sur les bords du chenal, des

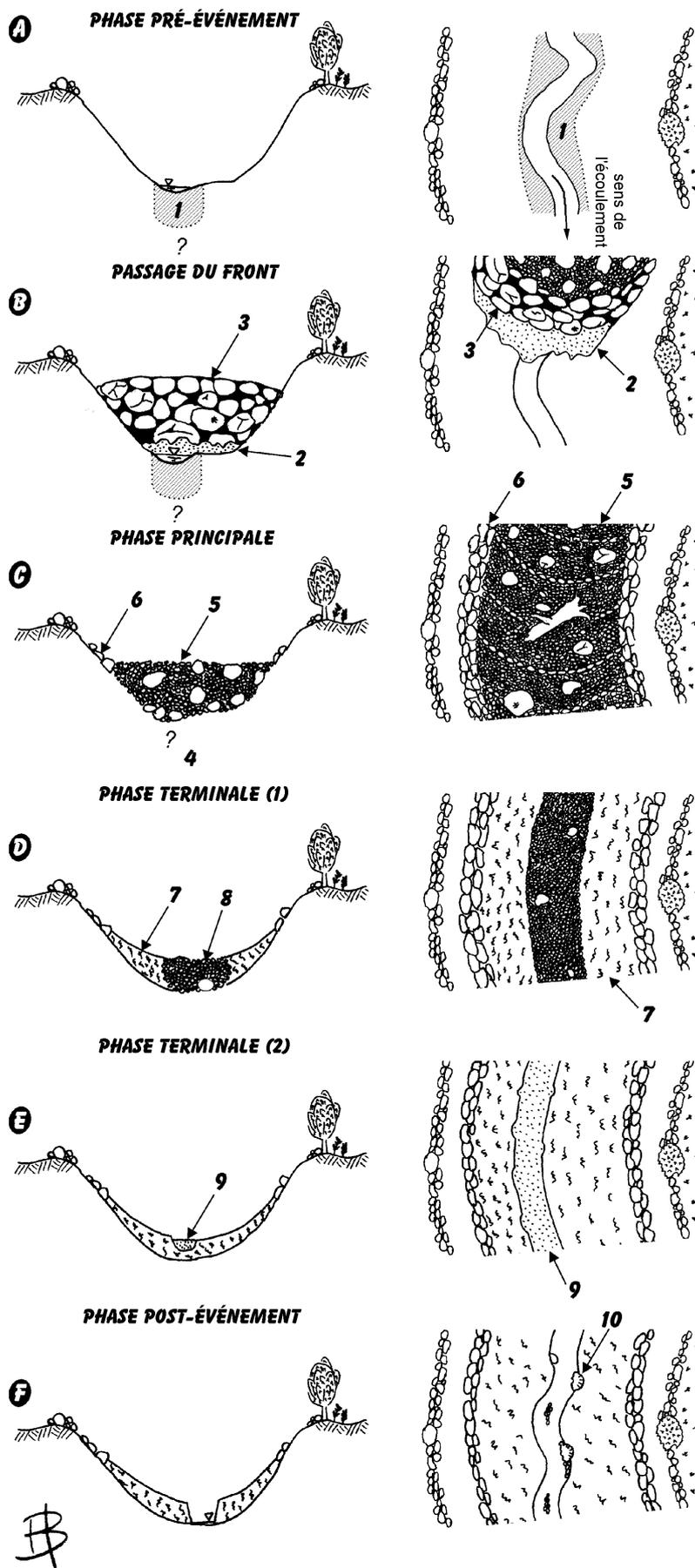


Figure 2-5: Description des différentes phases d'une lave torrentielle en un point donné du lit.

traces du passage du front sont visibles (n° 6). Si la lave torrentielle passe sur une zone plane (ou déborde), ces traces, augmentées par des matériaux du corps, formeront les levées.

2.2.5.4. La phase terminale

La queue de la lave torrentielle fait suite au corps (couple D). L'écoulement perd de sa puissance et une partie de la section est occupée par du matériel déposé (n° 7). La partie encore en écoulement est plus fluide que le corps et n'est déjà plus capable de transporter les gros blocs qu'en les roulant sur le fond (n° 8). Si l'événement est dû à de fortes pluies ou qu'il s'est déroulé dans un torrent à débit permanent, la queue devient toujours plus fluide pour devenir un écoulement hydraulique fortement chargé (couple E). Elle s'écoule sur les matériaux déposés par le corps (n°9).

2.2.5.5. La phase post-événement

Pour finir (couple F), l'écoulement de la décrue érode les dépôts faits précédemment. Cela se fait principalement par de petites érosions de berges à l'extérieur des méandres (n° 10). Ceux-ci s'amplifient et finissent par balayer une section relativement large. Généralement des levées sont visibles sur les côtés. Dans le cas d'un chenal sans écoulement permanent, il est possible d'observer des lobes complets.

Lors d'événements d'ampleur exceptionnelle, le lit peut fortement se creuser (parfois sur plusieurs mètres), posant ainsi un problème de stabilité des berges et de déchaussement des ouvrages. On ne sait pas comment et pourquoi ce processus de surcreusement apparaît. Cependant l'hypothèse suivante peut être formulée : suite à des apports en eau importants (pluie de longue durée), la zone saturée s'étend au lit et aux berges, rendant ainsi possible la liquéfaction des sédiments les composant. En effet, certaines laves torrentielles qui se forment lors d'orages (courte durée) ou par la fonte des neiges (source ponctuelle, sols encaissants non saturés) glissent sur les parois du chenal sans provoquer d'érosion notable du chenal. L'érosion du lit doit donc être due à la capacité de résistance des sédiments du chenal, ainsi qu'à l'amplitude de l'effort érosif (taille de la lave).

On observe souvent l'apparition de plusieurs fronts¹ pour un événement de lave torrentielle. Chaque ensemble front, corps, est alors appelé **bouffée**. L'apparition du phénomène par bouffées successives détermine le caractère **transitoire** des laves torrentielles. Il est possible de définir pour chaque bouffée des caractéristiques propres, telles que la vitesse, le volume, la hauteur d'écoulement, la densité globale du mélange, etc. Ces caractéristiques sont les diverses données par lesquelles on exprime l'**intensité**² du phénomène, qui est l'un des deux critères de base pour l'estimation du **degré de danger**.

-
1. Le front est à chaque fois associé avec un corps et des bourrelets latéraux, mais pas forcément séparé de la bouffée suivante par une queue.
 2. Il n'existe pas de définition claire de ce qui forme l'intensité d'une lave torrentielle. Les recommandations fédérales ne prennent en compte que la vitesse et la hauteur d'écoulement (Loat et Petraschek 1997).

2.3. L'environnement des laves torrentielles

2.3.1. La relation entre les laves torrentielles et le bassin versant

Les laves torrentielles sont généralement liées à une **rigole** (ou à un **chenal**). Le profil en "U" de cette rigole est caractéristique (cf. figure 2-6). C'est un bon indice de l'activité d'un torrent. Vu la forte capacité érosive d'une lave torrentielle, la préexistence d'une rigole n'est pas un élément absolument nécessaire. En effet dans les voiles d'éboulis, il n'est pas rare de voir des laves torrentielles qui ont creusé leur propre rigole. De même lors d'événements de taille exceptionnelle, on a pu voir des laves torrentielles quitter la rigole préexistante pour se tailler un nouveau chenal. Ce fut le cas à Fully lors des intempéries d'octobre 2000.

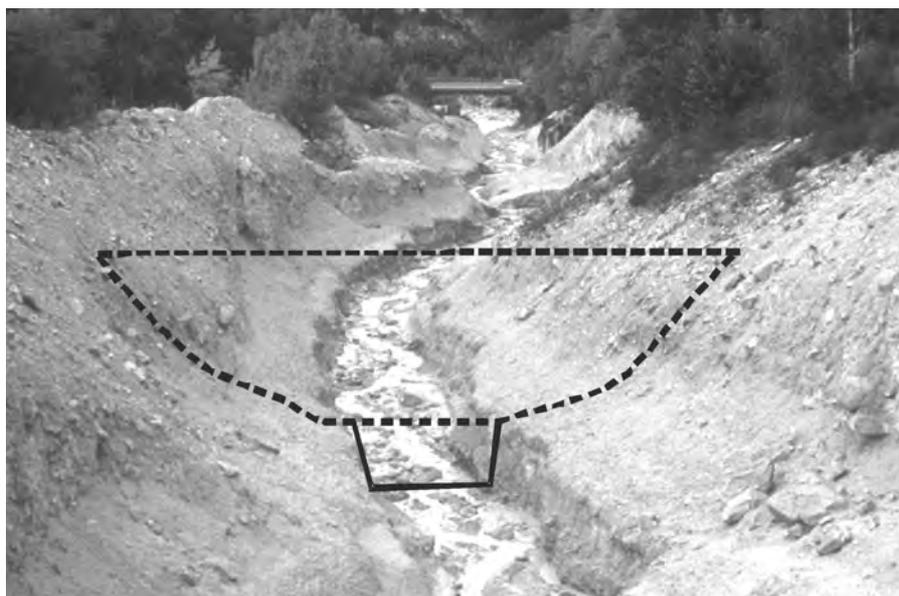


Figure 2-6: Chenal d'écoulement avec un profil en "U" typique d'un torrent à lave torrentielle. La partie érodée en fin d'événement est délimitée par le trait plein. La zone pointillée représente la section maximum d'écoulement de l'événement le plus récent (Illgraben).

Le système du bassin versant est subdivisé en trois zones : la zone de production, la zone de transport et la zone de dépôt. Il est très rare de pouvoir observer un tronçon où l'on puisse affirmer qu'il n'y a eu que du transport. C'est le cas pour quelques biefs qui ont creusé leur chemin dans des roches cohérentes (par exemple certains torrents du Matternal). Le plus souvent on observe une concomitance de la zone de transport et des zones érodables (donc de déclenchement), ou des zones de dépôts ou de débordement comme le montre la figure 2-7.

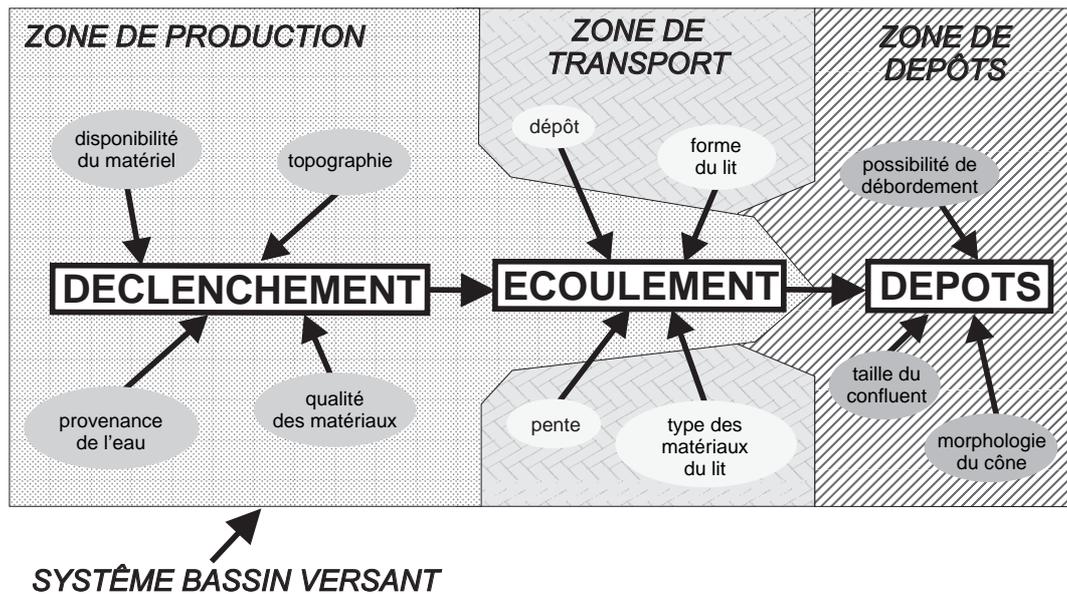


Figure 2-7: Le système bassin versant subdivisé en trois zones. Les différents facteurs qui ont une influence sur chaque zone sont soulignés par des ellipses. Pour simplifier il n'est pas fait mention des interdépendances entre les facteurs (Bardou, 1995).

Dans la figure 2-7 les facteurs les plus importants agissant sur la dynamique d'une des zones sont représentés. La réalité est pourtant plus complexe que ne le montre le schéma ci-dessus. En effet tous ces facteurs ont une influence non seulement sur les différentes zones du système, mais aussi sur les autres facteurs. Ils sont interdépendants. Par exemple, dans la zone de déclenchement, la topographie a un effet sur la disponibilité du matériel et inversement.

2.3.2. Les prédispositions du bassin versant

Suite à l'analyse de plusieurs événements une interrogation a vu le jour : pourquoi sur un même bassin versant une même pluie provoque-t-elle des réactions différentes ? De même pourquoi certains bassins versants réagissent avec moins de vigueur en recevant des pluies plus intenses ? Ces questions ont amené les chercheurs à définir des bassins versants plus ou moins prédisposés à produire des laves torrentielles. Poursuivant leurs recherches ils ont été amenés à définir un "système lave torrentielle".

Ce système met en balance les diverses prédispositions d'un bassin versant avec les facteurs potentiellement dégradants. Ces divers éléments donnent l'état du système. Lorsque les facteurs dégradants atteignent un niveau supérieure à la résistance offerte par les prédispositions, l'équilibre est rompu. On assiste alors à un déclenchement de lave torrentielle. Les facteurs dégradants deviennent des événements déclenchants. Les éléments du système sont :

- une **prédisposition de base** constante dans le temps (comme par exemple la géologie, ou la topographie). L'échelle de temps est ici le siècle et il est évident que les prédispositions de base ne sont pas constantes *stricto-sensu*. Elles subissent des phases de stabilité entrecoupées par des événements cataclysmiques comme le décrit Schumm (1977), par exemple un éboulement qui modifie la topographie du chenal et lui fournit des matériaux mobilisables en quantité plus importante. Dans le graphique ci-dessous, cet événement est représenté par le saut des prédispositions de base.

- une **prédisposition variable** qui décrit principalement la disponibilité des matériaux meubles. Dans ce cas l'échelle de temps est le mois. Comme pour les prédispositions de base, il n'est pas possible de quantifier cette valeur. Tout au plus on peut imaginer un indice de prédisposition.
- Les facteurs dégradants sont représentés par tous les effets perturbateurs de l'équilibre du système. Parmi ces facteurs dégradants citons la pluie, la température, le niveau des nappes phréatiques, etc. L'échelle de temps est ici beaucoup plus petite, allant du jour à la dizaine de minutes.

La figure 2-8 donne une illustration qualitative de cette mise en balance de l'état d'équilibre du bassin versant.

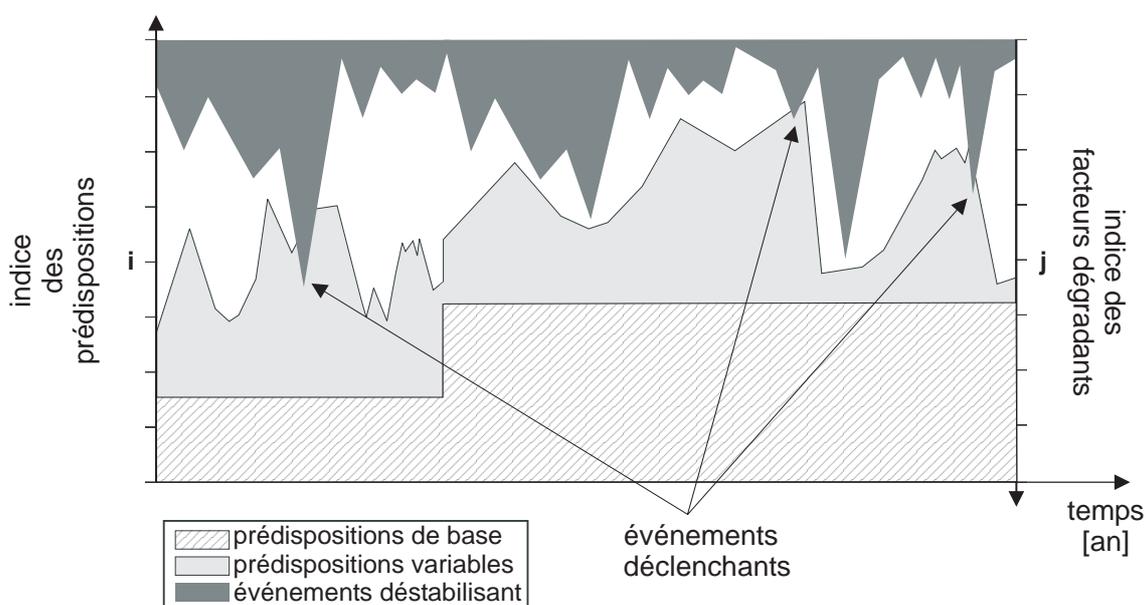


Figure 2-8: Illustration qualitative de la relation entre les prédispositions du bassin versant et les facteurs dégradants. Le saut dans l'indice des prédispositions de base peut être dû par exemple à un éboulement (adapté de Zimmermann et al. 1997).

2.3.3. Le contexte géographique

Cette étude a eu pour cadre le territoire du canton du Valais (cf. figure 2-9). Le paysage, indissociable des éléments qui le composent, est celui des nappes tectoniques Penniques et Helvétiques essentiellement. Cet ensemble exclut trois zones alpines fortement productrices de laves torrentielles : les terrains en zone de flysch au front nord des Alpes, les montagnes à marnes noires des Alpes du Sud et les Dolomites¹.

Des études se focalisant sur les spécificités de ces grands ensembles ont déjà été menées : pour les zones de flysch voir Lateltin et al. (1998), pour les marnes noires voir Remaître (2000) et pour les Dolomites voir Genevois et al. (1999).

Cependant le domaine des nappes Penniques est d'une grande diversité. On y retrouve des bassins versants qui se sont creusés dans des schistes-marneux, du flysch et de la dolomie, mais aussi d'autres roches jugées moins propices à la production des laves torrentielles.

1. Les nappes Austroalpines couvrant les Grisons et l'Autriche n'ont pas de caractères très différents de ceux rencontrés dans les Alpes penniques.

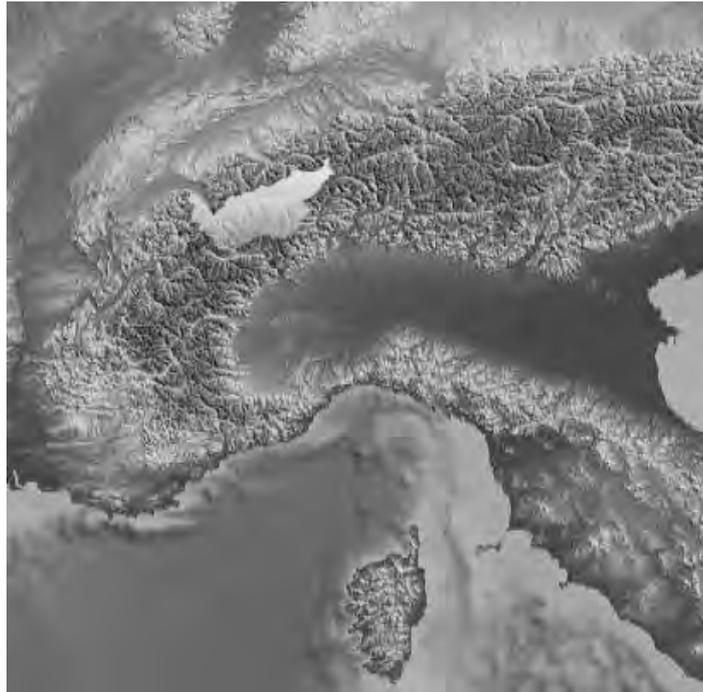


Figure 2-9: Partie occidentale de l'arc alpin. Le canton du Valais est signalé par la zone claire au centre de l'image

Morphologiquement, les bassins versants sont compris entre deux extrêmes. D'un côté, il y a les bassins versants développés dans des bancs de calcaire massif. Ils donnent des systèmes en marches d'escalier avec une pente moyenne assez forte. De l'autre côté, on trouve les bassins versants à lithologie plus variée des nappes Penniques. Ils ont tendance à former de grands versants monotones avec une pente moyenne moins soutenue.

En partant du nord-ouest et en allant vers le sud-est de la zone d'étude, on observe une augmentation de l'altitude maximale. Cette augmentation a une influence sur la vigueur des phénomènes glaciaires. A l'ouest les formes glaciaires et **périglaciaires** se trouvent la plupart sous forme de reliques, tandis que plus à l'est l'activité glaciaire est encore présente.

L'étude des paysages¹ rencontrés sur les sites étudiés a permis d'établir un portrait type des bassins versants à laves torrentielles. Un levé cartographique des éléments paysagers a été effectué sur une dizaine de bassins versants. Le tableau 2-3 présente l'analyse de la distribution de ces surfaces. Elle permet de dresser un portrait des bassins versants étudiés. Il est important de constater la forte variabilité des paramètres.

1. Notion moins rigoureuse que la géologie ou la géomorphologie, mais plus facilement compréhensible par des non spécialistes.

Tableau 2-3: Portrait type des bassins versants étudiés.

Élément paysager	moyenne % de la surface ^a	min-max % de la surface
éboulis, moraines, terrains meubles non végétalisés	29	8-41
affleurements rocheux	30	2-63
pelouses alpines, pâturages	23	7-61
forêts arbustives	15	0-40
pergélisols	45	0-81

a) Il ne s'agit ici que des éléments prépondérant de la surface. Un même m² peut appartenir à la classe moraines et à la classe pergélisol.

On trouvera à l'annexe 2 les codes correspondant à la typologie des milieux naturels de Suisse. Ce classement original est compatible avec celui développé par la Communauté européenne (typologie CORINE) et divise le paysage suisse en neuf grands milieux. Ceux-ci sont ensuite subdivisés en 39 sections (milieux naturels de caractéristiques voisines). Pour la présente étude un regroupement de 17 de ces sections a permis de définir le portrait des bassins versants étudiés (cf. annexe 2).

Pour des raisons de logistique, peu de bassins versants purement glaciaires ont été intégrés à cette étude. Les valeurs obtenues pour ce domaine ont donc un biais dû à l'échantillonnage et ne sont pas présentées ici. Toutefois la présence de glaciers a tendance à accroître le volume de matériaux mobilisables.

2.4. Les classifications existantes

Cette section est dédiée aux classifications existantes. Chacune des classifications suivantes est basée sur des critères propres et sur un niveau de détail particulier. Elles ne sont pas opposables, car elles ont des buts différents.

2.4.1. Classifications de Varnes

Parmi les classifications utilisées pour différencier les différents **mouvements de masse**, il y a celle développée par Varnes (1978) et qui a été révisée à la fin du XX^{ème} siècle (Cruden et Varnes 1996). Elle permet de décrire les laves torrentielles relativement aux autres phénomènes de pente, en combinant 5 types de mouvement (chute, glissement, basculement, étalement, écoulement) avec trois textures de matériau (roche, débris, terre). Son principe est simple (donné à l'annexe 3), ce qui en fait probablement la classification la plus répandue à travers le monde (DHA 1992, Selby, 1993).

Son but est de pouvoir décrire n'importe quel site ayant subi un déplacement des éléments géologiques le constituant. Son avantage est de se baser sur des termes ne prêtant pas à confusion et facilement traduisibles. Cependant elle a été avant tout réalisée dans une optique liée aux glissements de terrain (cf. annexe 3).

L'inconvénient de cette classification dans le cas des laves torrentielles est qu'elle n'est pas univoque. En effet le terme générique écoulement de débris (*debris flow*) peut être utilisé pour plusieurs phénomènes de mouvements de masse qui ne sont pas forcément des laves torrentielles (d'où une certaine confusion lors de la traduction vers l'anglais comme

le montre l'annexe 1). L'exemple de *debris flow* donné par Crudden et Varnes (1996) illustre bien cette ambiguïté. L'éboulement de Frank en Alberta présenté à la figure 2-10, est décrit comme une chute de roche (*rock fall*) qui s'est ensuite propagée comme un *debris flow*.



Figure 2-10: Illustration de l'ambiguïté de la traduction des termes. L'éboulement de Frank, Alberta, est décrit comme une chute de roche (*rock fall*) qui s'est ensuite propagée comme un *debris flow* (photo Natural Resources of Canada).

L'observation attentive de la zone de dépôt montre un type de déposition qui n'est pas dû à une lave torrentielle. On s'aperçoit alors que le terme générique écoulement de débris ne recouvre pas une réalité géomorphologique. Ainsi le concept des laves torrentielles étudié dans cette thèse devrait se traduire dans cette classification comme :

"un écoulement de débris très rapide à extrêmement rapide et très mouillé"

Cette formulation est trop compliquée pour exprimer la spécificité d'un phénomène naturelle comme les laves torrentielles. Elle rend aussi toute comparaison avec d'autres mouvements de masse difficile.

La classification de Varnes comporte une autre ambiguïté dans le domaine des laves torrentielles, soit le cas des lahars. Ces écoulements formés de matériaux fins, qui se déclenchent sur les flancs des volcans seraient un écoulement de terre. En effet ils peuvent être formés de plus de 80 % de particules d'un diamètre inférieur à 20 mm (Suthren 1999). Les lahars appartiendraient ainsi à une autre famille de mouvements de masse. Cette séparation arbitraire des lahars du concept recouvert par les laves torrentielles ne va pas dans le sens de la présente étude. En effet leur physique et la gestion du risque sont identiques à celles des laves torrentielles.

Si cette classification permet de définir un site particulier en vue d'un échange d'informations, elle ne permet pas de rattacher un concept physique unique aux laves torrentielles.

2.4.2. Classifications Brundsen et Innes

Quasiment dès la publication de la classification de Varnes, il a été nécessaire de donner des précisions pour pouvoir décrire les mouvements correspondant aux laves torrentielles. Pour cela de nouveaux critères ont été ajoutés ne respectant pas les critères initiaux (cf. figure 2-11).

Le premier à l'avoir affiné fut Brundsen (1979). Il établit une distinction entre les écoulements qui suivent le cours d'une rivière et ceux qui se déclenchent dans la pente sans lit préalable (respectivement les écoulements confinés par une vallée et ceux dans la pente). On se rapproche de la distinction entre les laves torrentielles et les coulées de boue. Cependant, à la lecture des divers paramètres proposés, je me suis aperçu que:

- les plages de vitesses sont bien plus étendues que celles typiques des laves torrentielles (Brundsen propose une plage de vitesse allant de 1 à 93 m/s, alors que les vitesses des laves torrentielles vont de 1 à 15 m/s).
- des caractéristiques permettant de différencier les lahars des laves torrentielles (forte fluidité, haute teneur en fines) apparaissent dans tous les types d'écoulement définis par Brundsen.

Quelques années plus tard Innes (1987) a repris la même approche en incluant un type spécial dédié aux lahars, comme le montre la figure 2-11.

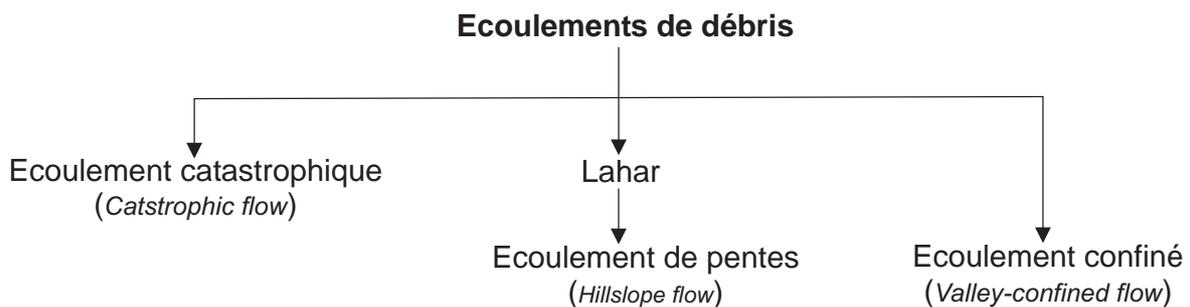


Figure 2-11: Classification des écoulements de débris selon Innes (1987).

Il ajoute une nouvelle classe pour les écoulements *catastrophiques* dont les caractéristiques sont différentes (fluidité, niveau de turbulence) des laves torrentielles. De tels écoulements ressemblent à un phénomène de rupture de barrage. Comme exemple d'un tel fluide, on peut donner l'événement survenu le 18 juillet 1987 dans la Zarvragia aux Grisons, qui fut pourtant suivi par une lave torrentielle typique. La figure 2-12 montre cet événement où un liquide chargé en matière solide, mais proche de l'eau, se déplace avec une turbulence très prononcée tout en formant un front.



Figure 2-12:

Front d'écoulement catastrophique dans la Zarvragia. Dans une deuxième phase, cet événement a donné lieu à une lave torrentielle (photo T. Venzin)

2.4.3. Classification de Pierson et Costa

En 1987, une classification introduisant la rhéologie des écoulements terrestres est présentée par Pierson et Costa. Cette classification se veut un approfondissement de la classification de Varnes (1978) dans le domaine des écoulements. Plusieurs types de fluides apparaissent : les fluides newtoniens et les fluides dits à seuils. Dans les fluides à seuil, une subdivision est établie entre :

- les écoulements de "boue en suspension" (tentative de traduction du terme anglais "*slurry*") où l'énergie est dissipée principalement par des contacts visqueux. Le modèle constitutif choisi par les auteurs pour ces écoulements est une loi de Bingham (cf. chapitre 6). Si des effets inertiels prennent le pas sur les efforts visqueux, alors une loi de comportement de type fluide "dilatant" peut être plus adaptée (Takahashi, 1991);
- les écoulements granulaires où l'énergie est, selon les auteurs, principalement dissipée par les effets de collision créant ainsi un effort dispersif dans le sens de Bagnold (1954). Si des frottements apparaissent, Pierson et Costa pensent que les efforts de cisaillement sont repoussés vers les zones limites du mouvement et qu'on a affaire alors à du glissement plutôt qu'à un écoulement.

Cette classification se présente sous la forme d'un diagramme où intervient la vitesse moyenne et la concentration solide ϕ^1 . L'effet de la concentration solide est nuancé par la composition granulométrique. Les limites verticales dans la figure 2-13 correspondent à des changements de comportement rhéologique. L'exemple est ici donné pour une granulométrie grossière et hétérogène. Ces limites devraient être déplacées sur la gauche si le matériau était composé de particules plus fines et cohésives. Inversement ces limites devraient être déplacées vers la droite si la granulométrie était plus grossière et resserrée. Les zones en grisé clair sur la figure 2-13 correspondent à des combinaisons vitesse/concentration solide rendant tout écoulement impossible.

Dans ce diagramme, les noms des phénomènes apparaissent en majuscule, et les types d'écoulement en minuscule italique. On peut voir qu'il n'y a pas correspondance entre la plage de vitesse dédiée aux écoulements de débris (*debris flow*) et celle dédiée aux laves torrentielles. La plage qui correspond aux laves torrentielles, telles que décrites dans ce travail, est donnée par l'ellipse gris foncé.

1. Pour le calcul de la concentration solide, voir le chapitre 6

Pourtant les auteurs recommandent l'usage de *debris flow* pour les écoulement de débris, dont les représentants dans la plage supérieure de vitesse correspondent aux laves torrentielles. Ils proposent de bannir les autres termes parfois utilisés en anglais, comme *debris torrent*, pour éviter des confusions, entre autres avec les termes japonais et européens.

Les paramètres de l'écoulement comme la concentration en sédiment ou la densité correspondent bien à ceux observés dans les laves torrentielles. Le tableau 2-4 résume ces paramètres. Seule la densité est un peu faible comparativement à mes observations et à celles d'autres auteurs (Coussot 1996). On peut voir que la valeur de la concentration en sédiments donnée pour les écoulements hyperconcentrés est trop haute. Les paramètres dynamiques, comme la vitesse, sont aussi en opposition avec les valeurs usuelles. La plage proposée va de 30 cm/an à 25 m/s alors que les vitesses couramment observées s'étendent de 0,5 à < 15 m/s (Rickenmann et al. 2001b, Takahashi 1991, Coussot 1996, Suthren 1999).

Tableau 2-4: Valeurs approximatives des divers paramètres d'écoulement selon Costa (1984). Les valeurs données pour les écoulements hyperconcentrés ne correspondent pas aux valeurs couramment estimées pour les phénomènes observés dans les Alpes.

Écoulement	Concentration de sédiments (% poids)	Densité (kg/m ³)
Écoulement fluvial	1-40	1000-1300
Écoulement hyperconcentré	40-70	1300-1800
Lave torrentielle	70-90	1800-2600

Cette classification reste intéressante au niveau conceptuel, même si elle ne permet pas une bonne descriptions des laves torrentielles. Toutefois l'approche rhéologique qui y est faite n'est peut être pas adéquate pour décrire les phénomène d'écoulement granulaire sec à très haute vitesse. De même la rhéologie liée aux très faibles vitesses (fluage et solifluction) n'est peut-être pas identique à celle des écoulements en général.

2.4.4. Classifications adaptée de Meunier, Coussot, Davies

Une deuxième classification se basant sur une approche rhéologique existe. Elle a été établie dans un but descriptif (reconnaissance de terrain) et conceptuel (compréhension des mécanismes). Comme le montre la figure 2-1 (page 13), l'idée est de tenir compte de l'influence de la teneur relative en matériaux fins (supposés cohésifs), en matériaux grossiers (supposés granulaires) et de l'eau. Pour des raisons de graphisme les axes de la figure 2-1 ne sont pas linéaires. Les limites entre les différentes plages sont donc qualitatives. Elles permettent toutefois de différencier les différents mécanismes d'écoulement, soit les fluides **newtoniens** des fluides **non-newtoniens**, soit les fluides au comportement biphasique de ceux au comportement monophasique.

Ces caractères sont d'une importance primordiale pour la distinction entre les laves torrentielles et les autres phénomènes de **transport solide**. Ces derniers sont divisés en une partie charriage de fond (*bedload*) et une partie en suspension (*suspended load*). Le tout forme la charge sédimentaire, parfois appelé aussi simplement charriage (GHO 1982).

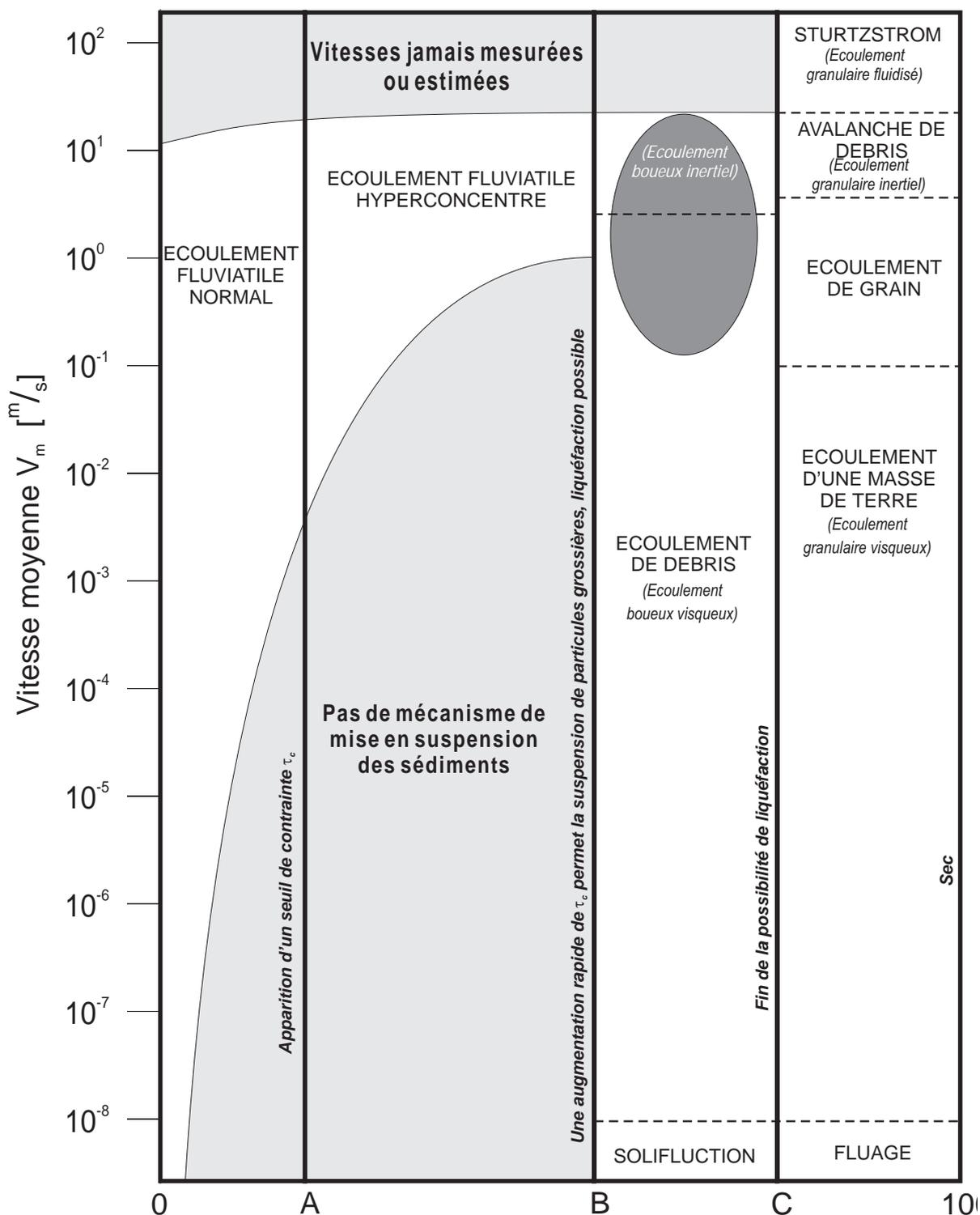


Figure 2-13: Classification rhéologique pour une granulométrie grossière et hétérogène (Pierson & Costa, 1987)

Le caractère très visqueux et concentré d'une lave torrentielle a pour conséquence le maintien en suspension des éléments grossiers. A l'inverse, un écoulement hyperconcentré n'a pas cette capacité de sustentation. Si une diminution de la vitesse intervient, l'écoulement perd ses éléments les plus gros, diminuant ainsi la viscosité globale du mélange. Cette viscosité plus faible entraîne alors la sédimentation des plus gros grains encore en suspension, diminuant ainsi encore la viscosité, et ainsi de suite (Cousot 1996).

De même la différence entre les laves torrentielles et les glissements de terrain est plutôt une affaire de mécanisme que de composition. La lave torrentielle peut être considérée comme un fluide homogène et continûment déformé (forte déformation), alors que les glissements de terrain ont une discontinuité dans le profil de vitesse laissant une partie de la masse faiblement déformée et concentrant le mouvement dans une interface.

2.5. Proposition de nouvelle classification

Pour éviter toute confusion avec d'autres phénomènes, il est nécessaire dans un premier temps de pouvoir situer le phénomène par rapport à l'ensemble des mouvements de masse. Cette étape est nécessaire pour définir les limites du phénomène, limites qui permettent de choisir le modèle qui décrit le mieux le mouvement. Ensuite il faut décrire les nuances existantes au sein du concept lave torrentielle. Cette typologie du phénomène est incontournable si on veut rendre compte de la variabilité naturelle et permettre l'échange d'informations.

2.5.1. Classification par rapport aux mouvements de masse

2.5.1.1. Buts

Les classifications présentées à la section 2.4 ne permettent de rattacher les laves torrentielles ni à un concept, ni à un domaine physique ni à des caractéristiques de mouvement. Ceci vise à créer un lien univoque et immédiat entre un phénomène et son type de mouvement, en vue de faciliter le choix des modèles à prendre en considération.

2.5.1.2. Démarche

Une démarche itérative a été adoptée. A chaque itération, quatre étapes étaient parcourues :

- 1) le choix des paramètres nécessaires pour discriminer au mieux les phénomènes;
- 2) le classement sous forme d'un arbre des différents mouvements de masse en fonction des paramètres retenus;
- 3) la recherche des doublons et des phénomènes manquants, ainsi que des limites pouvant prêter à interprétation;
- 4) l'identification des paramètres non discriminants et retour en 1.

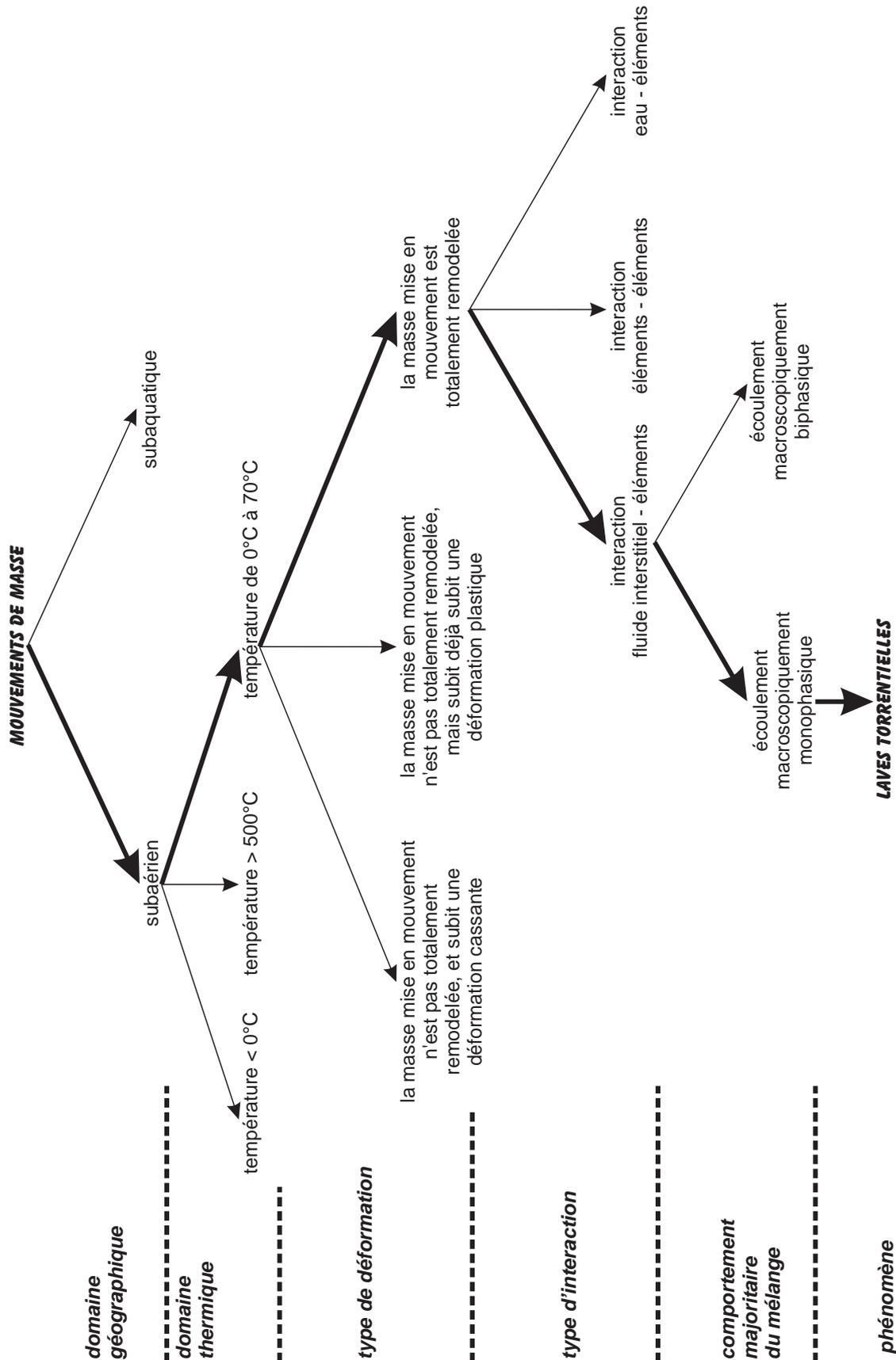


Figure 2-14: Nouvelle classification proposée pour les mouvements de masse selon le domaine physique et le type de mouvement.

2.5.1.3. Résultat

L'aboutissement de ce travail se présente sous la forme d'un arbre de classement avec des rameaux sur cinq niveaux présenté à la figure 2-14. Les deux premiers rameaux définissent les grands domaines physiques ayant une influence sur le mouvement. Les trois suivants donnent les caractéristiques du mouvement.

Les grands domaines physiques

Le premier rameau définit le domaine géographique. Dans le domaine **subaérien**, la pression du fluide ambiant est négligeable et n'a qu'un faible effet de frottement. Le domaine subaérien s'oppose au domaine subaquatique, où la pression et les effets de frottement sont importants. Cette séparation permet de différencier les laves torrentielles des écoulements de débris sous-marins. Ces deux phénomènes, proches du point de vue de la phénoménologie, ont pourtant des différences bien marquées. Elles seront évoquées plus loin au sous-paragraphe 2.5.2.

Le second rameau définit le domaine thermique. Il se subdivise en trois classes. Ces trois classes sont nécessaires pour différencier les phénomènes nivo-glaciaires (avalanche, chute de sérac) et volcanique¹ (épanchement de lave, explosions phréatiques) des phénomènes où les effets thermiques sont faibles.

Les caractéristiques du mouvement

Le troisième rameau indique l'ampleur et le type de la déformation. Lors d'une lave torrentielle, la masse mise en mouvement est totalement remodelée (grande déformation). La masse de départ n'est alors plus reconnaissable lors du dépôt. La masse acquiert sa morphologie finale suite à l'écoulement, entre autre à cause de l'existence d'un seuil de contrainte.

Par opposition, dans les glissements de terrain la masse de départ est encore reconnaissable après le mouvement. Le mouvement de la masse se fait le long d'une ou de plusieurs discontinuités. Il semble qu'à partir d'une certaine vitesse (5-8 m/an) une description du mouvement par une loi d'écoulement peut être aussi appropriée qu'une loi de glissement (Vuillet 1999). Cela peut expliquer les plages de vitesses très lentes associée aux *debris flow*² (Skempton & Hutchinson, 1969, ou Brundsen, 1979).

Le dernier type de déformation est celui qui apparaît dans les tassements rocheux. Ici la masse mise en mouvement est toujours reconnaissable, mais la déformation est cassante. Les compartiments rocheux sont déplacé le long de discontinuités tectoniques. Les compartiments subissent une fracturation importante, mais leurs dimensions de départ sont conservées. C'est ce qui leur donne cette morphologie particulière (apparition de doubles crêtes et contre-pentes, Cruden et Varnes 1996). Ils sont généralement la conséquence de l'affaissement de la couche sous-jacente, (Sartori 2001), soit parce que celle-ci est tendre (mouvement continu), soit parce qu'elle se rompt et/ou dissout (mouvement discontinu qui peut être ressenti comme un tremblement de terre).

Le quatrième rameau décrit le type d'interactions entre les constituants. Pour les laves torrentielles, les observations montrent un lien très fort entre les grains rocheux et le fluide

-
1. Les lahars sont des phénomènes éminemment liés au volcanisme, mais leur cinétique est moins influencées par les effets thermodynamiques que les coulées pyroclastiques avec lesquelles ils sont parfois confondus.
 2. C'est ici la traduction littérale écoulement de débris qui doit être utilisée (cf. paragraphe 2.4.1)

interstitiel composé par les fines et l'eau (ce qui n'est pas entièrement valable pour le front). Cela implique un comportement visqueux et/ou frictionnel, avec parfois une composante inertielle, par opposition aux phénomènes purement inertiels (interaction éléments-éléments) que l'on peut rencontrer lors d'un éboulement, ou aux phénomènes purement frictionnels (interaction eau-éléments) rencontrés lors du charriage.

Le cinquième rameau décrit l'apparence macroscopique de la cinétique du mouvement (ici un écoulement). Bien que formées d'eau et de matériau rocheux (donc biphasique), les laves torrentielles se présentent à l'observateur comme une masse se déformant continuellement, d'aspect macroscopique cinématiquement monophasique. C'est la différence principale entre les laves torrentielles et le charriage hyperconcentré (aspect cinématiquement biphasique, les grains rocheux n'ont pas la même vitesse que le fluide environnant). Cette différence peut se traduire par une différence de concentration solide, mais le seuil reste mal défini et probablement dépendant de la distribution de taille des particules.

Il ressort de cette classification qu'il est possible de différencier les laves torrentielles des autres mouvements de masse avec des critères simples et objectifs. Elles apparaissent comme : un écoulement granulaire lubrifié, dans le domaine subaérien mésophile, d'apparence cinématiquement monophasique. En éludant les grands domaines physiques, qui sont implicitement pris en compte dans la définition de l'environnement alpin (cf. paragraphe 2.3.3), on peut simplifier la définition des laves torrentielles. Ce sont des :

*écoulements subaériens granulaires lubrifiés d'apparence
cinématiquement monophasique.*

2.5.2. Les phénomènes similaires

Quatre phénomènes sont proches des laves torrentielles. Il est important de les connaître pour deux raisons. D'abord, car l'étude des phénomènes similaires apporte des solutions originales à des problèmes semblables. Ensuite, car il faut être conscient des différences existantes lors de la transposition d'outils développés dans un autre domaine. Ces quatre phénomènes sont : les écoulements de débris sous-marins, les laves volcaniques, les avalanches et le charriage hyperconcentré. Le tableau 2-5 récapitule les principales différences et ressemblances de ces divers phénomènes avec les laves torrentielles.

2.5.3. Typologie des laves torrentielles

En aval des classifications des mouvements de masse, il existe plusieurs types de laves torrentielles. Pour pouvoir échanger des informations sur des événements, il est nécessaire de pouvoir préciser la nature des événements avec des attributs supplémentaires.

Cette typologie des laves torrentielles (inspirée de celle faite pour les avalanches, Munter 1998) peut être faite en fonction des différentes zones du bassin versant. Ainsi on pourra différencier les laves torrentielles en fonction de :

- leur zone de déclenchement
 - selon de mode de genèse (par érosion, à glissement de terrain, à rupture de digue, etc.)
 - selon le facteur déclenchant (pluie, fonte de neige, remontée de la nappe, etc.)

- leur zone de transport
 - selon leur comportement rhéologique (boueux, granulaire, fluide, cf. chap. 6)
 - selon leur bilan érosif (nul, érosion, dépôt)
- leur zone de dépôt
 - selon leur position (confiné dans le lit, débordement sur le cône, etc.)

Tableau 2-5: Récapitulatif des ressemblances et des différences les plus significatives. Sources : Middleton et Hampton 1976, Hay 1987, Ancey et Charlier 1996, Munter 1998, Zimmermann et al. 1997, Griffiths 2000, Parker 2000.

	ressemblances	différences
écoulement de débris sous-marins	- composants - certaines formes de dépôts	- % de chaque composant - profil de vitesse (hydroplaning)
lave volcanique	- certaines formes de dépôts - vitesses - loi de comportement	- les paramètres rhéologiques sont évolutifs dans le temps
avalanche	- certaines formes de dépôts - certaines lois de comportement	- vitesses - composants
charriage hyperconcentré	- composants - environnement global	- % de chaque composant - loi de comportement

2.6. Conclusion

Ce chapitre a permis de définir quels sont les matériaux qui composent une lave torrentielle (l'eau, les fines et les granulats) et comment ces matériaux se répartissent dans la lave torrentielle (le front, le corps, la queue et les bourrelets latéraux). Le phénomène a été décomposé entre sa phase de déclenchement, d'écoulement et de dépôt, soulignant ainsi son caractère transitoire.

La revue des classifications existantes, développée à la base pour décrire les glissements de terrain, montre qu'elles sont difficilement utilisables pour les laves torrentielles. Par exemple dans la plus répandue, la classification de Varnes, la plage définie pour les laves torrentielles (nommée écoulement de débris) ne permet pas de les distinguer d'autres phénomènes, comme les écoulements sous-marins.

La description de l'environnement des laves torrentielles d'Europe centrale, les zones alpines et les éléments introduits dans la classification proposée (orientée vers une description macroscopique du mouvement) permettent de définir les laves torrentielles comme :

*Un écoulement subaérien granulaire lubrifié d'apparence
cinématiquement monophasique.*

Outre le fait de faciliter le choix des modèles adéquats, ce résultat est d'une importance primordiale pour l'identification du phénomène sur le terrain.

Les grandeurs caractéristiques qui ressortent des études de cas nécessaires à l'établissement de cette nouvelle classification permettent de fixer les ordres de grandeur suivants :

la masse volumique est comprise entre 2000 et 2400 kg/m³; les vitesses sont comprises entre 1 et 15 m/s avec des pointes à 20 m/s; les hauteurs d'écoulement vont de 0,5 à 10 m. L'analyse succincte des lois de comportement (qui seront détaillées au chapitre 6) montre que les laves torrentielles se comportent généralement comme des fluides à seuils. Cette particularité est responsable de la forme tridimensionnelle des dépôts.

Cette partie introductive a permis de définir le phénomène étudié de manière univoque. Cette définition est nécessaire car la particularité du phénomène (comportement transitoire, fluide à seuil, mélange eau-fines-granulats) implique l'utilisation d'outils particuliers. Ce sont ces outils qui vont maintenant être présentés.

"Jim [Watson] a donné un mauvais exemple. Il est clair maintenant que si un comité veut être certain de ne pas empêcher une découverte, les boursiers doivent être autorisés à faire ce qu'ils veulent"

André Lwoff
Prix Nobel 1965

Chapitre 3

Lien entre la composante eau et les laves torrentielles

3.1. Introduction

L'une des premières étapes du diagnostic d'un bassin versant consiste à identifier les sources des composantes principales des laves torrentielles, à savoir l'eau, les matières fines et les éléments rocheux grossiers (cf. § 2.2.2). Le but de ce chapitre étant d'analyser plus particulièrement le lien entre la composante eau et les laves torrentielles. Quelle quantité est nécessaire pour qu'une lave torrentielle se déclenche ?

Plusieurs modèles de déclenchement, tous dépendants totalement ou partiellement des précipitations permettent de répondre à cette question. Mais avant de passer ces modèles en revue, deux étapes ont été nécessaires.

Tout d'abord il a fallu répertorier les diverses interactions entre l'eau et les laves torrentielles. Il ressort de cet inventaire que les déclenchements de laves torrentielles ne sont pas tous tributaires des précipitations, mais dépendent aussi de l'eau de sous-sol, de la fonte des neiges, etc.

Ensuite une analyse critique de nos capacités de mesure actuelles des précipitations en montagne a été faite. Cette analyse permet d'expliquer en partie la faible réussite des modèles présentés.

La compréhension phénoménologique des précipitations en zone alpine est importante pour contrôler les résultats obtenus. Ce contrôle est nécessaire pour éviter toutes mauvaises interprétations. En effet, ces modèles peuvent être utilisés selon deux optiques différentes, soit :

- Pour le diagnostic afin de pré-dimensionner un aménagement (dans ce cas ils seront associés à d'autres modèles permettant d'estimer par exemple le volume, chapitre 4, et la rhéologie des laves torrentielles, chapitre 6).
- En vue d'une gestion en temps réel d'un bassin versant présentant un potentiel de déclenchement de laves torrentielles, en fonction des facteurs dégradants (cf. § 2.2.5.2.), ceci en relation avec le chapitre 4 et le chapitre 5.

La connaissance des phénomènes hydro-météorologiques extrêmes restant limitée, il faut regarder la prédétermination de tels événements avec un oeil critique. Les deux exemples ci-dessous montrent que, les événements de grande ampleur peuvent parfois dépasser les capacités de calcul (et d'imagination).

Lors des intempéries de 1987, la Reuss (UR) a subi une forte crue causant d'innombrables dommages. Lors de la reconstruction, une couverture de laine (provenant d'un bâtiment endommagé) a été exhumée sous sept mètres de sédiments. Cette épaisseur correspond à l'épaisseur minimale sur laquelle le lit a été fluidifié (Petraschek, 2000).

La figure 3-1 donne un deuxième exemple. Comment imaginer que la section d'environ 150 m^2 , sous le pont (image de gauche), soit un jour entièrement remplie par la rivière, surtout si on sait que le pont fut construit par les Romains (âge minimum 1'600 ans) ? Ce fut pourtant le cas en 1992 (image de droite).

L'enseignement à retirer de ces exemples est que l'ampleur des phénomènes hydrologico-météorologiques ne peut être facilement estimée. L'intuition est souvent dépassée dans le domaine des crues et encore plus dans le domaine des laves torrentielles. Notre niveau de connaissance actuel doit nous inciter à exposer clairement les calculs entrepris¹ de façon à pouvoir les reprendre à l'avenir quand de nouvelles méthodes verront le jour.



Figure 3-1: Pont sur l'Ouvèze à Vaison-La-Romaine (84). La photo de gauche a été prise en 2001 (photo J.-P. Seydoux). La photo de droite a été prise au matin du 22 septembre 1992 (photo O. Cazaillet)

3.2. Relations entre la composante eau et les laves torrentielles

La composante eau peut intervenir de trois façons différentes dans le déclenchement des laves torrentielles :

- par des pluies de fortes intensités (dues à un phénomène orageux ou convectif). Dans ce cas le déclenchement peut être dû à l'apparition du ruissellement de surface et à des phénomènes d'augmentation rapide des pressions interstitielles (Klubertanz 1999, Sitar 1994).

1. Cela veut dire que l'on doit connaître les méthodes utilisées et les hypothèses retenues

- par des pluies de longue durée (dues à un phénomène frontal ou de barrage météorologique). Dans ce cas le déclenchement est dû au changement de propriétés du sol résultant de sa saturation, ainsi que du ruissellement de surface (Teysseire et al. 2000).
- par de l'eau de fonte de neige ou de glace contenue dans le sol¹. Dans ce cas le déclenchement ressemble à celui induit par des pluies de longues durées.
- par des effets hydrogéologiques. Le déclenchement est expliqué par une remontée d'un aquifère à proximité de la surface (cf. § 5.2.1). L'agencement des couches géologiques est alors autant responsable du déclenchement que la composante eau (Klubertanz 1999, Fracheboud 2000, Mayoraz 2000).
- par des sources ponctuelles, rupture de lacs glaciaires, poches d'eau sous-glaciaires ou rupture de conduites.

Ces effets de l'eau peuvent se combiner, c'est par exemple le cas des pluies de forte intensité qui s'abattent sur un sol déjà saturé par la fonte ou des pluies antécédentes, soit être la cause unique du déclenchement d'une lave torrentielle. Il est très difficile de donner un ordre de prépondérance de chacun de ces effets. Le tableau 3-1 donne quelques exemples de déclenchement et du phénomène météo-climatique prépondérant.

Cependant, par un effet de grandeur de la zone touchée, les événements dus à un phénomène de barrage sont ceux qui sont responsables du plus grand nombre de déclenchements (toute la surface du canton du Valais ainsi que le nord de l'Italie en octobre 2000, toutes les Alpes centrales en 1987). Plus de détails sur les mécanismes de déclenchement seront donnés au chapitre 5.

Tableau 3-1: Quelques déclenchements avec leur phénomène météo-climatique prépondérant

torrent	type de déclenchement	date
Rufibach	fonte de neige + orage	6.7.98
Birchbach	fonte de neige (pergelisol ?)	9.8.98
Illgraben	érosion	plusieurs
Vernette	pluie longue durée	14.5.99
torrent des Marais	pluie longue durée	14.5.99
Chalcheri	fonte de glace + pluie longue durée	15.10.00

Les prochaines sections se concentreront sur les phénomènes de précipitations, car c'est actuellement la seule variable utilisée par les modèles de déclenchement. Les autres relations entre l'eau et les laves torrentielles doivent être étudiées au travers d'une analyse hydrogéologique dont la présentation sort du cadre de ce travail (analyse hydrogéologique). Afin de comprendre les limitations des formules qui seront présentées, il est nécessaire de bien appréhender le processus des précipitations en zone de montagne.

1. Les effets de dégradation du pergelisol sont encore trop mal connus pour être introduits dans le cadre d'une description générale, mais devront être pris en compte au cas par cas.

3.3. Analyse phénoménologique de l'hydrologie alpine

3.3.1. Généralités

Tout d'abord le cycle hydrologique présenté à la figure 3-2 montre une synthèse d'informations éparses qui permettent d'acquérir les nuances importantes qui existent entre l'hydrologie classique et l'hydrologie alpine. Les nuances principales sont les suivantes :

- l'interception est moins prononcée, ce qui conduit à une augmentation de la pluie nette.
- l'évapotranspiration est moins importante, ce qui engendre un surplus d'eau disponible pour l'écoulement ou l'infiltration.
- l'évaporation pourrait être favorisée par le climat, mais les surfaces caillouteuses protègent le sol d'une évaporation directe.
- le caractère probabiliste de la répartition spatiale des pluies sur de petits bassins versants induit une forte variabilité des débits observés.
- la présence d'affleurements diminue l'infiltration (à une échelle de temps courte).

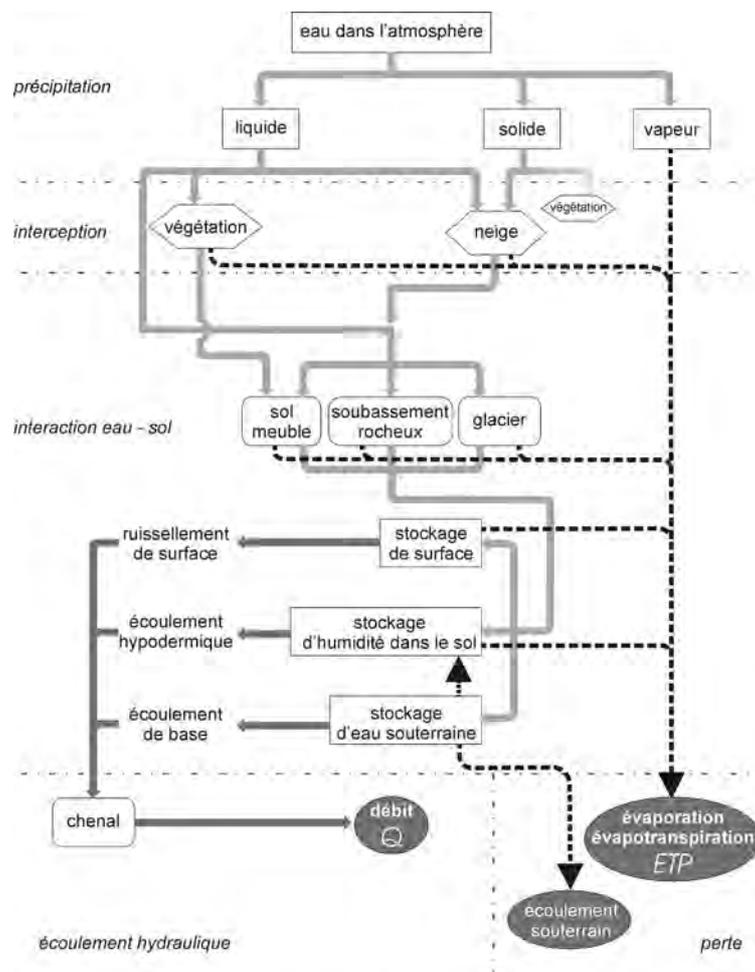


Figure 3-2: Cycle hydrologique en montagne (adapté de Musy 1993). Le facteur temporel n'est pas pris en compte dans cette représentation. Par exemple le passage de la pluie brute au ruissellement de surface peut prendre une dizaine de minutes (cas d'un affleurement rocheux), tandis que le passage de l'eau stockée dans le sous-sol à l'écoulement de base peut se compter en années.

- de même, il semble qu'il y ait une infiltration relativement faible dans le régolite.
- sur une période de temps plus longue, il peut y avoir une infiltration non négligeable, même sur les affleurements (principalement lorsque les névés fondent) et dans les zones sous-glaciaires (écoulement subglaciaire).
- l'effet de stockage saisonnier de la neige se traduit par un effet saisonnier de concentration du ruissellement de surface.

Aucune application directe ne découle de cette synthèse. Cependant elle permet d'avoir une vue globale des cheminements de l'eau dans le bassin versant (ceci à diverses échelles temporelles). La connaissance de ces cheminements est primordiale dans la partie du diagnostic qui concerne la composante eau.

L'un des traits marquants de l'hydrologie alpine est l'amplitude du relief. Elle agit de deux façons : premièrement par la pente (vitesse de propagation et capacité de stockage) et deuxièmement par la température qui conditionne la forme des précipitations, les bassins versants alpins se trouvent à cheval sur le domaine de variation de l'isotherme du 0°C (cf. figure 3-3). Les précipitations peuvent y tomber sous forme liquide ou sous forme solide. Suivant la saison, la totalité des précipitations peut tomber sous l'une ou l'autre forme. L'effet de stockage dû à la neige (augmenté encore si une partie du bassin versant est couverte par un glacier) est un caractère important de l'hydrologie alpine.

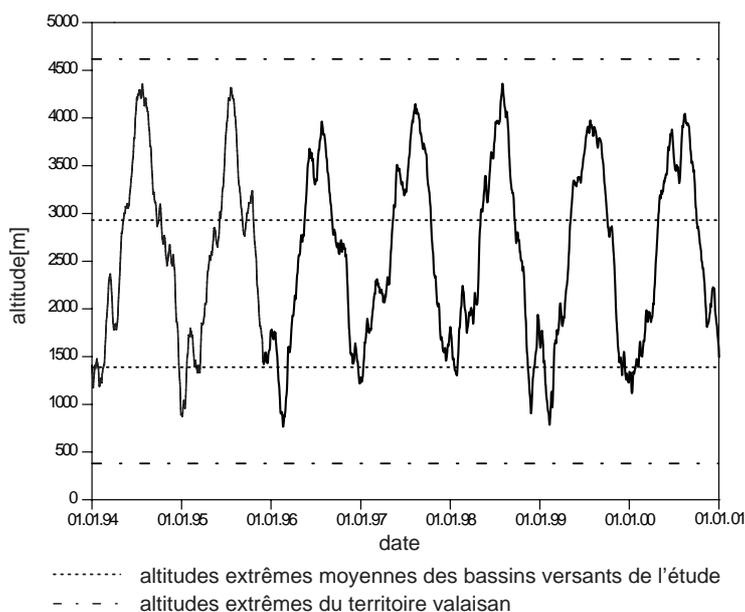


Figure 3-3: Variation altitudinale de l'isotherme du 0°C sur 7 ans et altitude des bassins versants retenus dans cette étude.

Un autre trait marquant de l'hydrologie alpine est la taille des bassins versants. La surface moyenne s'établit vers 1 km². (cf. § 4.3.1). Il s'en suit une grande variabilité des débits, avec une tendance à l'augmentation des débits maximum spécifiques. Cette tendance liée à la taille est bien illustrée par la figure 3-4. La grande dispersion des données montre qu'il n'est pas possible de déterminer un débit à partir de la seule surface. Ce problème d'échelle souligne l'importance de la vérification de la plage d'utilisation des modèles hydrologiques employés pour les bassins versants à laves torrentielles typiques.

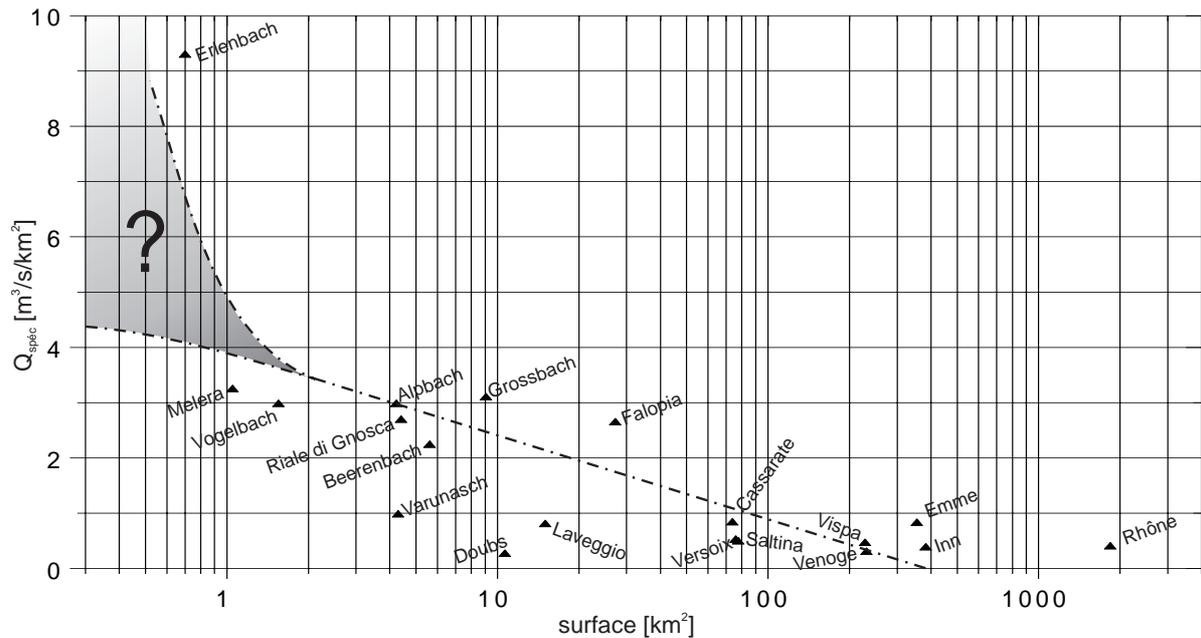


Figure 3-4: Réaction hydrologique de divers bassins versants traduite par le débit spécifique (ici pour un temps de retour 10 ans). Les bassins versants alpins se retrouvent tous dans la zone des surfaces inférieures à 10 km² (source des données SHGN).

3.3.2. Forme des précipitations

3.3.2.1. Précipitations sous forme liquide ou sous forme solide

L'amplitude du relief rend possible des précipitations sous forme de pluie ou sous forme de neige. Lors de précipitations sous forme de neige le ruissellement de surface est retardé. Pour appréhender les cheminements de l'eau, autrement dit la connexion d'un ruissellement potentiel avec une zone probable de déclenchement, il est important de connaître la limite de l'isotherme du 0°C (ceci peut être illustré par l'analyse des intempéries d'octobre 2000 faite au paragraphe 4.3.2.1.) et/ou de l'altitude de la zone de retrait des névés.

3.3.2.2. Effets de la fonte des neiges

L'effet du transfert de l'écoulement dans le temps sur le bassin versant est de saturer les sols juste à l'aval des plaques de neige lors de la fonte. En Valais, suivant l'altitude cette saturation survient lorsque les orages d'été sont déjà possibles. Pour apprécier ce risque du point de vue du déclenchement des laves torrentielles (conjonction entre un orage et un sol saturé par la fonte des neiges), il est intéressant de savoir où se trouve le front de retrait de la neige.

Pour connaître l'altitude du front de retrait de la neige, on peut utiliser dans une première approche la régression suivante (Baumgartner et Apfl 1994) :

$$D_i = 0.075 \text{ alt} + 128.89 \quad (3.1)$$

$$r^2 = 0,88 \text{ (sur l'échantillon considéré)}$$

où D_i est le nombre de jour après le 1^{er} septembre où la neige disparaît, et alt l'altitude en mètres. Cette équation est obtenue à partir de l'analyse de 31 images satellites des Alpes suisses¹. Pour être correct, il faut pondérer le résultat obtenu par l'orientation du versant. Cette pondération a été obtenue sur la base du bilan thermique (c'est une approche similaire à celle développée pour le pergélisol (Haeberli 1975) et que j'ai validée par des observations dans le Valais central durant l'hiver 1999-2000). Le résultat final est donné à la figure 3-5.

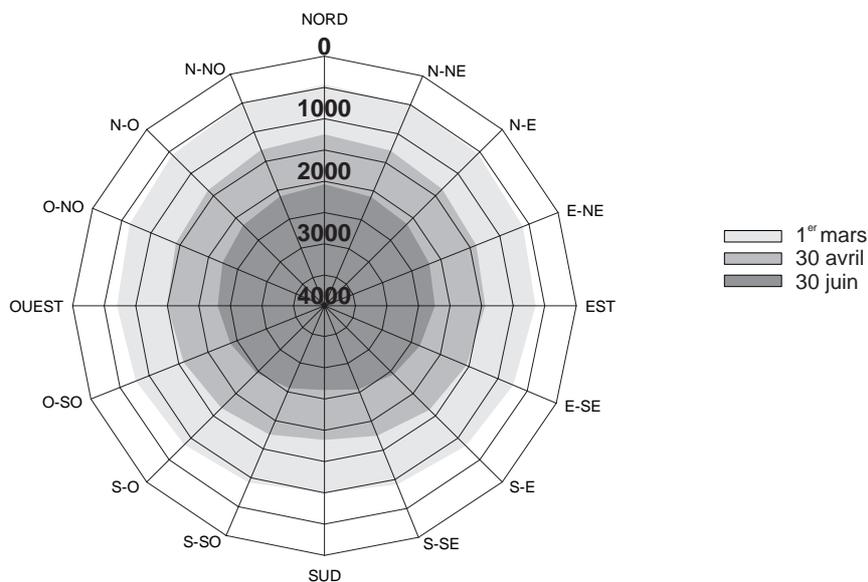


Figure 3-5: Rose des vents de l'altitude de disparition de la neige.

Pour l'étude d'un bassin versant particulier et si des mesures climatologiques sont disponibles, on pourra utiliser un modèle du type de celui développé par Schroeter et Whiteley (1987), associé à un modèle permettant de séparer la fraction solide de la fraction liquide des précipitations (Sevruk 1985). L'annexe 4 présente ces applications.

Cependant ces modèles ne prennent pas en compte l'activité avalancheuse (transfert des volumes de neige, ainsi que de leur date de fonte). C'est leur principal inconvénient. En effet la quantité de neige dans les rigoles peut être fortement amplifiée par les avalanches. Par exemple à mi-juillet 2000, des langues estimées à 1000 m³ de neige de névé (550 kg/m³) ont été observées sur un flanc ouest vers 2000 m d'altitude dans le torrent de la Fouly, Val Ferret (VS). Ces lambeaux de neige maintenaient une certaine saturation dans les sédiments qui les recouvraient, ou qui les bordaient à l'aval. La semaine suivante, le 24 juillet 2000, une lave torrentielle s'est déclenchée dans cette rigole, suite à un orage d'intensité moyenne (Bardou et al. 2002).

1. Une régression similaire existe pour la date d'apparition de la neige, mais avec un taux de corrélation moins bon.

3.3.3. Quantité des précipitations

3.3.3.1. Quantité des précipitations en fonction de l'altitude

Les précipitations ont tendance à augmenter avec l'altitude. L'analyse des pluies moyennes annuelles sur 12 ans des stations d'Orsières (910 m), de la Fouly (1600 m) et du Gd-St-Bernard (2474 m) illustre cet effet. En appliquant une régression linéaire sur les moyennes des 12 années, on obtient la droite en traits-points de la figure 3-6, avec un coefficient de corrélation de 0,94. Toutefois si on entre dans les détails, en reliant chaque triplet annuel, on peut voir que pour certaines années (7 d'entre elles, lignes pointillées grises), le gradient est uniforme et proche de celui de la moyenne interannuelle. Pour les 5 autres années (lignes pleines noires), on peut voir que le gradient n'est pas homogène dans le temps et qu'il y a probablement un effet de vallée (cf. annexe 5). Cet exemple montre que malgré son importance, l'altitude ne peut pas être utilisée comme paramètre unique pour corriger les pluies d'une station de mesure en vallée pour estimer les pluies sur la partie supérieure d'un bassin versant. En conclusion, on ne peut pas utiliser simplement le gradient pluviométrique pour estimer l'augmentation des précipitations avec l'altitude.

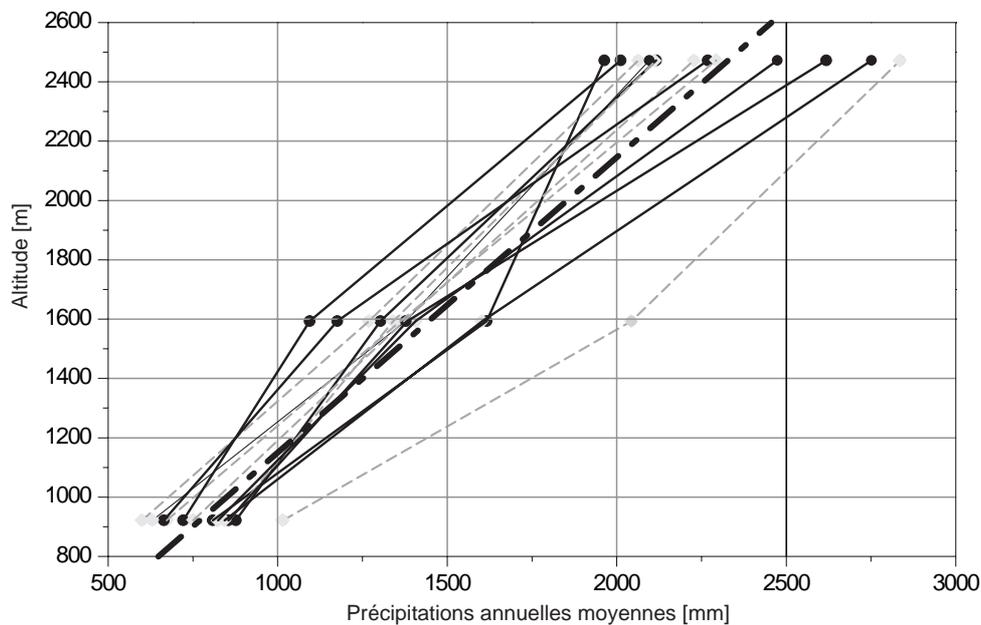


Figure 3-6: Gradient pluviométrique annuel dans les vallées des Dranses, adapté de Marquis 2001a.

3.3.3.2. Quantité de précipitation en fonction du relief

L'influence de l'orographie est très importante pour les précipitations, que ce soit sur leur déclenchement ou leur répartition spatiale. Le relief agit sur les précipitations au travers de trois mécanismes principaux :

- il induit un mouvement vertical local des masses d'air. A partir d'un vent supérieur à 20 km/h, le relief du terrain crée des turbulences suffisantes pour se propager en altitude (Kohler, 1998).
- il change les caractéristiques physiques des masses d'air et les caractéristiques du champ de pression.
- il fait apparaître d'autres processus physiques à l'échelle du nuage favorisant les pluies (Barry 1992)

Ces trois effets ont été mis en évidence dès les années 1960. Un suivi radar au-dessus de collines, ne dépassant pas plus de 30 à 50 m le niveau de la plaine environnante, a montré une augmentation de 50 à 80 % du total des précipitations (Bergeron 1960). C'est l'effet *seeder-feeder* (sемеur-mangeur). L'augmentation des pluies est expliquée par l'accrétion des cristaux de glace provenant d'un nuage des couches supérieures sur les cristaux contenus dans les nuages formés par le relief. Au sol l'augmentation des précipitations ne se produit pas toujours du même côté du relief. Elle est dépendante de la vitesse du vent et de l'amplitude du relief (Barry 1992, Goulpié et Hertig 2000). Cela conduit à introduire les problèmes de correspondance d'échelle entre le déclenchement des laves torrentielles et les données climatiques (cf. annexe 5). La topographie complexe des Alpes ne permet donc pas à l'heure actuelle d'extrapoler les valeurs des précipitations à moyenne distance (< 1 km) d'un pluviomètre.

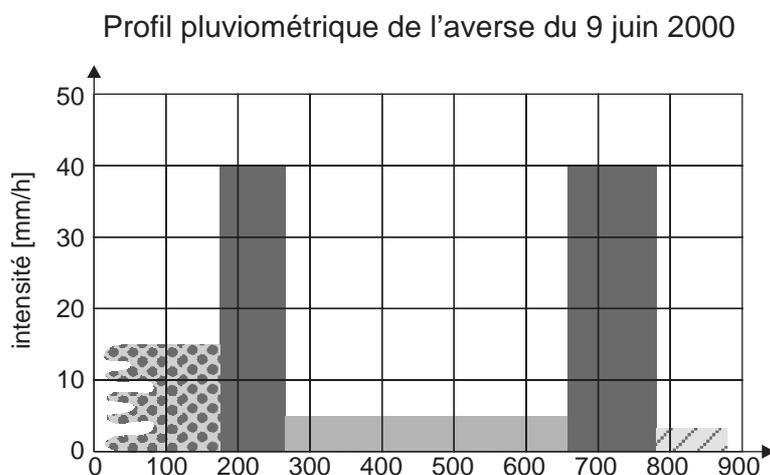
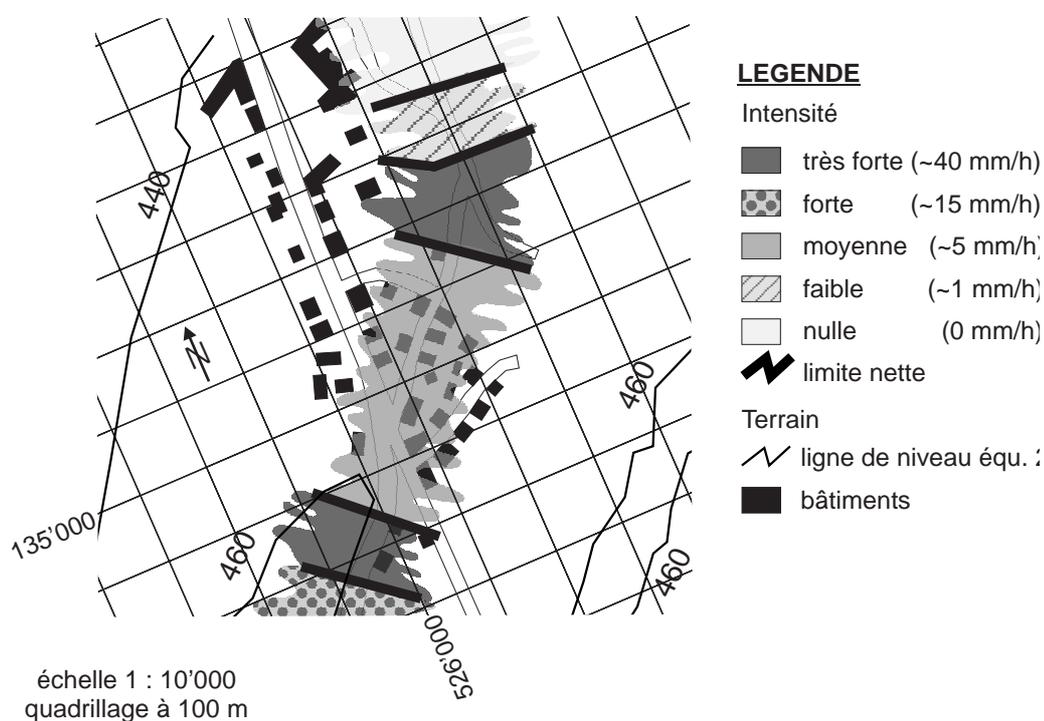


Figure 3-7: Répartition spatiale de l'averse du 9 juin 2000 à Thonon.

3.3.3.3. Quantité de précipitation au sein d'une averse

Même en zone relativement plate, la variabilité spatiale d'une averse peut être grande (vis à vis de la taille d'un bassin versant). L'exemple donné à la figure 3-7 montre de quel ordre peut être cette variabilité. J'y ai représenté la répartition spatiale d'une averse observée le 9 juin 2000 aux environs de Thonon, zone de piedmont des Préalpes. L'intensité pluviale¹ y est reportée en plan et en coupe. L'allure de la coupe montre l'extrême variabilité de l'intensité pluviale. Elle ne se répartit pas selon un gradient uniforme, mais subit des transitions brutales.

Le caractère discret des pluies est une sérieuse limitation dans l'utilisation des pluviomètres. L'échelle de travail adaptée aux bassins versants à laves torrentielles (environ 1 km²) ne correspond pas à la résolution du réseau de pluviomètres (environ 50 km²) en Suisse). Il y a inadéquation entre l'échelle d'acquisition des données et la variabilité des précipitations. L'exemple de la figure 3-8 montre une averse qui s'est abattue sur la crête méridionale de la vallée du Rhône. Le pluviomètre de Fey (flèche), une station automatique de l'Institut Suisse de Météorologie (ISM), se trouve juste en bordure extérieure de l'averse. Il est donc très difficile de travailler sur la base d'informations ponctuelles.

Il est donc nécessaire de chercher une information qui soit disponible sur toute la surface. On pourra trouver à l'annexe 5 un descriptif des différentes échelles climatiques, celles qui sont nécessaires à l'étude du déclenchement des laves torrentielle et celles à laquelle sont acquises les données pluviométriques aujourd'hui.

Actuellement la seule possibilité d'obtenir une information sur toute la surface est le radar. Son utilisation reste toutefois délicate pour des travaux détaillés. La correspondance entre un pixel de l'image radar et sa trace au sol n'est pas assurée. De plus, en zone montagneuse, l'efficacité de ce moyen de détection est atténuée par relief (cf. annexe 6).



Figure 3-8: Averse du 8 mai 2000 sur les Agettes (VS). Le front de pluie (partie claire) a une limite très nette. Un pluviomètre ISM Fey se trouve juste dans le prolongement de la zone sans précipitation (flèche).

1. Estimée après coup par observation d'intensités semblables observées à Sion et comparées avec les données du pluviomètre de la station de Sion, ISM.

L'exemple choisi pour illustrer les possibilités offertes par les radars météorologiques, est une averse brutale et ponctuelle qui a déclenché deux laves torrentielles le 8 août 1999, sans que des pluviomètres soient touchés. Cet événement bien documenté a eu lieu à Champéry dans le Val d'Illicz (VS), dans la zone où la qualité des images radar est maximale (cf. figure 3-9). Un témoin possédant un pluviomètre privé, m'a permis de reconstituer la chronologie de l'événement (pluie avec une intensité croissante, accompagnée de grêle). Deux torrents se trouvant à moins d'un kilomètre, dans un bassin versant similaire (prédispositions identiques) n'ont eux pas produit de lave torrentielle. Il est donc intéressant de voir ce que peuvent apporter les radars météorologiques dans une telle situation.

La coupe verticale nord-sud de l'averse donnée à la figure 3-9 montre bien le caractère local de cette précipitation (la maille est ici de 2 km x 2 km). Les données du radar correspondent aux observations faites sur place et apportent une information qui n'aurait pas pu être donnée par les pluviomètres. L'inconvénient majeur de cette technique réside dans la qualité de sa couverture, qui est très mauvaise par exemple pour le Valais central (cf. annexe 6).

D'autres améliorations en vue de l'utilisation dans le domaine des laves torrentielles sont nécessaires. Entre autres l'affinement de l'échelle des précipitations, principalement entre 30 et 100 mm/h, car c'est typiquement pour des intensité de 50 à 70 mm/h que des laves torrentielles se déclenchent. Une amélioration de la résolution spatiale serait aussi souhaitable.

3.4. Les modèles de déclenchement liés à la pluviométrie

Quelques modèles prenant en compte les précipitations (seulement, et faisant abstraction des processus hydrogéologiques) ont été développés. Peuvent-ils être utilisés pour la prédiction ou pour le dimensionnement d'ouvrages ? La revue critique qui suit va apporter quelques réponses. Ces modèles sont du type :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{déclenchement si } I_p > I_{pc} \\ \text{non déclenchement si } I_p \leq I_{pc} \end{array} \right. \quad (3.2)$$

où I_p est l'intensité pluviale et I_{pc} l'intensité pluviale critique (seuil) nécessaire pour qu'un déclenchement soit observé.

3.4.1. Formule de Caine

Cette formule (Caine 1980) est l'une des plus répandues dans le monde. Elle donne une courbe enveloppe (seuil inférieur de pluie nécessaire au déclenchement des laves torrentielles) basée sur une septantaine de cas tirés de la littérature. Elle lie l'intensité pluviale, I_{pc} (en [mm/h]) à la durée des précipitations D_u (en heures) par la relation :

$$I_{pc} = 14.82 D_u^{-0.39} \quad (3.3)$$

Les conditions d'élaboration de cette formule sont les suivantes :

- *Climat* : monde.
- *Données* : 73 événements.

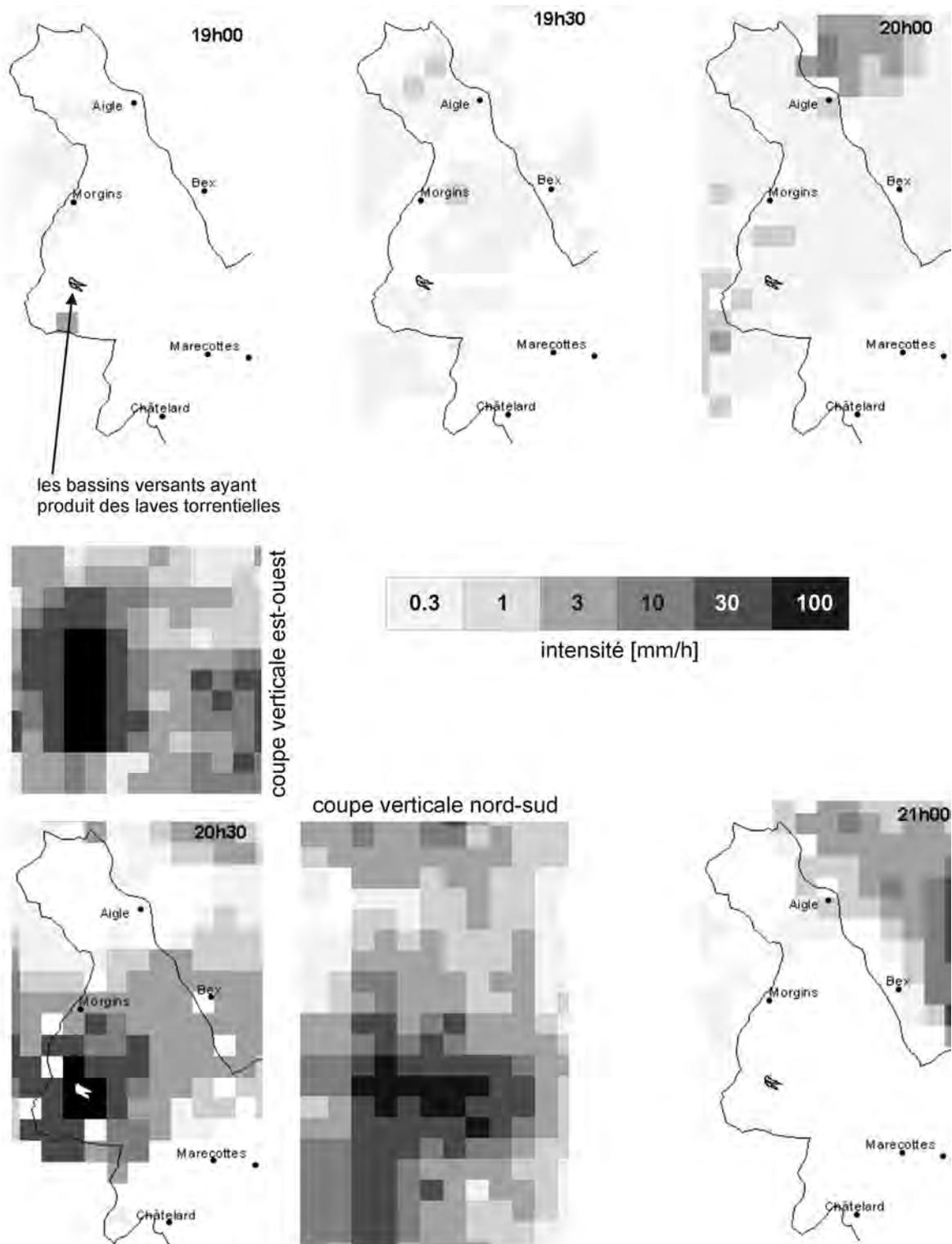


Figure 3-9: Images radar de l'averse du 8 août 1999 ayant déclenché des laves torrentielles sur la commune de Champéry. Les bassins versants concernés sont représentés par la tache noire au centre de l'image (en blanc sur l'image de 20h30). Les pluviomètres ISM sont indiqués par des points avec leur nom. Source des données ISM.

La plage d'utilisation finale, après élimination des valeurs de longue durée, va de 10 minutes à 10 jours (Caine, 1980).

Plusieurs reproches peuvent être faits à l'encontre de cette formule. D'une part elle ne tient pas compte des pluies antécédentes. D'autre part, l'homogénéité des données n'est pas assurée :

- Caine ne donne pas la durée à laquelle se rapporte l'intensité. Est-ce l'intensité horaire maximum observée durant l'averse, ou l'intensité moyenne sur la durée totale ?
- Il paraît peu judicieux de mélanger les caractéristiques des pluies provenant de zones climatiques différentes. Caine utilise des données provenant de zones tropicales (Tanzanie, Inde, Hong Kong), de zones tempérées (Alpes, Appalaches), de zones continentales (Tatras, Carpathes), de zones subarctiques (Scandinavie, Alaska) ou encore de zones subdésertiques (sud de la Californie).
- Parmi les événements cités par Caine, tous ne sont pas des laves torrentielles. Il y a aussi des glissements de terrain rapides et d'autres mouvements de masses.

Finalement sur la plage de durée allant de 10 à 100 minutes, les intensités qui y sont associées sont très inférieures aux intensités de temps de retour une année, comme le montre la figure 3-10. Ce seuil est trop faible pour la Suisse et va à l'encontre des observations faites à ce jour.

3.4.2. Formules de Zimmermann et al.

Reprenant la même méthode que Caine, Zimmermann et al. (1997) ont mis au point deux formules valables pour les Alpes suisses. Ces deux formules ont été développées suite à l'analyse des pluies ayant ou non déclenché des laves torrentielles. Elles lient l'intensité pluviale critique I_{pc} (en [mm/h]) à la durée des précipitations D_u (en heures) avec un seuil valant pour les Alpes centrales :

$$I_{pc} = 21 D_u^{-0.72} \quad (3.4)$$

et pour la bordure des Alpes (les Préalpes) :

$$I_{pc} = 32 D_u^{-0.7} \quad (3.5)$$

Les conditions d'élaboration de ces formules sont les suivantes :

- *Climat* : Suisse.
- *Données* : 113 cas regroupant événements et **non-événements** mesurés par radar.

Deux mises en garde sont nécessaires quant à l'établissement de ces formules. Premièrement l'information sur les pluies provient de données radars avec les limitations qui ont été énoncées plus haut. Deuxièmement, l'analyse a été faite que sur les laves torrentielle ayant provoqués des dégâts¹. Ces seuils ne résultent donc pas d'une compréhension du déclenchement, mais de l'apparition de dégâts sur un torrent donné. Il est difficile d'extrapoler leur signification à d'autres bassins versants.

1. Dans un même torrent il peut y avoir des laves torrentielles qui ne font pas de dégât, mais qui sont à la limite d'en faire. De tels événements ont pu se déclencher pour des pluies identiques à celles observées pour les événements ayant fait des dégâts, ou des pluies plus faibles. Cette lacune dans les chroniques est une limite pour l'utilisation de ces formules.

3.4.3. Discussion des formules proposant un seuil global

Ces formules sont-elles utilisables ? La comparaison des résultats obtenus par ces formules avec quelques données de pluie ayant déclenché des laves torrentielles, et qui n'ont pas servi au calage de ces formules, est donné à la figure 3-10.

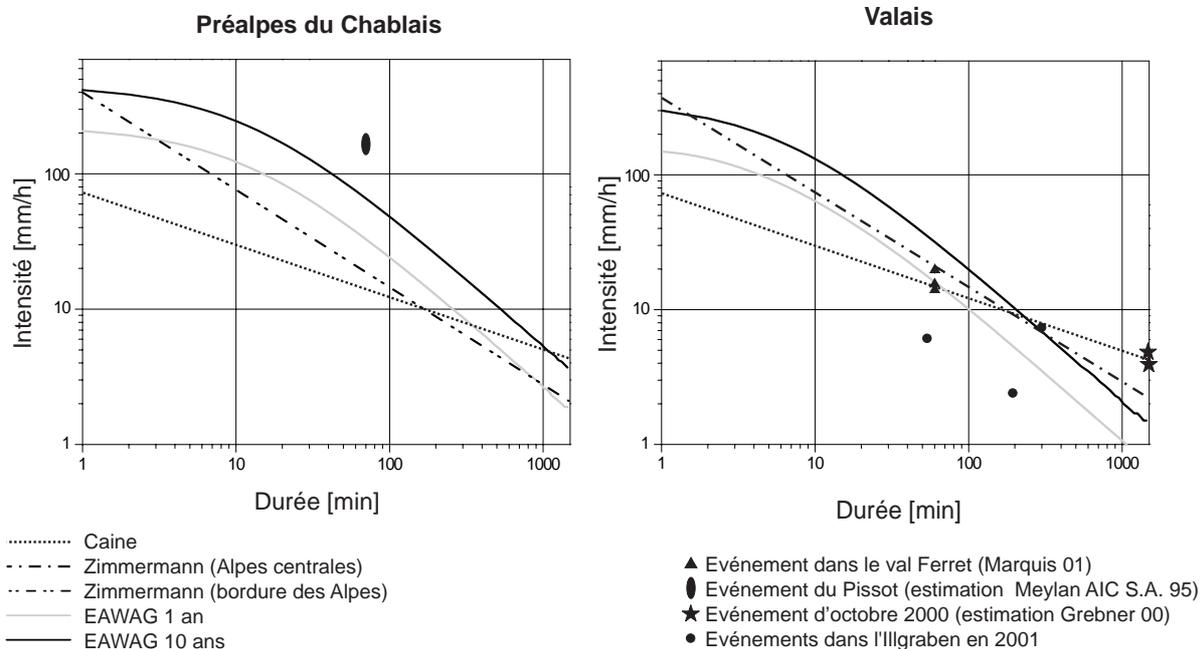


Figure 3-10: Seuils de déclenchement pluviométriques de Caine et de Zimmermann, comparé aux courbes Intensité-Durée-Fréquence du Chablais et du reste du Valais (sans les Alpes bernoises) calculées par la formule de l'EAWAG¹, ainsi qu'aux données de (Meylan AIC S.A.1996, Marquis 2001, Grebner et al. 2000)

3.4.3.1. Pour le Valais (Alpes centrales)

Les données provenant du Val Ferret se trouvent entre le seuil donné par Caine et celui donné par Zimmermann et al. Comme la station de mesure se trouve 600 m plus bas que les zones de déclenchement, on peut supposer que les pluies réellement responsables des déclenchements sont plus intenses (cf. § 3.3.3.1.). Il semble donc que dans ce cas le seuil de Zimmermann et al. est le mieux adapté.

De plus pour une durée comprise entre 2 et 110 minutes, le seuil de Zimmermann est compris entre les pluies de temps de retour 1 an et 10 ans. Ce paramètre des précipitations semble être corroboré avec les observations. Dans le cas du seuil de Caine, les pluies incriminées d'une durée inférieure à 60 minutes ont un temps de retour très inférieur à 1 an ce qui ne correspond pas aux observations.

En rajoutant sur le diagramme de droite les caractéristiques des pluies ayant déclenché des laves torrentielles dans l'Ilgraben, un bassin versant aux prédispositions importantes (cf. **figure 1-9**), il apparaît que ce sont des pluies d'un temps de retour relativement faible qui sont responsables du déclenchement.

1. La formule de l'EAWAG est en fait la formule de Talbot adaptée à la Suisse, elle s'écrit $I_p = \frac{K}{B + D_u}$ où K est un paramètre lié au temps de retour et au lieu, et B est un paramètre lié au lieu (SNV 640-350).

Pour des bassins versants ne présentant pas des prédispositions trop importantes, il semble que le seuil donné par Zimmermann et al. (1997) soit le mieux adapté pour le domaine alpin.

3.4.3.2. Pour le Chablais (bordure des Alpes)

Peu de données existent permettant de valider ces seuils. Seules les précipitations ayant déclenché une lave torrentielle dans le Nant du Pissot (diagramme de gauche sur la figure 3-10) montrent qu'il faut des pluies très importantes. Le faible nombre d'événements répertoriés dans le Chablais par rapport à des caractéristiques de précipitations plus intenses (selon EAWAG) indique que le cas du Nant du Pissot n'est peut être pas un cas particulier. Les observations faites dans le terrain corroborent le fait qu'il faille un seuil légèrement plus faible pour déclencher une lave torrentielle.

Il est à noter que, les événements de bordure des Alpes utilisés par Zimmermann et al. proviennent tous du front nord des Alpes suisses. La géologie y est particulière et légèrement différente de celle rencontrée à la bordure ouest des Alpes valaisannes (Chablais). Cette différence peut expliquer une différence sur le seuil pluviométrique nécessaire pour générer une lave torrentielle (cf. par exemple la figure 3-13).

3.4.3.3. Synthèse

Il ressort de l'analyse de ces formules, qu'une régionalisation des paramètres pluviométriques aboutissant à un déclenchement de lave torrentielle est nécessaire. Cette régionalisation devrait être faite parallèlement à une estimation des prédispositions géologiques du bassin versant (cf § 4.7.4).

3.4.4. Seuil de déclenchement pour les pluies convectives

Zimmermann et al., ont fait une analyse en ne gardant que les pluies de type convectif uniquement, qui ont déclenché des laves torrentielles. La figure 3-11 résume cette analyse. En plaçant de tels événements sur un diagramme $P_{\text{tot}} : I_{\text{max}}$ trois zones ont pu être définies (par ajustement visuel) :

- la zone A, où le volume et l'intensité concomitantes des pluies ne peuvent pas déclencher de laves torrentielles.
- la zone B, où le volume et l'intensité concomitantes des pluies ayant causé des déclenchements et celles n'en ayant pas causé se chevauchent. Cela pourrait correspondre, dans une optique de suivi, à une zone de pré-alerte.
- la zone C, où le volume et l'intensité concomitantes des pluies déclenchent toujours une lave torrentielle. Ce qui correspondrait à une zone d'alerte maximum.

En plaçant sur le même graphique des pluies enregistrées dans le val Ferret (Marquis 2001) et dans le bassin versant de l'Ilgraben, il apparaît que certains déclenchements de laves torrentielles ont eu lieu pour des pluies de la zone A¹. De même les événements convectifs survenus dans l'Ilgraben en 2001 se retrouvent dans la zone A. Toutefois ces précipitations du Val Ferret présentent une structure similaire, définissant une zone B' et une zone C' (en gris sur la figure). Ces comparaisons montrent qu'un tel diagramme devraient être régionalisé pour rendre compte des prédispositions particulières d'une région, voire même établi pour un bassin versant particulier.

1. Attention, les informations sur les pluies proviennent dans ce cas d'un pluviomètre et non des radars (homogénéité des données ?). La même source d'erreur que dans les données de Zimmermann et al. existe au niveau de la définition d'un événement (liée aux dégâts et non au déclenchement).

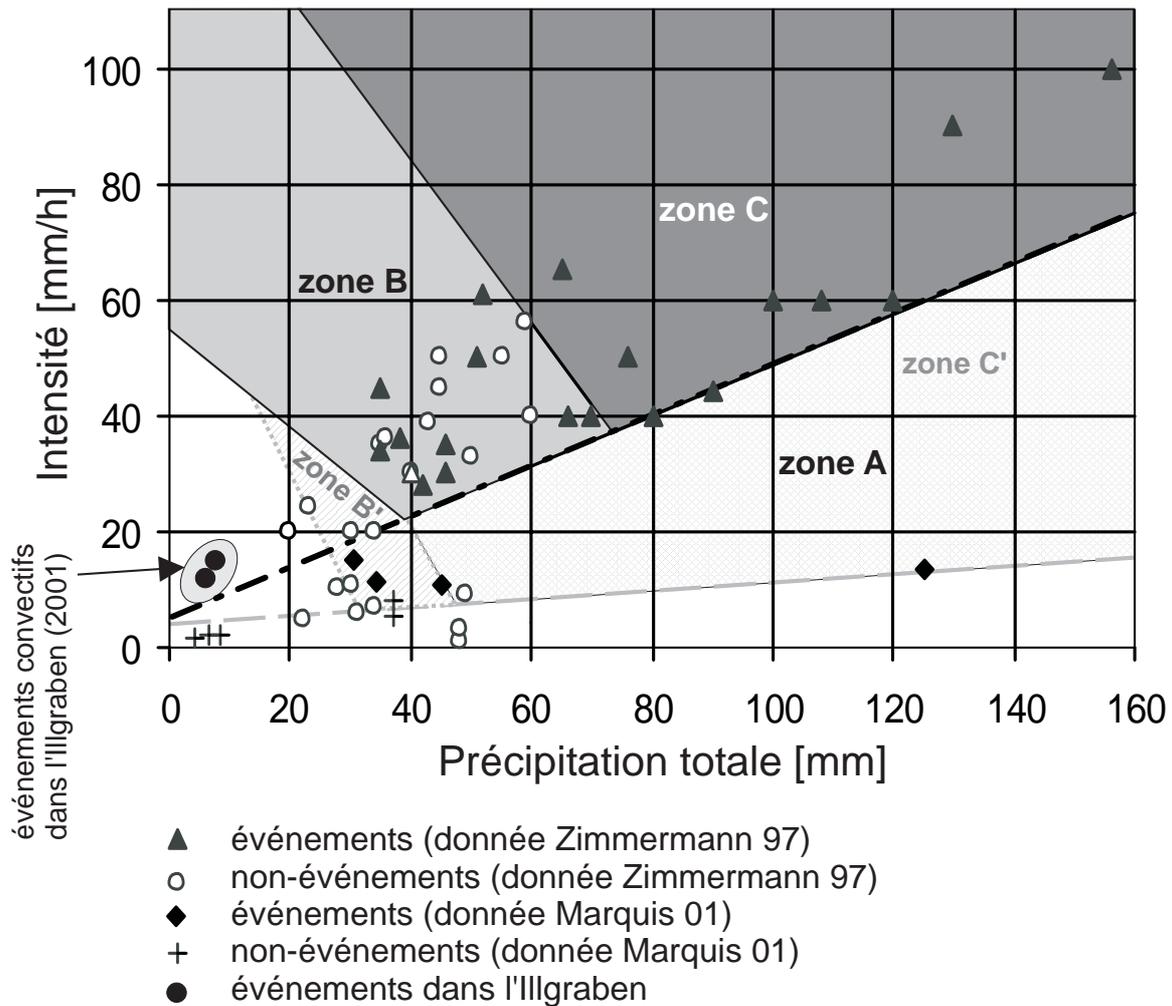


Figure 3-11: Caractéristiques des pluies inférieures à 1 heure, supposées convectives, ayant déclenché (ou pas) des laves torrentielles. La séparation entre les événements et les non-événements a ainsi une signification statistique non négligeable.

L'analyse proposée ne tient compte de la composante *eau* que sous son aspect précipitation (image instantanée). Pourtant, comme le suggère la figure 3-12, l'état hydrique du bassin versant (fonte de neige ou période pluvieuse) est tout aussi important.

3.4.5. Seuil de déclenchement pluviométrique et état hydrique antécédent

Wang et Shao (2000) ont montré, pour des torrents proches de Beijing (Chine), qu'on pouvait aussi assurer une bonne séparation entre les pluies provoquant des laves torrentielles et les pluies n'en provoquant pas, en comparant les intensités pluviales avec la pluie antécédente, soit la somme de pluie sur les 15 derniers jours (cf. figure 3-12). Cet exemple est donné à titre indicatif et reporté tel qu'il est présenté par ses auteurs.

Un tel diagramme devrait être établi pour un bassin versant (ou tout du moins régionalement) afin de pouvoir suivre l'évolution du danger de déclenchement de laves torrentielles au cours du temps. Les remarques faites en début de chapitre montrent qu'il n'est pas judicieux d'utiliser l'indice de précipitation antécédente (IPA) sans adaptation au milieu de

montagne. Des comparaisons avec des mesures hydrogéologiques devraient être faites, pour tester le calcul de l'IPA (Jaton 1978).

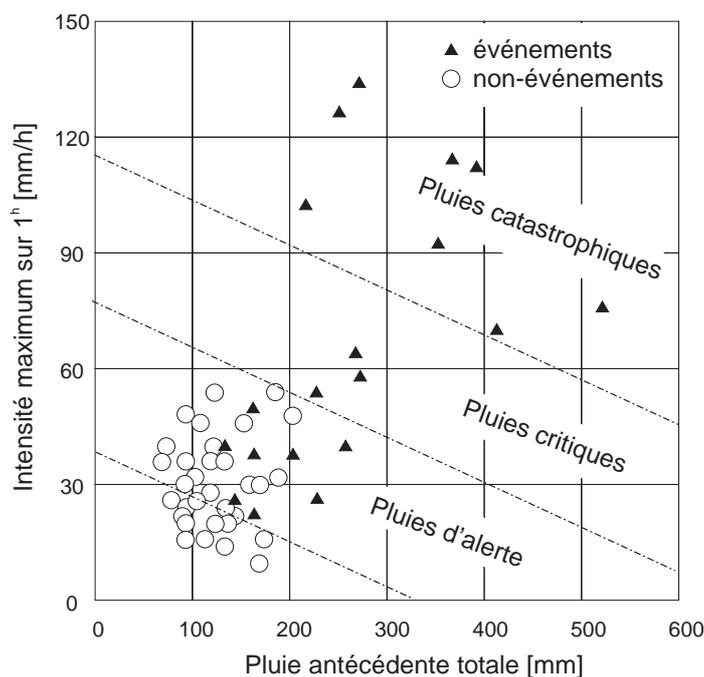


Figure 3-12: Seuils d'alarme pluviométriques valables pour la région de Beijing (Wang 2000).

L'importance de la quantité d'eau contenue dans le bassin versant est un paramètre clé dans la prédiction du déclenchement d'une lave torrentielle. Par exemple, dans le cas de l'Illgraben (VS), on peut voir sur le graphique de gauche de la figure 3-13, que 8 événements sur 42 (soit 20% des événements connus sur la période 1932-2000) ont eu lieu sans qu'aucune pluie n'ait été enregistrée à l'un des trois pluviomètres entourant le bassin versant. Plus de 60% des événements ont eu lieu pour des pluies de temps de retour inférieur à un an. De plus (cf. graphique de droite) l'événement le plus important en taille correspond à une pluie très faible (~4 mm/j à Sierre).

Cet exemple peut illustrer deux phénomènes : soit ce sont des pluies très ponctuelles, non détectées dans les pluviomètres voisins, qui sont responsables du déclenchement, soit, ce sont des pluies qui sont tombées sur un sol déjà passablement humide. L'analyse des données de la station de Grimentz, la plus représentatives à l'échelle journalière, laisse supposer qu'il s'agit plutôt de la deuxième hypothèse.

Si la représentativité des stations n'est peut-être pas optimale pour chaque averse, il n'en reste pas moins que pour les pluies comprises entre 1 mm/j et 30 mm/j la concordance entre les trois stations semble indiquer qu'il s'agissait d'événements de type frontaux. Pour les pluies inférieures à 2 mm/j on ne peut pas exclure un effet local. Cependant comme il s'agit de pluviométrie journalière, et que l'expérience montre que si des pluies convectives se développent sur l'Illgraben, elles se développent aussi sur Grimentz ou Hérémence (à un instant différent), il est possible que ces déclenchements soient dus à la fonte des neiges.

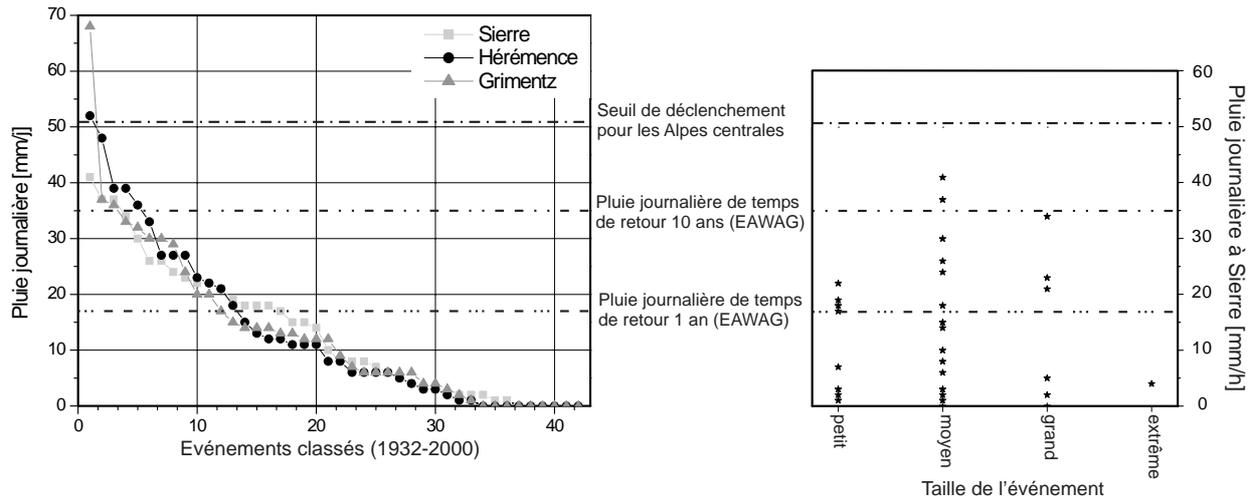


Figure 3-13: Analyse des pluies ayant provoqué des laves torrentielles dans l'Ilgraben. A gauche, on compare les pluies journalières des trois stations les plus proches avec les événements correspondants dans l'Ilgraben. A droite, on compare les pluies de la station la plus proche avec la taille des événements déterminée en fonction des volumes déposés (adapté de Zimmermann, 2000).

En effet les observations faites dans la partie supérieure du torrent montrent que la fonte de neige joue un effet prépondérant. L'activité y est quasi quotidienne pendant les jours de grand soleil en été. De grandes masses d'éboulis glissent sur la vieille neige d'avalanche qu'ils ont recouverte. Sous l'effet du rayonnement solaire, la neige fond et une grande quantité d'eau est alors disponible. Bien que l'Ilgraben soit un torrent particulier (l'un des plus actifs de Suisse), cette combinaison entre neige et éboulis se retrouve dans d'autres torrents (cf. figure 3-14).

Le diagnostic de la composante eau d'un bassin versant ne peut pas se baser uniquement sur les données pluviométriques. Même si l'acquisition de ces données peut être améliorée (cf. partie introductive de ce chapitre), le déclenchement de laves torrentielles doit être expliqué en intégrant d'autres processus. La connaissance du bilan hydrologique adapté aux zones de montagnes, avec l'influence des changements d'état de l'eau, prend ici tout son sens. La méthodologie proposée devra concevoir le diagnostic dans une optique dynamique, en tenant compte des changements saisonniers et du réchauffement climatique (Bonnard et Noverraz 2001).



Figure 3-14: Lave torrentielle due à la fonte, vallée de Hunza (Pakistan)

3.5. Conclusion

L'eau et les laves torrentielles sont liées : soit par des pluies de forte intensité (dues à un phénomène orageux ou convectif); soit par des pluies de longue durée (dues à un phénomène frontal ou de barrage météorologique); soit par de l'eau de fonte de neige ou de glace contenue dans le sol, soit par des effets hydrogéologiques; ou encore par des sources ponctuelles, rupture de lacs pro-glaciaires, rupture de conduites, etc. Le plus souvent une combinaison de ces divers phénomènes intervient dans le déclenchement des laves torrentielles.

Les modèles testés font tous intervenir au moins la pluie (suivant diverses variables, quantité, durée, intensité). Pour cette raison et en fonction des observations faites durant ce travail, il a paru nécessaire de donner au praticien les moyens d'évaluer si la relation entre un déclenchement et les données pluviométriques disponibles est fortuite ou pas.

Les modèles testés montrent des résultats difficilement utilisables en l'état. Entre autres le lien entre les précipitations et les laves torrentielles n'a de sens que s'il se fait sur la base du type pluies (*i.e.* convectives ou frontales). Les résultats des modèles sont améliorés si on y introduit d'autres variables (comme la pluie antécédente). Par contre, les résultats sont péjorés par la qualité des chroniques, car celles-ci ne comportent généralement qu'une partie des événements, ceux qui ont causé des dégâts.

L'amélioration de ces modèles passe par une meilleure estimation : des caractéristiques des pluies (par exemple en combinant radars et pluviomètres) et du contenu hydrique des

bassins versants (hauteur de la nappe, pluie antécédente); soit la création d'une base de données sur les événements.

Cette base de donnée doit prendre en compte un maximum d'événements, même ceux qui n'ont pas causé de dégâts. Elle doit aussi contenir une estimation du phénomène météo-hydrologique prépondérant.

L'analyse de données pluviométriques de meilleure qualité et de données quantitatives sur les variables hydrologiques du bassin versant, combinée avec une chronique des événements plus complète et reliée avec les événements météo-climatiques correspondant permettra d'envisager des modèles plus performants.

"La main qui a modelé la plus haute montagne du monde s'est impatientée en la réalisant, elle a froissé la terre, lui a donné un aspect colérique de sourcils froncés"

René Dittert

Chapitre 4

Liens entre le bassin versant et les laves torrentielles

4.1. Introduction

Le but de ce chapitre est de relier certaines des caractéristiques des laves torrentielles (par exemple le volume) à des caractéristique mesurables sur le bassin versant (par exemple la surface). En effet, il existe un lien, pas toujours évident, entre les laves torrentielles et le bassin versant, que ce soit par les formes de ce dernier, modelées par les divers agents érosifs, glaciers, eau, etc. (le bassin versant est alors l'image du passé), ou que ce soit par les pentes, les éboulis, les types de roche, etc. (le bassin versant est alors l'image de l'avenir). Dès lors, comment établir ce lien ? Quelles caractéristiques peuvent être retenues pour le diagnostic du bassin versant ? Comment transformer l'impression du praticien en quantités ? Un corollaire du but de ce chapitre est de transformer l'appréciation subjective du praticien en valeur quantifiée (de façon ordinale ou cardinale).

Pour pouvoir tester les différents outils, des torrents ont été sélectionnés sur le territoire du canton du Valais. Les critères choisis permettent une bonne représentativité des bassins versants par rapport au Valais, mais aussi par rapport aux Alpes européennes. Une appréciation de la dangerosité de chacun des bassins versants a ensuite été formulée. Cette étape a permis de créer une mini-base de données nécessaire pour tester : les outils permettant de qualifier la propension d'un torrent à produire des laves torrentielles; les formules permettant d'estimer le volume d'une lave torrentielle.

Pour un bassin versant donné, il se peut qu'aucun événement ne survienne durant une période assez longue. C'est le cas de certains torrents instrumentés où il ne s'est rien passé pendant plus d'une demi-douzaine d'années (cas du Dorfbach en Valais, ou de la Ravoire en Savoie). De ce fait une analyse documentaire est parfois le seul moyen d'approcher les caractéristiques d'hypothétiques événements. C'est la raison de l'intérêt des outils présentés ici, même si certains sont relativement simples.

4.2. Sélection des bassins versants

Le territoire qui a servi pour l'échantillonnage se limite au canton du Valais. Il a fallu faire la pesée entre les possibilités logistiques (travail à fournir) et la représentativité (ne pas traiter un cas particulier). Comme le fil conducteur de ce travail est une compréhension phénoménologique, cela implique une vision orientée sur le danger (le phénomène est pris pour lui-même) et non pas sur le risque (le phénomène est pris par rapport à l'homme). Ainsi l'intensité a été déterminée par rapport au bassin versant et non pas par rapport aux dégâts potentiels.

Les paysages et la géologie rencontrés sur la zone d'étude sont variés. Un échantillon réparti de façon homogène assure ainsi une bonne représentativité. Cette variabilité permet aussi une extrapolation des résultats à un territoire plus étendu. Cependant cette diversité induit un niveau de précision inférieur que celui obtenu pour des études se concentrant sur un terrain particulier (flysch ou terre noires par exemple).

4.2.1. Généralités

Le territoire étudié s'étend sur 5'300 km². Sur cette surface, 40 bassins versants (ou torrents) ont été choisis en respectant :

- une répartition géographique uniforme sur la surface du canton du Valais
- une répartition équitable entre les diverses zones climatiques
- une appartenance aux diverses unités géologiques
- une représentation des diverses classes d'activité

Ces bassins versants ont été eux-même subdivisés en 126 sous-bassins versants. La figure 4-3 donne une vue synoptique des surfaces composant cet ensemble. L'annexe 7 fournit une liste exhaustive de ces sous-bassins versants. C'est sur cet échantillon que seront choisis les torrents à tester (au nombre de 30, cf. tableau 4-1). A cet ensemble viendront se rajouter quelques autres torrents ayant produit des laves torrentielles au cours de l'étude. Au vu de l'agencement structural de la géologie en Valais, une répartition spatiale uniforme (cf. figure 4-1) garantit déjà un échantillon non biaisé au niveau de la morphologie et des constituants du bassin versant.

Que représente cet échantillon sur le plan des bassins versants où des laves torrentielles sont possibles ? Si on soustrait de la surface du canton les zones glaciaires et les lacs, les zones de plaine et les zones de roche massive, on obtient une estimation de la surface maximale pouvant présenter un potentiel de production de laves torrentielles. Toutefois, l'activité des torrents y est très différenciée et cette partition surestime le nombre de surface productrice.

Comme le montre la figure 4-2, l'échantillon de base représente un peu plus du 4% de la surface potentiellement instable. C'est à la fois peu et beaucoup au vu du travail nécessaire. Malgré tout, parmi les 126 bassins versants, un deuxième échantillonnage a été nécessaire d'un point de vue logistique. Les critères de ce deuxième échantillonnage étaient :

- la surface topographique minimale, maximale, moyenne (cf. paragraphe 4.3.1)
- le coefficient de forme du bassin versant, minimal, maximal, moyen (cf. 4.4.1)

Cet échantillon a été complété par les bassins versants où des événements ont pu être directement observés durant l'étude.



Figure 4-1: Distribution des bassins versants de base de cette étude. Les bassins versants sont représentés en blanc.

Afin de pouvoir valider les outils présentés, il fallait dès le début du travail identifier l'intensité de l'activité sédimentaire d'un torrent sans utiliser des paramètres utilisés plus tard dans les modèles.

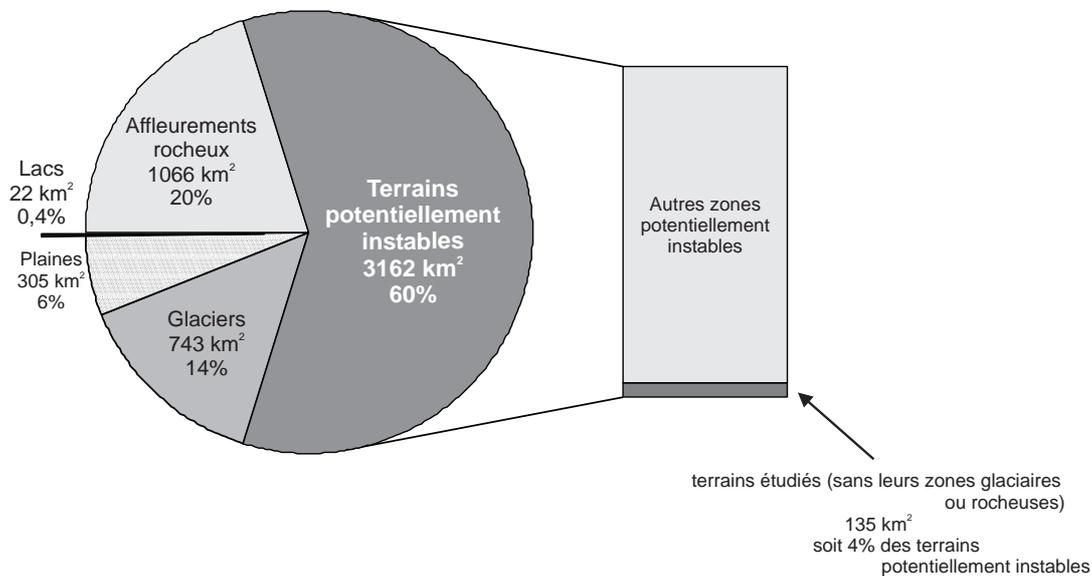


Figure 4-2: Répartition des types de surface en Valais (source Office Fédéral de la Statistique)

4.2.2. La dangerosité

Pour définir l'activité sédimentaire d'un bassin versant à laves torrentielles, je vais utiliser le terme de dangerosité. Elle est définie dans le cadre de ce travail, comme :

La dangerosité : terme, d'origine médicale¹, détermine le caractère plus ou moins prononcé du danger. Dans ce travail, elle est rapportée au bassin versant en agrégeant l'intensité potentielle à la probabilité d'occurrence des laves torrentielles pouvant s'y produire. Elle sera ici utilisée pour qualifier l'aléa.

D'autres termes relatifs à l'analyse des dangers naturels seront utilisés, voici un rappel les concernant :

Le danger : phénomène qui compromet l'existence (ou la sûreté) des personnes, des animaux ou des choses. Une lave torrentielle est un danger.

L'aléa : qualification du danger, auquel on rattache une probabilité d'occurrence et une intensité. Une lave torrentielle est un aléa.

L'intensité : c'est l'ampleur d'un phénomène. Par exemple : dans le domaine des avalanches de neige, cette ampleur est définie par une énergie (OFF-ENA 1984). Pour les laves torrentielles, il est très difficile de calculer une énergie en un point donné. On se base alors sur leur volume, leur viscosité, leur vitesse, ou leur section d'écoulement, suivant le problème étudié (cf. chapitre 6). Selon les recomman-

1. Larousse ⇒ Dangerosité; n.f.; **1.** Fait d'être dangereux, caractère dangereux que présente qqch. **2.** PSYCHIATRIE. Etat (d'un sujet) estimé comme probablement dangereux.
Petit Robert ⇒ Dangerosité; n.f.;1969; de dangereux; DIDACTIQUE. Le caractère dangereux. La dangerosité d'une maladie.

dations officielles, l'intensité à posteriori est définie par la hauteur des dépôts et la vitesse (Loat et Petrascheck, 1997)

Le risque : c'est le potentiel de destruction d'un danger croisé avec sa probabilité d'occurrence.

La menace : c'est le danger se rapportant très concrètement à une situation précise ou un objet précis.

La probabilité d'occurrence : c'est la fréquence d'apparition du phénomène au cours d'une période donnée.

Afin de déterminer la dangerosité sans utiliser des paramètres utilisés ultérieurement dans les outils présentés, plusieurs étapes ont été nécessaires. Premièrement un inventaire des événements observés durant l'étude a été établi. Ces événements ont pu être regroupés en cinq catégories :

- A) celle où les laves torrentielles débordent du chenal avec une hauteur et une vitesse suffisantes pour causer des dégâts;
- B) celle où les laves torrentielles débordent du chenal avec une hauteur et une vitesse insuffisantes pour causer des dégâts, mais dont la fréquence rend toutes activités humaines impossibles dans la zone touchée;
- C) celle où les laves torrentielles débordent du chenal avec une hauteur et une vitesse insuffisantes pour causer des dégâts et avec une fréquence rendant possible (soutenable) une activité humaine;
- D) celle où les laves torrentielles ne débordent pas du chenal mais dont la fréquence induit des changements du chenal ou des érosions de berges importantes, qui rendent toutes activités humaines problématiques à proximité du chenal;
- E) celle où les laves torrentielles ne provoquent pas de problème majeur ou bien où elles ne sont pas présentes.

En hiérarchisant ces événements sur une échelle ordinale en trois classes (dangerosité forte, notée 3; moyenne, notée 2; faible, notée 1). Les deux premières catégories d'événements ont été regroupées dans la classe de dangerosité élevée; les deux suivantes dans la classe de dangerosité moyenne; la dernière catégorie dans la classe de dangerosité faible.

L'étape suivante a consisté à choisir les paramètres permettant de placer les bassins versants retenus dans l'une de ces trois classes. Les paramètres retenus sont les suivants :

- le cône fluvial présente des traces de laves torrentielles répétées correspondant à des événements d'âge s'étalant entre le début et la fin du XX^{ème} siècle. Ce paramètre permet d'approcher la probabilité d'occurrence (combien d'événements des catégories 1 et 3 sont apparus dans les 50 dernières années¹). Le codage suivant a été adopté :

1. Ce paramètre n'est pas toujours pertinent. Il se peut en effet, que les dépôts des laves torrentielles soient érodés par l'**émissaire** et donc pas toujours visibles. En Valais c'est par exemple le cas du torrent du Mauvoisin, ou du Ritigraben, qui ont (ou ont eu) une forte activité sans laisser de cône important.

oui →	3
traces plus anciennes, ou de date inconnue trace unique →	2
non →	1

- le bassin versant est reconnu comme dangereux au travers de l'analyse des événements historiques. Ce paramètre donne une information sur l'intensité possible des laves torrentielles dans un bassin versant. Si un seul événement est répertorié il peut s'agir soit que les données sont lacunaires, soit qu'il peut y avoir des événements de grande ampleur, mais de fréquence rare. Le codage suivant a été adopté :

plusieurs événements connus →	3
un seul événement connu →	2
pas d'événement répertorié →	1

- l'ampleur de l'événement relativement à son bassin versant lors des événements d'octobre 2000. Ce paramètre reflète l'intensité possible des événements et l'état des prédispositions du bassin versant à ce moment. Le codage suivant a été adopté :

ampleur importante →	3
débordement ou érosion de faible ampleur →	2
peu/pas de traces visibles (charriage ?) →	1

Au terme de cette étape, les 30 sous-bassins versants retenus ont été classés en faisant la moyenne pondérée de ces trois paramètres. Les résultats obtenus ont été comparés avec la dangerosité estimée a priori. Il s'est avéré que la pondération reflétant le mieux la dangerosité des bassins versants était obtenue en donnant un poids unitaire aux deux premiers paramètres et double pour le dernier. Le résultat obtenu est donné dans le tableau 4-1.

C'est sur ces résultats que se basent les tests effectués sur les outils présentés aux sections 4.3 à 4.7. Il faut souligner que cette classification a été développée dans un but précis (cette étude) et ne peut en aucun cas être utilisée pour déterminer la dangerosité d'un bassin versant hors de ce contexte.

Tableau 4-1: Dangersité des bassins versants retenus pour l'étude.

	Altebach	Au de Mex	Batsoule	Beiterbach	Chalcheri	Challand	Drahin	Dorfbach	Fouly	Geistrifbach	Grand Torrent	Grätschlüecht	Idrou	Illgraben	Jureau
traces multiples	3	1	3	1	2	3	3	3	3	2	2	2	3	3	2
év. historiques	3	2	3	2	2	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3
dégâts	3	2	2	3	2	2	1	1	2	1	1	2	2	3	2
DANGEROSITE	3	2	3	2	2	3	2	2	3	2	2	2	3	3	2
	Lui Jaune	Merdenson (Vollège)	Merdenson (Bagnes)	Nesselbach	Péterey	Ritigraben	Ritzibach	Rufibach	Salantin	Treuste Bo	Tsiné le long	Vernette	Vésivi Nord	Vésivi Sud	Vièze
traces multiples	3	3	3	1	3	3	2	3	1	2	3	1	3	3	1
év. historiques	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	2	2	2	1
dégâts	2	2	2	2	3	3	2	3	3	2	2	1	2	2	1
DANGEROSITE	3	3	3	2	3	3	2	3	2	2	3	1	2	2	1

4.3. Caractéristiques morphologiques

Les caractéristiques morphologiques sont simples à obtenir et peuvent déjà donner une bonne information. Malgré leur simplicité, il est important de bien les définir. Par exemple, quelle surface est significative pour estimer un volume mobilisable, celle du bassin versant topographique, celle du bassin versant géologique, ou celle de la zone de production uniquement ? L'analyse des caractéristiques morphologiques se fait à une échelle qui ne correspond pas forcément à celles de certains modèles (en particulier hydrologiques).

4.3.1. La surface

Les surfaces des bassins versants ont été déterminées manuellement sur la base du plan d'ensemble à l'échelle 1:10'000. Ce travail a permis de montrer que les bassins versants sélectionnés avaient une taille comprise entre 0,1 et 4,56 km², avec une moyenne valant 1,14 km² et une médiane valant 0.88 km² (cf. figure 4-3). L'ordre de grandeur de l'unité de travail qui est à retenir pour l'analyse des laves torrentielles dans les Alpes est de 1 km².

Comme la surface intervient dans différents outils présentés ici, entre autres, le calcul du volume probable d'un événement, elle doit être déterminée avec précaution. Voici quelques recommandations :

- Il faut commencer par dessiner le bassin versant topographique. S'il se trouve dans une région karstique, il faudra déterminer aussi le bassin versant hydrologique réel. Dans le cas des laves torrentielles, les deux surfaces sont nécessaires puisque le transfert des sédiments (fines et granulats) ne peut se faire que dans le bassin versant topographique, alors que les flux d'eau peuvent se faire sur les deux surfaces.

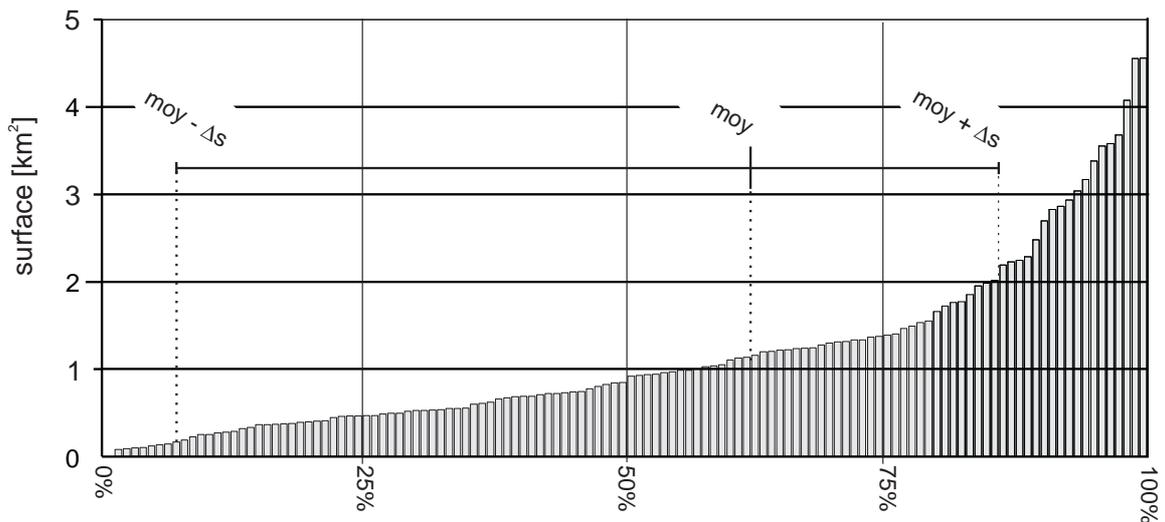


Figure 4-3: Surfaces classées des 126 sous-bassins versants retenus dans le 1^{er} échantillonnage

- Dans le cas où un cône fluviatile important s'est développé, il faudra subdiviser le bassin versant en assignant à la tête du cône le rôle d'exutoire. En effet, les éventuelles mesures de débit doivent être faites en ce point. Pour l'analyse hydrologique, il faut qu'il y ait correspondance entre la surface participative et la mesure de débit.
- Dans le cas d'un grand bassin versant composé de différents vallons, il est souhaitable de le subdiviser en sous-bassins versants de taille proche du kilomètre carré (d'où le passage de 40 bassins versants à 126 sous-bassins versants).
- Pour les bassins versants comportant des zones au fonctionnement différencié, il est nécessaire de les subdiviser en zones homogènes. Un exemple peut être donné avec le cas du Ritzibach où une combe était occupée par un éboulis nu (*Jungschutt*), tandis que l'autre était couverte de pelouse alpine (*Altschutt* cf. figure 4-4). La figure 1-9 donne un exemple similaire d'un bassin versant, l'Illgraben, où des zones très différentes vis à vis du déclenchement des laves torrentielles sont contiguës.



Figure 4-4: Haut du bassin versant du Ritzibach, avec en a) une combe plus fortement soumise à l'érosion, et en b) une combe enherbée participant faiblement à l'alimentation en sédiment du bassin versant.

On trouvera à l'annexe 7 un tableau récapitulatif des caractéristiques relevées pour chacun des bassins versants touchés par la présente étude.

4.3.2. Altitude

L'altitude est un facteur important dans le fonctionnement des bassins versants alpins¹. Comme on a vu au chapitre 3, elle influence non seulement la mobilité de l'eau, mais aussi la stabilité du sol (cf. figure 4-5). Les plantes sont aussi touchées par l'augmentation de l'altitude. Les adaptations qu'elles ont développées (petite taille, diminution de la surface évapotranspirante, etc.) diminuent leur effet stabilisant sur le sol (Körner 1999).

L'amplitude des variations climatiques augmente avec l'altitude. Ces conditions entraînent une altération plus efficace des roches. Les écarts thermiques journaliers peuvent atteindre près de 40°C. Dans ces conditions surviennent des efforts de compression (concomitant avec des efforts de cisaillement) lors du refroidissement et des efforts de cisaillement lors de l'échauffement. Ces efforts, qui se développent suite à une réaction différentielle entre la surface et les couches profondes, sont appelés thermoclastiques (Hall et Hall 1991).

Déjà mentionnés, les effets du gel de l'eau peuvent en théorie développer des efforts près de vingt fois supérieurs à la résistance des roches, si les conditions sont confinées (Bland et Rolls 1998).

4.3.2.1. Exemple de l'effet de l'altitude lors des événements d'octobre 2000

Des observations faites lors des crues de l'automne 2000 en Valais montrent une forte influence de l'altitude. Dans la semaine qui a précédé les événements, des températures négatives ont été observées dès 2000 m. Ce temps froid a fait suite à une période humide qui a fortement imbibé les sols. La formation d'aiguilles de glace (appelées généralement par leur nom suédois *pipkrake*, Delaloye 2001) dans le sol a diminué la cohésion de sa structure (au sens pédologique du terme), comme le montre la figure 4-5. La veille et le jour des événements (14-15 octobre) la limite de l'isotherme du 0°C est remontée vers 2600 à 3000 m, permettant ainsi la fonte de la glace dans la partie superficielle du sol (partie remaniée lors de la formation de la glace).

Pour illustrer l'effet de ce phénomène sur le déclenchement des laves torrentielles, des cartes croisant les informations sur les événements et l'altitude de l'isotherme ont été réalisées (cf. figure 4-6). Pour les réaliser, les valeurs de température calculées² pour chaque station, ont été interpolées. Ces interpolations ont été corrigées manuellement en fonction du relief (axe des vallées) et de la situation météorologique.

Vingt-six événements recensés (recensement non exhaustif) ont servi pour cette analyse. Ils ont été divisés en trois classes³ :

1. L'altitude peut être moins importante dans des bassins versants produisant des laves torrentielles, mais situés sous d'autres latitudes, par exemple la Californie.
2. Le calcul s'est fait sur la base de la température moyenne journalière mesurée à la station et en faisant correspondre l'altitude du 0°C avec un gradient de température de 0,6°C/100 m.
3. Ces trois classes ne comprennent que celles liées à des laves torrentielles.

- les événements d'intensité élevée anormale.
- les événements d'intensité normale.
- les événements d'intensité faible anormale.



Figure 4-5: Aiguilles de glace (pipkrake) extrudée du sol à une altitude de 2300 m dans la région de Fully (VS) le 9 octobre 2000.

Si on place ces événements sur la carte de différence d'élévation de l'isotherme 0°C, une tendance assez nette se dégage (cf. figure 4-6) :

- Les événements avec une intensité qui a dépassé les prévisions se trouvent tous (sauf deux) dans la zone où l'élévation d'altitude de l'isotherme du 0°C a été la plus forte (entre 900 et 1200 m).
- Les événements avec une intensité qui a été plus faible que les prévisions se trouvent tous (sauf un) dans la zone où l'élévation d'altitude a été la plus faible (entre 500 et 700 m).

L'analyse détaillée des bassins versants permet d'affiner cette analyse, comme le montre la figure 4-7. Sur les **courbes hypsométriques** qui y sont représentées, j'ai reporté la frange de battement de l'isotherme 0°C ainsi que la zone altitudinale où les déclenchements peuvent avoir lieu¹. Il faut se souvenir de la figure 4-5, qui montre que les sols dans la zone de dégel avaient une structure dérangée par l'apparition de pipkrakes.

1. Dans cette analyse, la zone de déclenchement préférentiel correspond à la zone où les matériaux mobilisables sont à proximité du torrent.

On peut ainsi remarquer que pour le couloir de Chalcheri, presque toute la zone de déclenchement préférentiel se trouve dans la zone qui a dégelé entre le 11 et le 14 octobre 2000. Son sol, gorgé d'eau, a été remanié par la glace, qui occupait ses pores. Ce sol avait donc une prédisposition forte.

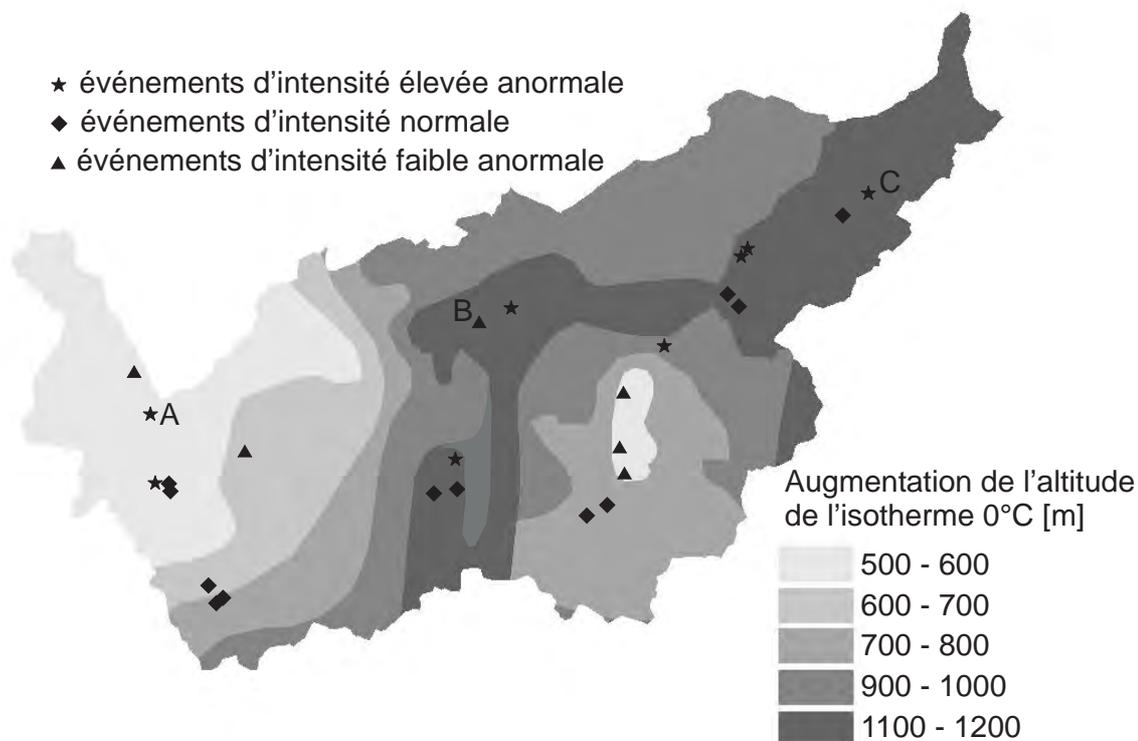


Figure 4-6: Carte de différence d'élévation de l'isotherme du 0°C entre le 11 et le 14 octobre 2000 sur le territoire valaisan. Les lettres A, B et C correspondent aux courbes hypsométriques de la figure 4-7.

Au contraire le torrent de l'Illgraben, qui se trouve dans la zone où l'isotherme est le plus remonté (1100-1200 m), mais qui n'a pas produit de lave torrentielle de grande intensité, a une zone de déclenchement préférentiel qui n'a pas subi de cycle gel-dégel.

Le cas du couloir du Salantin constitue l'exception puisqu'il a produit une lave torrentielle dont l'intensité dépassait les prévisions alors que sa zone de déclenchement préférentiel n'a pas subi de cycle gel-dégel. Dans ce cas une autre cause doit être cherchée pour expliquer le déclenchement (pluviométrique ou hydrogéologique).

Le paramètre d'altitude ne peut pas expliquer tous les déclenchements. En effet l'état des prédispositions (principalement variables) des bassins versants, ainsi que leurs influences sur le déclenchement, reste mal connu. Dans certains cas, comme le montre la figure 4-7, ce n'est pas la remontée de l'isotherme du 0°C qui est responsable du déclenchement. Cet exemple montre que le déclenchement des laves torrentielles ne peut pas toujours être expliqué à partir d'une seule cause.

Dans une optique d'un suivi des bassins versants et en vue de donner des préalertes, il serait souhaitable de suivre l'évolution hydrologico-climatique, par exemple l'ampleur des pipkrakes. De telles situations (isotherme du 0°C bas, période humide antécédente, puis remontée de l'isotherme, cf. § 3.4.5.) pourraient ainsi être prises en compte par les responsables de la gestion des risques résiduels.

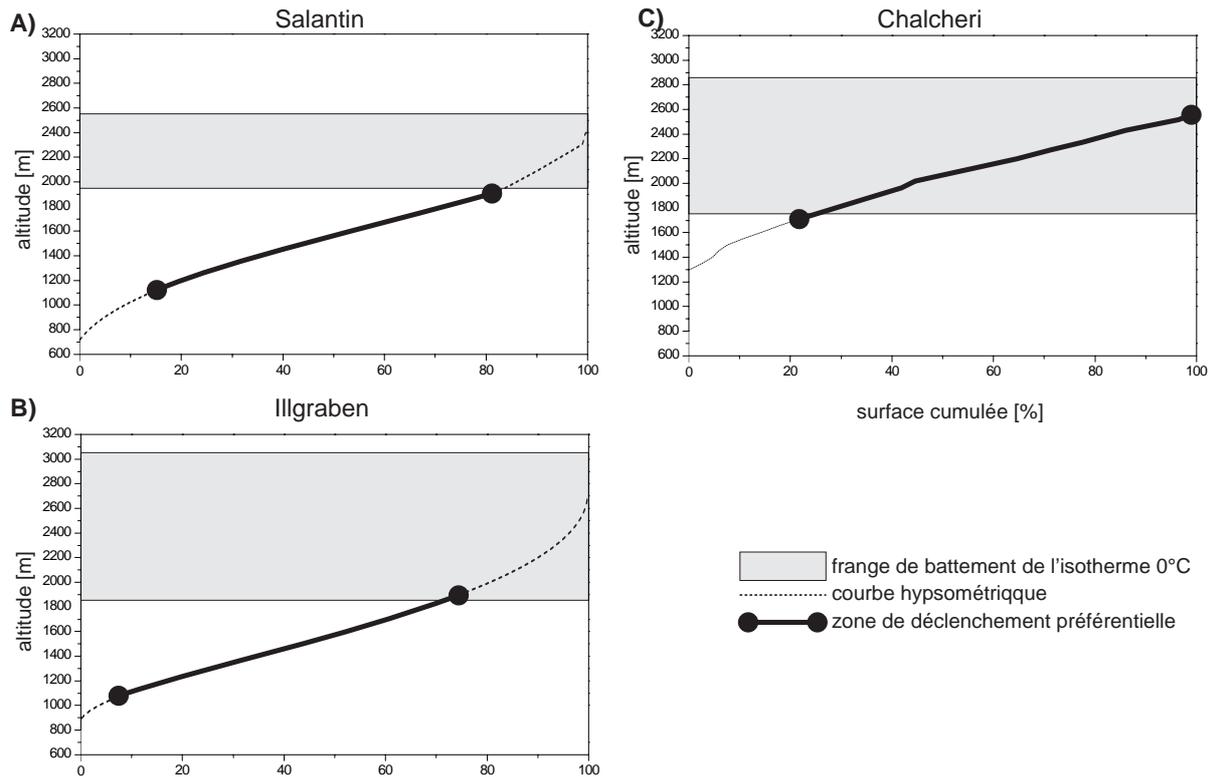


Figure 4-7: Courbe hypsométrique de trois bassins versants.

4.3.3. Relief

En 1956 déjà, Schumm avait identifié l'importance du relief d'un bassin versant - défini comme la différence d'altitude entre le point le plus bas (alt_{min}) et le point le plus haut (alt_{max}) - sur son comportement hydrologique. Plus tard, Melton (1965), a proposé un rapport adimensionnel entre le relief et la racine carrée de la surface du bassin versant A , appelé dénivelée spécifique, D_s .

$$D_s = \frac{alt_{max} - alt_{min}}{\sqrt{A}} \quad (4.1)$$

En le combinant avec la pente du cône fluviatile, J_c , Marchi et Brochot (2000) ont obtenu une séparation entre les divers processus de transport solide. Ils ont reporté les différentes valeurs de J_c et de D_s de divers torrents dont les surfaces s'étendent de 0,68 à 228 km². Ces bassins versants ont été divisés en trois classes :

- les bassins versants à laves torrentielles
- les bassins versants à charriage
- les bassins versants à comportement mixte (laves torrentielles et charriage)

Afin de pouvoir comparer les résultats obtenus par Marchi et Brochot dans les Alpes du Nord (France) avec les torrents valaisans, j'ai placé les bassins versants retenus sur le même diagramme (cf. figure 4-8). La correspondance entre les deux échantillons est bonne. On observe toutefois que les valeurs de J_c et de D_s des bassins versants valaisans ont une limite supérieure plus élevée. Ces valeurs plus élevées peuvent s'expliquer par un effet de surface. En effet, la dénivelée spécifique a tendance à être plus importante pour les petits bas-

sins versants. Les surfaces de l'échantillon¹ utilisé vont de 0.37 à 77 km². Il est possible toutefois de délimiter des zones communes (tendance identique) entre les torrents de la Maurienne et ceux du Valais.

Trois zones correspondant aux trois types de comportement apparaissent :

- la zone A, des bassins versants où seuls des événements de charriage surviennent.
- la zone B, des bassins versants à comportement mixte².
- la zone C, des bassins versants où seules des laves torrentielles surviennent.

C'est le passage entre la plage de valeurs pour lesquelles des laves torrentielles ont été observées et celles où elles n'ont jamais été observées qui intéresse le diagnostic d'un bassin versant. Cela revient à donner un seuil qui sépare la zone A de la zone B. Pour cela, j'ai établi la formule suivante sur la base d'un ajustement linéaire entre les dix événements proches de la limite :

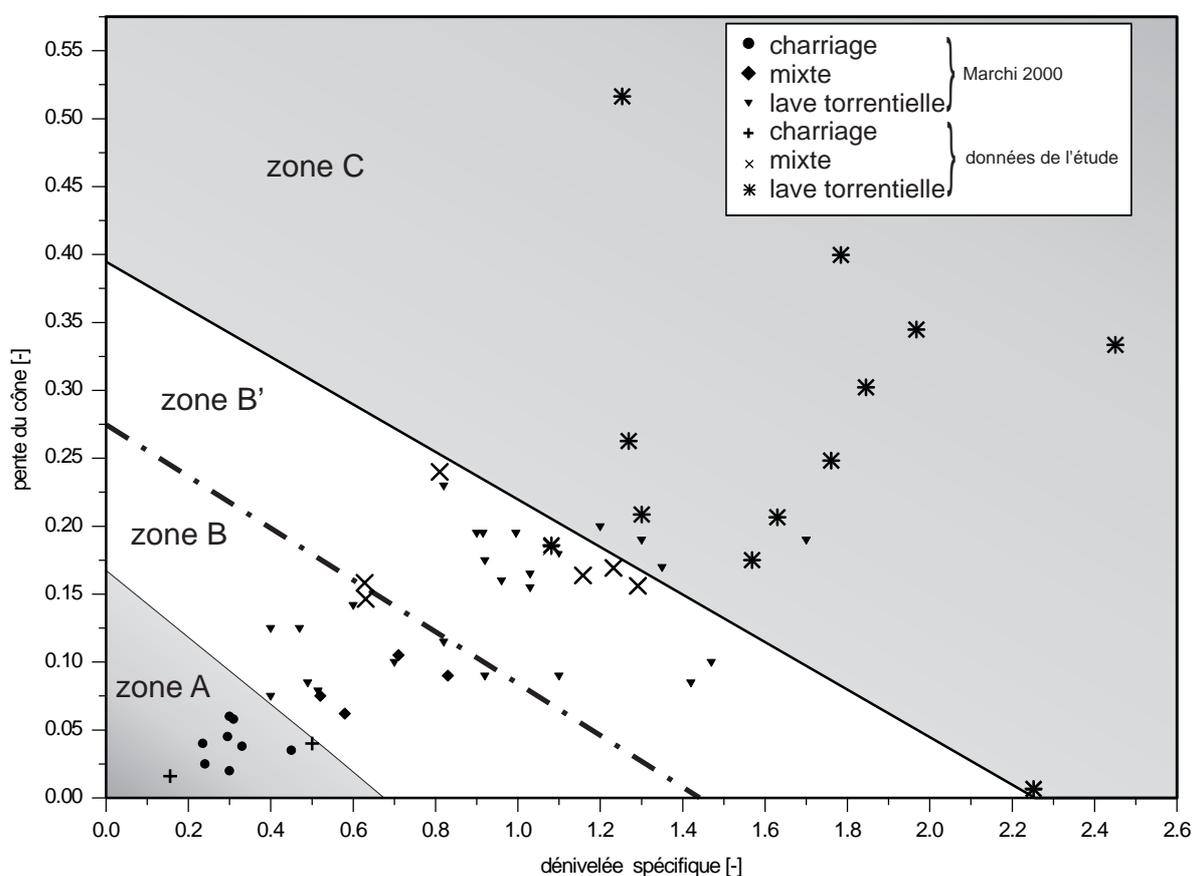


Figure 4-8: Rapport entre la dénivelée spécifique et la pente du cône fluvial (adapté de Marchi et Brochot 2000).

1. Cet échantillon est constitué des bassins versants du tableau 4-1, page 63 avec en plus les bassins versants du Baltschiederbach (44 km²) et de la Saltina (77 km²), qui représentent des torrents purement à charriage.
2. Dans cette zone on peut observer une séparation entre les données de cette étude (zone B') et celles de Marchi et Brochot (zone B). Une des explications possibles est la difficulté d'observation de ces phénomènes quand ils ne produisent pas de dégâts. Si je n'avais pas eu la chance d'observer de visu des phénomènes de charriage dans ces torrents je les aurais considérés comme des torrents, purement à laves torrentielles.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } J_c > 0,167 - 0,248 D_s \rightarrow \text{des laves torrentielles peuvent avoir lieu} \\ \text{Si } J_c < 0,167 - 0,248 D_s \rightarrow \text{seul du charriage est à redouter} \end{array} \right. \quad (4.2)$$

Une autre façon d'intégrer le relief est de représenter la courbe hypsométrique du bassin versant. En établissant la courbe moyenne pour chacun des comportements, charriage et lave torrentielle, on obtient une distinction entre les courbes (cf. figure 4-9). On peut voir que les bassins versants produisant purement du charriage (courbe en pointillé) ont un profil hypsométrique traduisant une morphologie à l'équilibre (Musy 1993). Inversément, les bassins versants ne produisant que des laves torrentielles ont un profil traduisant une morphologie plus jeune (sigmoïde moins prononcée). On peut expliquer cette différence par une diminution de l'énergie potentielle à disposition pour mettre les matériaux en mouvement (diminution de la dénivelée spécifique).

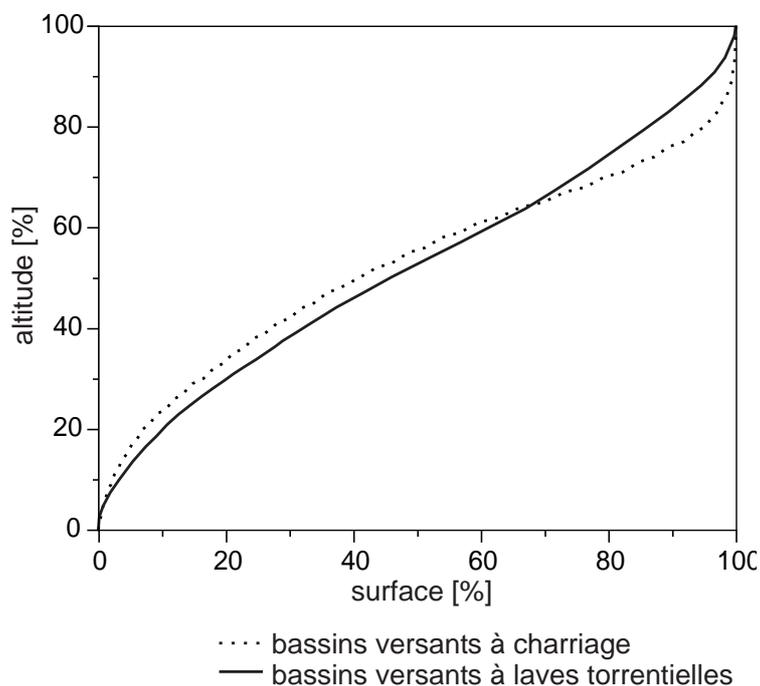


Figure 4-9: Différence entre la moyenne des courbes hypso-métriques des bassins versants purement à charriage et les bassins versants purement à laves torrentielles.

4.3.4. Pente

Il n'est pas possible de donner une valeur représentative pour la pente d'un bassin versant. La multiplicité des méthodes de calcul de la pente moyenne confirme cette difficulté (Musy 1993). Pour illustrer l'inutilité d'une telle valeur, la valeur médiane des pentes de quelques bassins versants a été déterminée. Ces valeurs sont comprises entre 29° et 39° . Aucune distinction entre la dangerosité de ces bassins versants n'est expliquée par la pente médiane.

Cependant le travail de terrain montre qu'une relation existe entre l'allure générale du bassin versant et les laves torrentielles qui peuvent y être produites. Dès lors comment intégrer cette information au diagnostic du bassin versant ? A partir de la carte des pentes (dérivée d'un MNT à résolution de 25 m), il est possible de calculer la surface développée, A_{dev} , du bassin versant. En la rapportant à la surface projetée, A_{topo} , on obtient un indice

de la distribution des pentes. Cet indice reflète l'érodibilité du bassin versant (plus la surface est disséquée, plus l'érosion a été intense).

$$I_{eros} = \frac{A_{dev}}{A_{topo}} \quad (4.3)$$

Une analyse statistique a montré qu'avec cet indice I_{eros} , on arrive à séparer les bassins versants de dangerosité 2 et 3 (regroupés ici en une seule famille)¹, des bassins versants de dangerosité 1 (cf. figure 4-10).

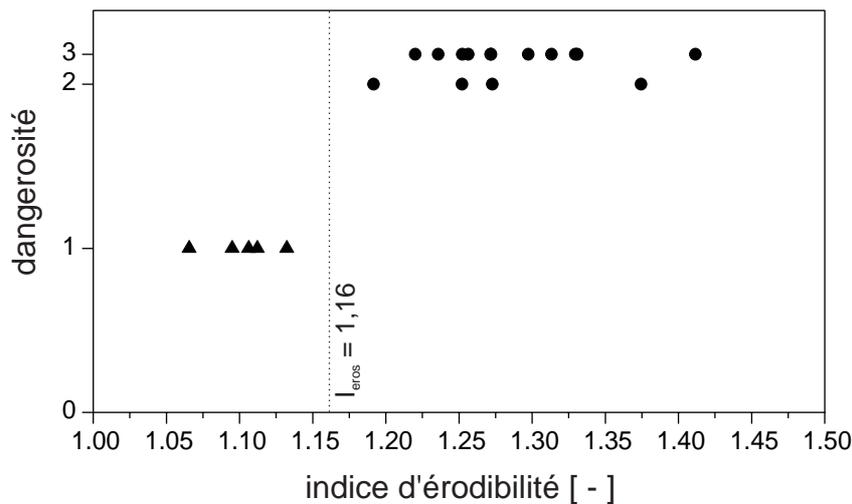


Figure 4-10: Distribution des valeurs de l'indice I_{eros} pour différentes dangerosités de bassins versants

La formule suivante peut être utilisée afin de déterminer la valeur de la dangerosité du bassin versant étudié. Elle a été établie sur la base des six bassins versants les plus proches de la limite entre dangerosité élevée et dangerosité faible.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } I_{eros} > 0,1614 \rightarrow \text{la dangerosité est élevée (des laves torrentielles peuvent avoir lieu)} \\ \text{Si } I_{eros} < 0,1614 \rightarrow \text{la dangerosité est faible (des laves torrentielles sont peu probables)} \end{array} \right. \quad (4.4)$$

Ce modèle n'est valable que dans le cadre d'une analyse préliminaire et doit être complétée par des observations de terrain et l'analyse des documents historiques.

1. Un premier essai visant à séparer les trois classes a montré que l'échantillon de dangerosité moyenne n'était pas statistiquement différent de l'échantillon de forte dangerosité. Un deuxième essai a alors été fait en regroupant ces deux classes en une seule.

4.4. Les caractéristiques hydrologiques

Les caractéristiques hydrologiques étudiées dans cette section ne sont pas directement reliées aux précipitations (cf. chap. 3) mais à la relation entre les précipitations et le débit.

4.4.1. La forme du bassin versant

La forme du bassin versant conditionne sa réponse hydrologique. Plus le bassin est allongé, plus le débit de pointe est faible et l'hydrogramme étalé. Plus le bassin est arrondi, plus le débit de pointe est élevé et l'hydrogramme concentré. L'indice de compacité donné par Gravelius (1914) est un moyen de quantifier cet effet de forme. Son calcul se fait selon la formule¹ :

$$K_g = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}} \approx 0.28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (4.5)$$

où P est le périmètre et A la surface. Il exprime le rapport du périmètre du bassin versant à celui d'un cercle de même surface. Plus K_g est grand, plus le bassin est allongé.

Une étude statistique a permis de montrer que les bassins versants de dangerosité faible et moyenne (pris ensemble) avaient un coefficient de Gravelius inférieur à ceux des bassins versants de dangerosité élevée. Cependant comme le montre la figure 4-11 la différence entre les deux moyennes n'est pas tranchée et ne permet pas de donner un seuil de dangerosité.

De plus, ce résultat est paradoxal, puisque pour des bassins versants de grande surface (> 10 km²) un K_g faible (proche de 1) induit une réponse hydrologique vigoureuse, alors qu'un K_g élevé (> 2) induit une réponse hydrologique atténuée (Musy 1993). Cette inversion de la tendance pour des petits bassins versants (ayant un **ordre** proche de 1), pourrait être expliquée par l'apparition, en tout point du talweg, du ruissellement pendant une durée relativement longue. Ce qui représente un cas plus défavorable que s'il y a apparition d'un ruissellement plus intense, mais moins étalé dans le temps. Ces observations sont à rapprocher de la notion de surface contributive.

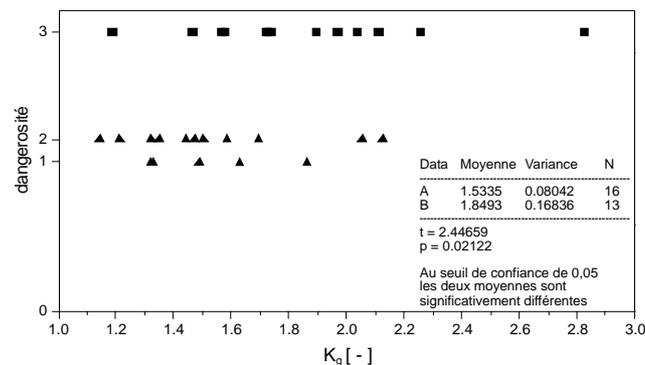


Figure 4-11: Différenciation entre l'indice de Gravelius pour les torrents de dangerosité 1 et 2, et les torrents de dangerosité 3.

1. La valeur de K_g est légèrement surestimée car les valeurs du périmètre, qui ont servi pour le calcul, sont des données brutes et non lissées provenant de la digitalisation à l'échelle 1:10'000 des bassins versants. Les contours n'étant pas trop tortueux, cela n'a pas une grande influence.

4.4.2. Réponse hydrologique du bassin versant

La réponse hydrologique du bassin versant dépend, entre autres, de la répartition des surfaces autour du torrent. La confection de courbes aire-distance est une façon de rendre compte de l'agencement du bassin versant. Ces courbes mettent en relation la distance depuis l'émissaire avec l'évolution de la surface normalisée correspondant à la surface contributive du bief concerné.

L'intérêt de telles courbes dans le cas des laves torrentielles apparaît lorsqu'elles présentent une singularité. A la figure 4-12, les courbes aires-distances de deux bassins versants permettent deux remarques :

- La courbe du Geisstriftbach montre qu'à mi-distance de l'émissaire on observe une forte augmentation de la surface. L'analyse de cette singularité montre qu'un vallon latéral, non drainé, rejoint dans le torrent à cet endroit. C'est un point faible du bassin versant qui demande une attention particulière. L'apparition d'une telle surface le long du torrent peut en effet faire craindre des problèmes hydrogéologiques pouvant conduire à un apport de matériaux importants.
- Les deux courbes du torrent de la Fouly montrent une nouvelle fois que dans le cas des laves torrentielles, il existe plusieurs surfaces d'importance. Dans le cas des bassins versants alpins, l'importance du cône de déjection est importante dans la compréhension de la dynamique globale du torrent (courbe Fouly^a présentant un caractère singulier). Cependant pour la compréhension phénoménologique du déclenchement des laves torrentielles, c'est la surface à l'amont du cône qui est importante (donnée par la courbe Fouly^b).

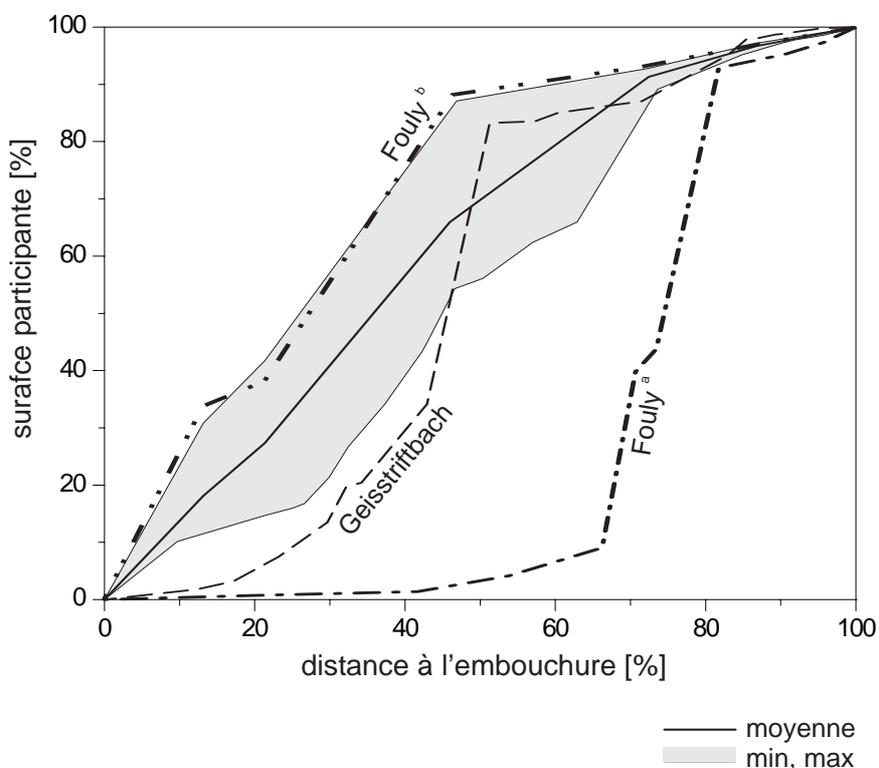


Figure 4-12: Courbe aire distance pour plusieurs bassins versants. La courbe Fouly^a représente la courbe liée au bassin versant complet (avec le cône) et la courbe Fouly^b celle relative au seul sous-bassin versant érodable (sans le cône).

L'analyse de telles courbes permet de mettre en évidence pour le non spécialiste certains points du bassin versant où des investigations supplémentaires devront être faites afin de mieux comprendre son fonctionnement hydrologico-sédimentaire.

4.5. Caractéristiques géomorphologiques

Les bassins versants alpins sont composés d'éléments géomorphologiques distincts qui les prédisposent à la production de matériaux mobilisables. Ces paramètres sont difficilement quantifiables. Ils restent pourtant intéressants car leur acquisition est relativement simple (bien que coûteuse en temps). Ils permettent aussi de se faire une bonne image du fonctionnement du bassin versant, ce qui constitue l'une des premières phases du diagnostic (cf. chapitre 7).

4.5.1. Les indicateurs géomorphologiques

Voici une liste des principaux éléments du réservoir sédimentaire (composante fine et granulat) du bassin versant, et/ou de la composante eau. Le bloc diagramme de la figure 4-13 montre l'agencement de ces divers éléments. Les explications se rapportant aux chiffres de la figure se trouvent à la page suivante.

4.5.1.1. Les éléments géomorphologiques à reporter

1. Glissement de terrain. Dans toute la zone du bassin versant où il existe un sol au sens pédologique du terme (éléments paysagers 4.1 à 7.1 selon la classification utilisée à l'annexe 2) des glissements de terrain superficiels sont possibles. Lorsqu'ils sont en connexion avec un torrent, une attention toute particulière doit être apportée lors du diagnostic. Les exemples types sont le torrent des Marais (cf. figure 4-14), les torrents de Mörel et de Filet, le torrent de la Sage.

2. Glacier rocheux. En Valais, à partir de 2400 m et suivant l'exposition il est possible de trouver des glaciers rocheux. C'est un objet important car il est constitué des trois composantes des laves torrentielles. La seule différence réside dans la mobilité de l'eau qui se trouve sous forme de glace. Lorsqu'ils sont actifs, les glaciers rocheux sont en mouvement, et, comme les glissements de terrain, peuvent amener des matériaux dans la rigole. Les exemples types où des glaciers rocheux sont impliqués dans le déclenchement de laves torrentielles sont le Ritigraben, le Péterey de Zinal, la combe de Challand.

3. Moraine. Elle représente une **diamicte** comportant des matières fines et des granulats nécessaire à la formation des laves torrentielles. De stabilité très variable, elle subit des déformations pouvant engendrer leur effondrement lors du retrait des glaciers (suppression du confinement). Les reliques des moraines plus anciennes sont plus stables, mais leur composition en fait des réservoirs de matériaux mobilisables importants. Les exemples types peuvent être facilement observés lors de la fonte des neiges lorsque les moraines crachent des laves torrentielles de petites tailles qui se déposent sur la neige en contrebas.

4. Eboulis. Ils sont une source de matériaux mobilisables clairement identifiable. Des laves torrentielles peuvent directement se former à l'intérieur de l'éboulis. Cependant elles ne se forment pas au hasard, mais généralement au pied d'un couloir qui canalise l'eau collectée par la paroi et dans lequel on trouve une quantité de matières fines importante (cf. figure 5-8).

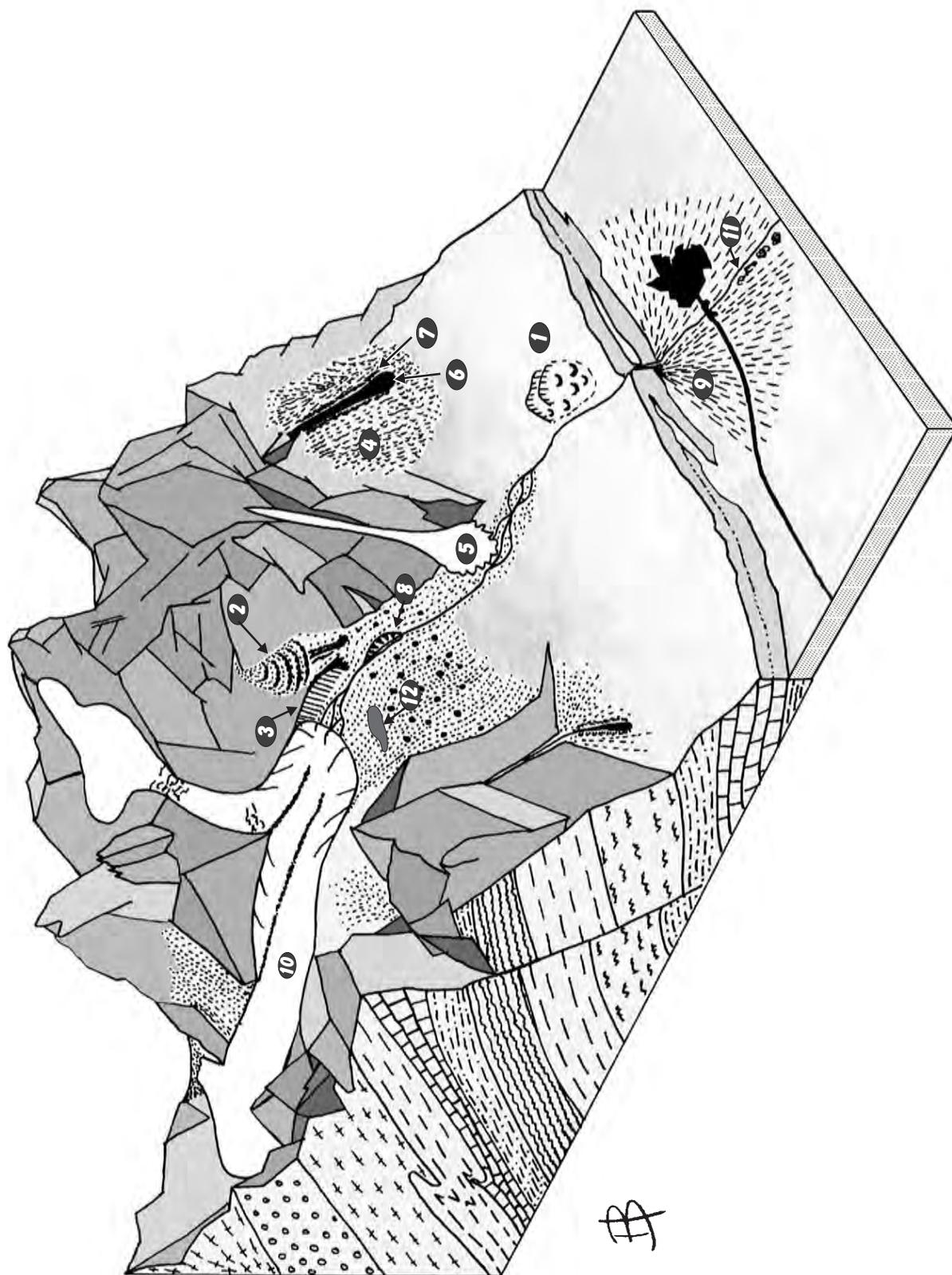


Figure 4-13: Bloc diagramme d'un bassin versant alpin

5. Couloir d'avalanche. Un couloir d'avalanche peut être vu comme un stockage d'eau qui va créer un écoulement important au printemps. Les restes de neige qui tapissent le couloir peuvent servir de plan de glissement aux matériaux générateurs de laves torrentielles. La neige tassée y reste plus longtemps. Les exemples types sont le torrent de la Fouly (VS), l'Ilgraben (VS). Elle peut aussi avoir un effet stabilisant en "cimentant" le fond du couloir.



Figure 4-14: Glissement de terrain, cause d'une lave torrentielle le 15 mai 1999 dans le torrent des Marais (Val de Grimentz).

6. Dépôts de lave torrentielle. Des laves torrentielles peuvent apparaître dans plusieurs endroits du bassin versant. Si ces dépôts sont connectés avec un torrent, ils présentent un danger non négligeable. Le cas le plus défavorable est d'avoir dans un torrent une accumulation de laves torrentielles de taille moyenne qui se déposent en un point par manque d'énergie et qui se trouvent remobilisées lors d'une crue exceptionnelle.

7. Levée. C'est une des traces les plus souvent rencontrées dans les Alpes valaisannes. Les lobes frontaux sont souvent exportés par l'émissaire. Ces traces doivent être reportées dans le cadre d'un diagnostic avec la mention de leur âge et de leur type rhéologique (cf. chapitre 7).

8. Section d'érosion. Dans les parties convexes du bassin versant et si celles-ci sont composées de matériaux mobilisables, l'érosion peut être très intense. De telles zones doivent être soulignées par le diagnostic car elles seront utilisées pour estimer le volume (cf. paragraphe 4.6.6.2)

9. Cône fluvial. Il intègre l'histoire post-würmienne (parfois moins) du bassin versant. Son étude et celle des différents dépôts qui le composent permettent de comprendre le fonctionnement du torrent (par ex. les prédispositions), d'estimer des volumes et permettent de reconstituer partiellement l'histoire du bassin versant. Ses caractéristiques, comme sa pente, sont souvent utilisées pour déterminer d'autres paramètres.

10. Glacier. Il est responsable de la formation des moraines. Il crée le lien entre le réservoir sédimentaire de la partie supérieure du bassin versant et la partie inférieure. C'est aussi un stockage d'eau (sous forme de glace et sous forme d'aquifère intraglaciaire).

11. Bief sur le cône fluviatile. C'est ici que se produisent les dépôts qui peuvent provoquer des débordements (ceux-ci peuvent aussi se produire sans dépôts préalables). Les caractéristiques morphométriques du bief sont donc ici d'une grande importance si des objets dignes de protection se trouvent à proximité.

12. Lac glaciaire ou proglaciaire. La présence de lac dans les marges proglaciaires (Grubengletscher et Weingartensee) ou de lacs retenus par le glacier lui-même (Märjelensee et galscier du Mont Miné) sont une source de danger supplémentaire, car il peuvent se vidanger en une fois.

Les mouvements de versants de grandes ampleurs (glissement ou tassement) n'ont pas été reportés sur la figure 4-13. Les observations montrent toutefois que sur de telles zones les laves torrentielles trouvent un terrain de prédilection (Noverraz et Bonnard 1999). De même, les variations de niveau de la nappe phréatique (visible en surface lorsqu'il y a résurgence) ne sont pas indiqués sur le bloc diagramme, bien qu'elles puissent être les causes d'une lave torrentielle (cf. § 5.2.1).

4.5.1.2. Remarques sur les couvertures quaternaires

En dehors des éléments cités au paragraphe précédent, il faut tenir compte du substratum présent sur le bassin versant. Les éléments paysagers tels que les éboulis et les moraines (grands milieux 3, cf. annexe 2), les pelouses alpines (grands milieux 4, cf. annexe 2) ne sont généralement pas différenciés dans les cartes géologiques. Ils sont la plupart du temps regroupés sous l'appellation de moraine. Ce point de vue, orienté genèse, ne permet pas de rendre compte de la différence de production de sédiments de ces zones. En effet, une moraine ancienne, bien végétalisée (comme on en trouve entre 1700 et 2500 m dans les Alpes) n'a pas du tout la même dynamique sédimentaire qu'une moraine récente.

Une autre distinction doit être faite pour les zones de matériaux fragmentés (composante granulats) présentes sur le bassin versant (Zimmermann et al. 1997). On distingue :

- les éboulis récents qui sont produit par l'altération actuellement en cours. De telles zones, une fois vidangées, se reconstituent lentement. Le niveau de remplissage de ce réservoir sédimentaire est à rattacher aux prédispositions variables du système (cf. § 2.3.2). Ces éboulis ont une importance particulière pour les laves torrentielles lorsqu'ils sont directement connectés avec les torrents.
- les éboulis anciens qui ont été déposé par des processus divers (éboulisation, moraine, le remplissage glaciaire d'une vallée, glissement profond) et sont aujourd'hui sujet à l'érosion. Tant qu'elles ne sont pas complètement purgées, de telles zones peuvent être considérées comme des réservoirs de sédiment illimités.

Il faut ajouter aussi les zones de roches altérées (donnée comme affleurements rocheux dans les cartes géologiques) qui se comportent comme des matériaux meubles. De telles zones sont à considérer comme des éboulis récents (l'altération de la roche est en cours). Elles induisent aussi des périodes d'intense activité (même par faible pluie) suivies de périodes avec pas ou peu de laves torrentielles. C'est un élément à prendre en compte dans les prédispositions variables, mais sa "périodicité" est encore très mal connue.

4.5.2. Utilisation

L'établissement du lien entre ces différents objets, les laves torrentielles et leur déclenchement est l'une des premières étapes du diagnostic. Pour chaque composante principale des laves torrentielles, soit l'eau, les fines et les éléments grossiers, il faudra estimer la quantité potentiellement disponible pour former le mélange. Cependant cette estimation reste qualitative car aucun outil ne permet une quantification précise de ces composantes.

Le report de ces éléments sur une carte permet une première zonation des sites de déclenchement potentiel. Cette zonation doit être croisée avec d'autres informations comme la pente. Cette mise en évidence de zones potentiellement favorables au déclenchement doit faire apparaître :

- 1) Les sites où les trois composantes sont déjà présentes (ou qui peuvent l'être lors d'un épisode pluvieux) et qui selon toute vraisemblance peuvent être en connexion avec le chenal. Ce qui revient à estimer la probabilité, pour les matériaux mis en mouvements sur ces sites, d'atteinte du chenal.
- 2) Les éléments où seul l'une ou l'autre des composantes est présente en grande quantité, et dont on peut craindre l'atteinte par les composantes manquantes.
- 3) Les divers sites d'instabilité qui se trouvent à une certaine distance du chenal (en première approximation 50 m).

4.6. Le volume transporté

Le volume potentiel d'un événement est l'un des paramètres importants dans l'étude d'un bassin versant. Aujourd'hui, le volume est souvent utilisé comme synonyme de l'intensité. Si ce paramètre intrinsèque d'une lave torrentielle est présenté ici, et non au chapitre 6, c'est qu'il est principalement déterminé à partir des caractéristiques du bassin versant.

4.6.1. Remarques préliminaires

Il existe 24 acceptations possibles du volume de solide transporté par une rivière (cf. figure 4-15). Dix-huit d'entre elles impliquent les laves torrentielles. Les diverses formules d'estimation du volume présentées plus loin sont toutes événementielles (volume pour un événement) et visent à déterminer le volume maximal ou moyen.

Si une estimation du volume annuel doit être faite (moins important pour le danger lave torrentielle, mais vital pour la gestion des sédiments), plusieurs méthodes existent. Par exemple, il est possible de calculer un taux de production spécifique (Zeller 1985, Delannoy 1996), ou d'estimer l'âge et le volume du cône fluvial pour en dériver un volume annuel moyen (Zimmermann 2000, Schumm 1956, Fournier 2001). La méthode dite des surfaces d'importance (en allemand *relevante Fläche*) permet une analyse plus fine encore (Zimmermann 1989).

Une nouvelle fois, une bonne définition de la surface est fondamentale (cf. § 4.3.1). Par exemple dans le cas de l'Illgraben, la surface qui contribue pour une part significative au volume des laves torrentielles est de 3,3 km², alors que la surface hydrologique est de 10,1 km². La première aura une influence sur la détermination du volume événementiel, tandis que la seconde sera utilisée pour l'analyse des volumes moyens annuels.

Dans le cas des volumes événementiels, l'estimation peut se faire soit en fonction des apports de la zone de production du système bassin versant (V_{total} dans la figure 4-15), soit en fonction des dépôts ($V_{\text{déposé}}$). Le volume ainsi estimé ne correspond pas forcément au volume mis en mouvement (Franzi, 2001). Une part importante peut être exportée hors du système bassin versant au travers l'effluent. Aucune estimation quantitative n'a été trouvée dans la littérature, mais cette part peut valoir 10 à 40 % (Zimmermann, 2000).

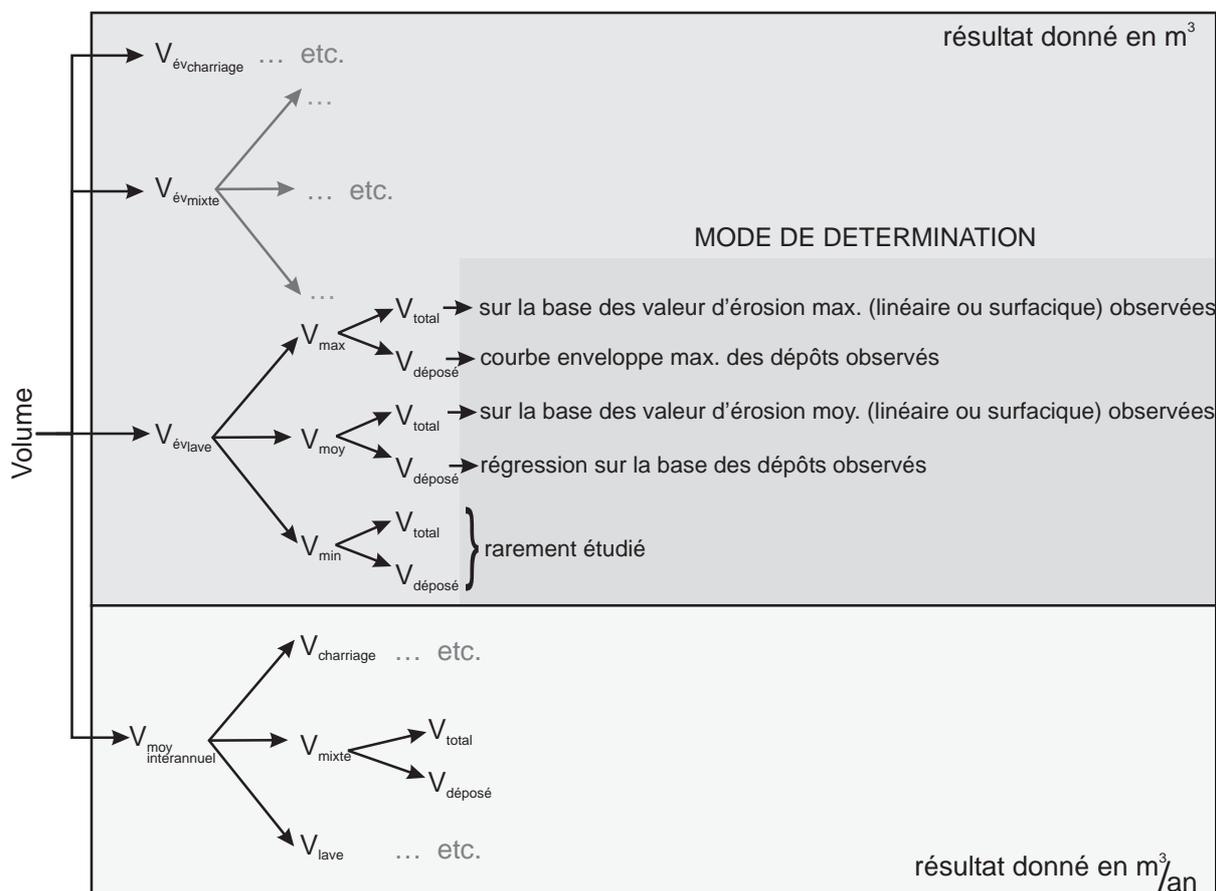


Figure 4-15: Les différents volumes de matériaux transportés par un torrent et leur mode de détermination.

4.6.2. Estimation grossière du volume en fonction des processus de transport

4.6.2.1. Méthode du GHO 96

Cette méthode donne une plage de volume (allant de V_{moy} à V_{max}) pour les matériaux déposés pendant un événement. Elle permet de différencier les divers processus de transport (charriage ou laves torrentielles) et les caractéristiques du torrent (pente, zone d'épandage, gorges, **pavage**). Elle doit être utilisée pour obtenir une première estimation approximative du volume déposable (Lehmann 1993, GHO 1996). Le schéma donné à la figure 4-16 résume la procédure aboutissant à l'estimation de la charge sédimentaire du bassin versant.

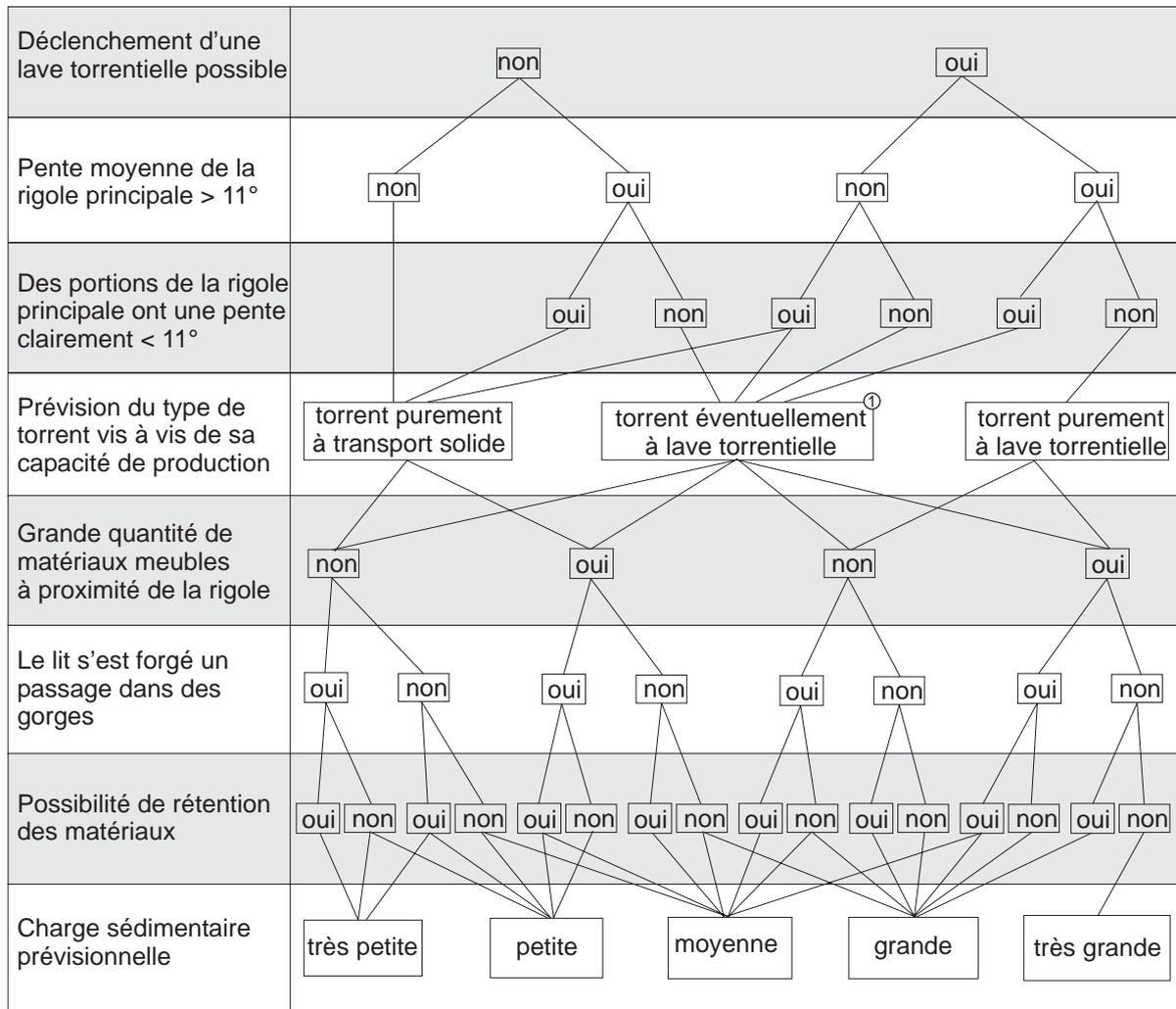


Figure 4-16: Diagramme pour l'estimation qualitative de la quantité de matériaux solide pouvant être transportée par un torrent. En ① faire le calcul pour les deux cas de figure (Lehmann 1993, GHO 1996).

Le tableau 4-2 fait correspondre différentes productivité spécifiques en m³/km² avec la charge sédimentaire prévisionnelle déterminée à la figure 4-16 et cela en tenant compte de la géologie. Ces valeurs ne sont valables que pour des bassins versants de 1 à 10 km² et ne représentent qu'une plage probable de volume. Les valeurs données dans le tableau 4-2 doivent être comparées avec les mesures existantes, s'il y en a. Cette méthode (nécessaire, mais pas suffisante) permet de donner un ordre de grandeur et ne doit être utilisée que dans ce but. Elle permet une vérification des volumes estimés par d'autres moyens.

Tableau 4-2: Valeurs de productivité spécifique (m³/km²), suivant diverses géologies, exprimées en terme de charge sédimentaire prévisionnelle (GHO 1996).

	Flysch	Calcaire	Cristalline
très petite	150	200-800	400-3'000
petite	1'500	500-1'000	800-5'000
moyenne	5'000	1'000-5'000	1'500-15'000
grande	10'000	2'000-10'000	3'000-30'000
très grande	20'000	3'000-30'000	8'000-80'000

4.6.3. Estimation du volume par des formules empiriques globales

Il existe plusieurs formules qui permettent d'estimer le volume déposé à partir d'informations provenant des cartes topographiques et/ou géologiques et parfois d'éléments climatiques. Après une première estimation faite avec la méthode du GHO, ces méthodes permettent d'affiner l'estimation du volume. Suivant le niveau de précision requis, elles ne suffisent pas. Il faudra alors passer aux méthodes géomorphologiques présentées au paragraphe 4.6.6. Ces formules ont été testées sur certains des bassins versants de l'étude au paragraphe 4.6.7.

4.6.3.1. Kronfellner-Kraus 84

Cette formule donne un volume événementiel déposé mixte (lave torrentielle + charriage). Elle a été développée en Autriche. Elle se base sur l'analyse de plus de 1400 événements. Cette formule intègre un facteur de "torrentialité" dépendant de la géologie et de la surface. Cela permet de mieux différencier les torrents appartenant à des zones différentes. Le volume est donné par (Kronfellner-Kraus, 1984) :

$$V_{ev} = K_t A J_t \quad (4.6)$$

où V_{ev} est le volume de matériaux déposés lors d'un événement [m^3], A la surface du bassin versant [km^2], J_t la pente moyenne du torrent [%], et K_t un indice géologique. Cet indice varie suivant l'appartenance géologique des torrents à l'une des trois classes suivantes :

- classe I : les Alpes du Tauern, du Stubai, de la Silvretta, de l'Ötztal du Zillertal (cela correspond en Valais, approximativement à la super-nappe du G^d-S^t-Bernard), et où le potentiel de production de sédiments est important.

$$K_t = \frac{1750}{e^{0.018A}} \quad (4.7)$$

- classe IIa : la crête principale des Tauern, le nord et le sud des Alpes calcaires (cela correspond en Valais aux nappes de l'Hélvétique et aux Préalpes du Chablais), avec un fort potentiel de production de sédiments.

$$K_t = \frac{1150}{e^{0.014A}} \quad (4.8)$$

- classe IIb : les mêmes zones que la classe précédentes, mais pour des bassins versants avec un potentiel de production de sédiments plus faible.

$$K_t = \frac{540}{e^{0.008A}} \quad (4.9)$$

4.6.3.2. D'Agostino 96

Cette formule donne un volume événementiel déposé par des laves torrentielles. Elle a été développée dans les Alpes italiennes orientales. Elle prend en compte la géologie du bassin versant (D'Agostino 1996).

$$V_{ev} = 45 I_g A^{0.9} J_t^{1.5} \quad (4.10)$$

où V_{ev} est le volume de matériaux déposés lors d'une laves torrentielles [m^3], I_g un indice dépendant de la géologie, A la surface du bassin versant [km^2] et J_t la pente du bief de transport et d'érosion [%].

L'indice géologique I_g varie entre 0 pour les roches peu productives, et 5 pour les terrains fortement productifs en sédiments. Le tableau 4-3 donne des valeurs indicatives, pour l'Italie, de l'indice géologiques en fonction de divers types de roches et substrats. L'indice géologique est ensuite calculé en faisant la moyenne pondérée (en fonction des longueurs de torrent) par l'apparition de différent substratum dans le bassin versant.

Tableau 4-3: Valeur de l'indice géologique pour la formule de D'Agostino (1996)

I_g	type de substrat
0	roches porphyriques, granitiques, dioritiques
1	roches calcaires
2	roches volcaniques dégradées, tufs basaltiques, brèches
3	roches sédimentaires détritiques terrigènes : marnes, etc.
4	roches métamorphiques : phyllites, schistes, gneiss, etc.
5	couverture morainique, alluvions

On verra au paragraphe 4.7.4, qu'il est difficile de chiffrer la géologie pour différencier des bassins versants d'une même zone. L'exemple des laves torrentielles de Fully en 1939, figure 4-22, illustre la difficulté d'utiliser un indice géologique simple.

4.6.3.3. Hampel 80

Cette formule a été développée à partir d'essais en laboratoire. Elle donne un volume événementiel extrême déposé mixte (lave torrentielle et charriage). Elle a été ensuite validée sur 118 torrents autrichiens (Hampel, 1980).

$$V_{ev} = \frac{4.42A P_{100} \Psi_0 \left(1 - \frac{alt_{min}}{2300}\right) (J_c - 1.23)^{2.63}}{J_c R^L} \quad (4.11)$$

où V_{ev} est le volume de matériaux déposés par une lave torrentielle [m^3], A la surface du bassin versant [km^2], P_{100} la quantité de pluie sur 24 h d'un temps de retour de 100 ans [mm], Ψ_0 le coefficient de réduction de la lame ruisselée due à l'infiltration [-], alt_{min} l'altitude de l'embouchure [m], J_c la pente du cône de déjection [%], R un paramètre rendant compte de la formation de matière en suspension, elle même dépendante de la pente

et de la roche. Ce paramètre, susceptible d'être amélioré, vaut 0,8 pour les Alpes calcaires et 0,66 pour le reste des Alpes. L la longueur de l'écoulement des matériaux depuis la zone de déclenchement [km].

L'intérêt de cette formule est de tenir compte de la pluie (en fait seulement des pluies de longue durée). Qu'en est-il des laves torrentielles se déclenchant pour des pluies de type convectives ? Cette formule tient aussi compte de la longueur de l'écoulement, paramètre important puisque par exemple lors de intempéries de 1987 en Suisse, les $\frac{2}{3}$ des matériaux déposés provenaient des lits eux-mêmes (Rickenmann, 1993). On peut toutefois douter de la possibilité d'estimer autant de paramètres, en particulier Ψ_0 et R .

4.6.3.4. Rickenmann 97

Cette formule estime le volume déposable par une lave torrentielle lors d'un événement exceptionnel (Rickenmann, 1997). Ces formules ont été déterminées sur la base de la courbe enveloppe définie par des torrents suisses et italiens ayant débordé en 1987.

$$V_{ev} = (6.4 J_c - 23) L \quad \rightarrow \quad 5\% < J_c \leq 15\% \quad (4.12)$$

$$V_{ev} = (110 - 2.5 J_c) L \quad \rightarrow \quad 15\% < J_c \leq 40\% \quad (4.13)$$

où V_{ev} est le volume maximum de matériaux mobilisés par une lave torrentielle [m^3], J_c la pente du cône de déjection [%] et L la longueur de chenal érodable [m].

4.6.4. Critiques des formules empiriques globales

Ces formules ne doivent être utilisées que pour établir des ordres de grandeur des événements majeurs, si on travaille à l'échelle d'un bassin versant. Les moyens modernes tels que les MNT associés à un SIG permettent de traiter les formules ci-dessus de manière numérique. Dès lors, on peut envisager, en association avec d'autres critères, d'établir des zones de dangers à l'échelle d'un territoire, par détection automatique. Cependant la précision des MNT est limitée lorsque le relief est prononcé, comme le montre la figure 4-17. Les nouvelles méthodes, comme l'altimétrie laser, laissent présager une amélioration notable de ces problèmes à brève échéance. Toutefois plusieurs sources d'incertitude viennent entacher la précision des paramètres utilisés.

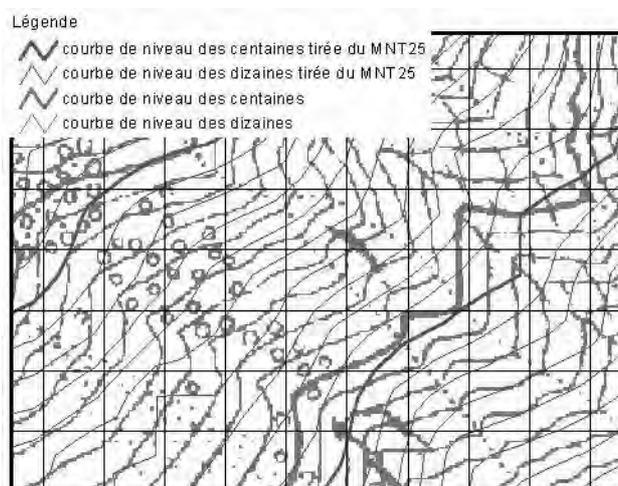


Figure 4-17: Exemple de distortion entre les courbes de niveau obtenues par les moyens géométriques classiques (en gris) et par un MNT (en violet) dans un milieu alpin (sources OFT et Mensurations Cantonales VS).

Plusieurs de ces formules utilisent la pente du cône fluviatile. Cette variable est difficile à obtenir. En effet, elle est dépendante du volume déposé par les laves torrentielles, de la viscosité du mélange, mais aussi de la forme de la vallée dans laquelle le cône aboutit (forme qui elle dépend de l'érosion glaciaire la plupart du temps). Une vallée étroite sera le lieu de déposition d'un cône plus raide qu'une vallée plus large. Si une rivière importante draine cette vallée, elle peut emporter une bonne partie du cône (par exemple différence entre les cônes de deux torrents similaires comme le torrent du Mauvoisin et du S^t Barthélémy, près de S^t-Maurice).

De même, comme on le verra plus loin, il est très difficile à l'heure actuelle de définir un indice géologique qui permet de qualifier la prédisposition du substratum du bassin versant à produire des laves torrentielles.

D'autre part toutes ces formules ont été développées d'après l'analyse des dépôts s'étant produit dans un torrent donné. Elles ne tiennent donc pas forcément compte des matériaux emportés dans le flot de l'émissaire (volume qui peut être non négligeable) et qui dans le cas d'un changement de viscosité de la lave torrentielle (possible sur un même torrent) peuvent être disponibles pour le dépôt.

Pour guider le choix d'une formule, il n'existe quasiment aucune mesure en Valais. J'ai donc dû travailler en comparant les résultats de chaque formule pour un bassin versant donné, puis en comparant ensuite les divers bassins versants entre eux. Les volumes estimés sur l'Illgraben ont été utilisés comme ordre de grandeur pour fixer la valeur supérieure (le volume de l'événement maximum de référence étant estimé à 250'000 m³). L'annexe 8 récapitule ces calculs pour l'ensemble des bassins versants retenus. Seuls des bassins versants de dangerosité moyenne et forte ont été retenus. L'analyse se base sur deux points :

- l'existence d'une structure dans la répartition des volumes donnés par les différentes formules
- l'appartenance des bassins versants à un contexte climato-géologique, en particulier le groupe Batsoule, Idroz, Fouly, Merdenson (dans la région du Val Ferret plutôt schisteux) et le groupe Ritigraben, Geisstrifbach, Dorfbach (dans le Matternal plutôt gneissique)

4.6.4.1. Influence de la surface

Pour les deux formules faisant intervenir la géologie, celles de Kronfellner-Kraus et de D'Agostino (cf. 4.6.3.1 et 4.6.3.2), on peut observer à la figure 4-18 une influence très forte de la surface. Par exemple pour les bassins versants schisteux de la région de Ferret (de petites surface, < 1 km²), les résultats de ces formules donnent des volumes inférieurs à celle obtenue avec Rickenmann (valeurs supposées extrêmes). Cette tendance s'inverse lorsque la surface augmente comme dans le cas du Merdenson où pourtant la géologie est identique. Cette différence de comportement entre les diverses formules, n'est pas corroborée par les observations de terrain. La surface intervient donc de façon trop importante dans ces formules.

De même, les torrents du Matternal, similaires au niveau de la géologie mais avec des caractéristiques géomorphologiques différentes, montrent la même influence de la surface pour les formules de Kronfellner-Kraus et de D'Agostino. Par exemple le Ritigraben dont la surface vaut respectivement $\frac{1}{4}$ de celle du Dorfbach, et $\frac{1}{3}$ de celle du Geisstrifbach a des valeurs de volume estimé plus faibles, ce qui ne correspond pas aux observations de terrain.

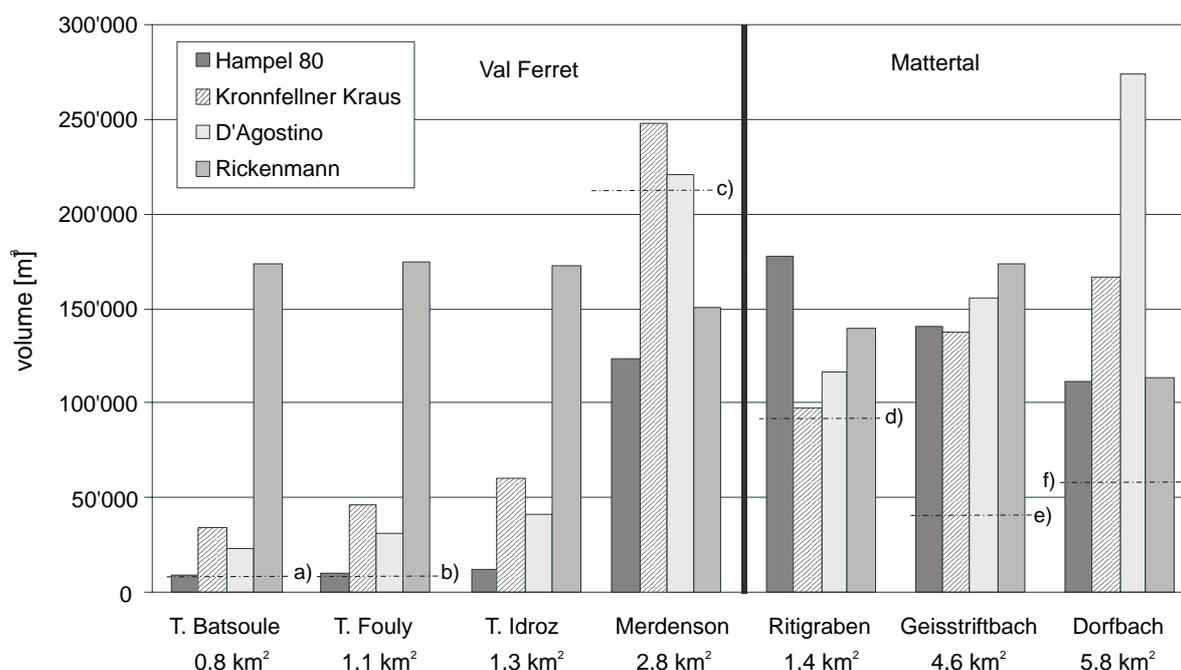


Figure 4-18: Comparaison des volumes estimés pour des torrents du Val Ferret et du Mattertal. Les traits horizontaux représentent les valeurs estimées sur le terrain. Pour le Val Ferret a) et b), respectivement 11'000 et 12'000 m³, sont les volumes déposés par les événements moyens. L'estimation c), 215'000 m³, il s'agit d'un volume maximum. Pour le Mattertal, d), e), et f), respectivement 90'000, 40'000 et 60'000 m³, représentent les volumes extrêmes supérieurs, sans toutefois être des maxima.

4.6.4.2. Influence de la variabilité du substrat sur un bassin versant

Pour les formules de Hampel (cf. 4.6.3.3) et de Rickenmann (cf. 4.6.3.4), on peut observer à la figure 4-19 une forte influence de la longueur du torrent sur l'estimation du volume.

Par exemple pour l'Altebach, ces formules appliquées sur tout le bassin versant donnent un volume de 250'000 m³, valeur très élevée. En subdivisant la surface en deux sous-bassins homogènes (au niveau de leur productivité et où seule une surface équivalente à un tiers de la surface totale se trouve en zone érodable, notée Altebach bis dans la figure 4-19), la longueur est divisée par 1,7. L'estimation du volume qui s'en suit est réduite de 38 % pour la formule de Rickenmann et de 47 % pour celle de Hampel. Le volume est estimé alors vers 100'000 m³, ce qui est plus proche (mais encore élevé) des estimations faites sur le terrain suite aux intempéries d'octobre 2000 (considérées comme ayant produit des événements extrêmes).

De même pour l'Illgraben où la longueur érodable passe du simple au double (entre la zone très érodable et le bassin versant hydrologique complet) le volume est réduit de 52 % pour la formule de Rickenmann et de 70 % pour celle de Hampel. Ces constatations renforcent l'importance de la détermination correcte et multiple de la surface (cf. paragraphe 4.3.1).

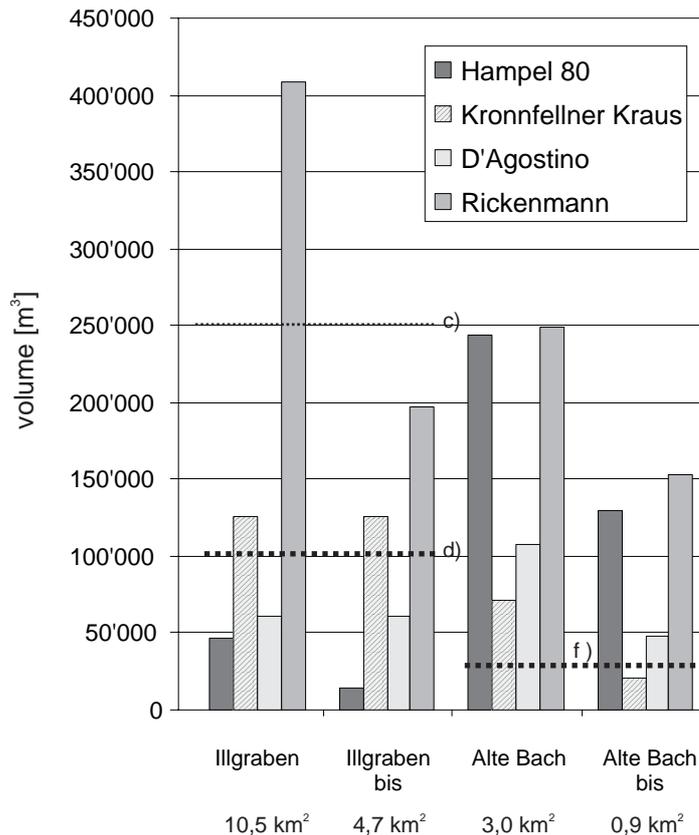


Figure 4-19: Comparaison du volume estimé pour divers torrents. Les traits horizontaux représentent les valeurs estimées sur le terrain. Pour l'illgraben c) vaut 250'000 m³ et représente un maximum, tandis que d) vaut 100'000 m³ et représente un événement moyen (pour ce torrent). Pour l'Altebach f) vaut 30'000 m³, ce qui représente un événement extrême.

4.6.5. Variabilité temporelle du volume

La taille des événements dans un torrent donné est très variable. Il est nécessaire dans le cadre d'une analyse de bassin versant de relier la taille des événements à une probabilité d'apparition. A défaut de séries de données statistiquement utilisables, ou de quantification des processus physiques, on est actuellement contraint de mener une approche globale du type de celle utilisée pour les chutes de blocs (Hantz 2001). Une telle approche se fait en réunissant toutes les données disponibles sur différents sites, afin de constituer un échantillon statistiquement suffisant. A partir de là, il est possible de définir des volumes plus ou moins rares pour une surface donnée.

4.6.5.1. Estimation d'une plage de volume événementiel moyen

A partir de données provenant des Alpes européennes, Franzi (2001) a représenté les événements dans un plan $\log A / \log V$ (où A est la surface du bassin versant et V le volume déposé, cf. figure 4-20). Il est ainsi possible de déterminer, pour une surface donnée, une plage de volume probable. Le volume moyen peut en être dérivé. Il est donné par (Franzi 2001) :

$$V_{ev} = 8.9588 \cdot A^{0.7652} \quad (4.14)$$

où V_{ev} est le volume [$1000 \times m^3$] et A la surface du bassin versant [km^2].

Sur la base du nuage de points obtenu, la fréquence cumulée d'apparition des événements a été déterminée. On peut se représenter cette fréquence comme une troisième dimension, matérialisée sur dans la figure 4-20 par des ellipses représentant des zones d'équiprobabilité. Ces zones d'équiprobabilité définissent la fraction d'événements ayant atteint un certain volume sur une période d'environ 50 ans et pour une surface donnée.

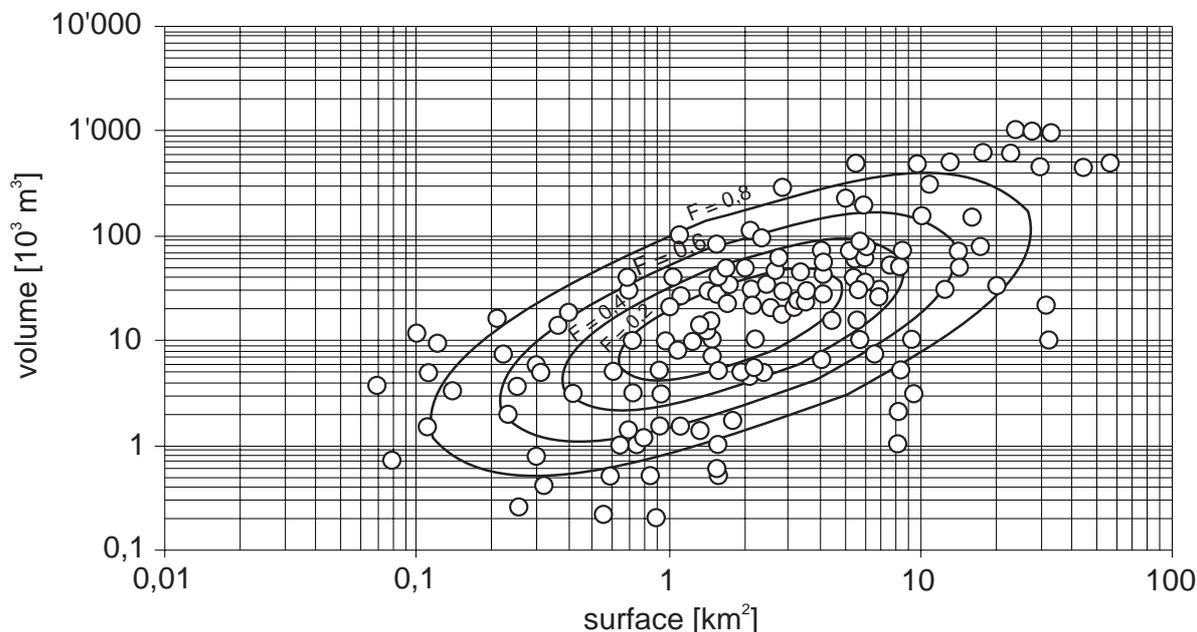


Figure 4-20: Distribution des volumes en fonction de la surface. Les ellipses correspondent à des zones d'équiprobabilité d'apparition d'événements ayant atteint un certain volume sur une période d'environ 50 ans et pour une surface donnée (Franzi 2001).

4.6.5.2. Nouvelle possibilité d'estimation de la variabilité du volume

A partir de ces données il est possible de calculer les écarts relatifs extrêmes par rapport au volume moyen pour une surface, A et une fraction d'événements donnée, F . J'ai obtenu ces formules en mesurant l'écart par rapport au volume moyen, puis en établissant une régression entre cet écart en fonction de F et A . Les écarts extrêmes peuvent s'estimer par :

$$\Delta V_{sup} = 83,8 + 275,7 \cdot e^{\left(\frac{-A}{0,93}\right)} + 43,1(F - 0,2) \cdot A + (2164,5 \cdot F^2) - (156,2 \cdot F) + 26,4 \quad (4.15)$$

$$\Delta V_{inf} = 39,8 + 24,0 \cdot e^{\left(\frac{-A}{5,8}\right)} + 3,8 \cdot F \cdot A + 53,4 \cdot F \quad (4.16)$$

où ΔV_{sup} est la différence de volume en pourcent à rajouter à la valeur du volume moyen; ΔV_{inf} est la différence de volume en pourcent à soustraire à la valeur du volume moyen; A la surface du bassin versant (km^2) et F la fréquence cumulée des événements comprise entre 0 et 1. F traduit la fraction d'événements sur 50 ans ayant atteint une amplitude donnée. Plus cette fraction est grande, plus elle comporte des événements rares. Les volumes extrêmes pour un F donné, sont compris dans la plage :

$$V_{ev_{max}} = V_{ev} \left(1 + \frac{\Delta V_{sup}}{100}\right) \quad (4.17)$$

$$V_{evmin} = V_{ev} \left(1 - \frac{\Delta V_{inf}}{100} \right) \quad (4.18)$$

où V_{evmax} et V_{evmin} sont respectivement les volumes maximaux et minimaux pour une surface et une fréquence cumulée d'apparition donnée [m³]. Le principe du calcul est illustré à la figure 4-21.

L'analyse d'erreur montre que l'incertitude décroît quand la taille du bassin versant augmente. Ces formules n'ont été validées que pour des bassins versants d'une surface comprise entre 0,6 et 5,5 km². Il faut aussi ajouter que les volumes maximaux sont dus à des bassins versants aux prédispositions fortes (pas représentatifs de bassins aux prédispositions plus faibles).

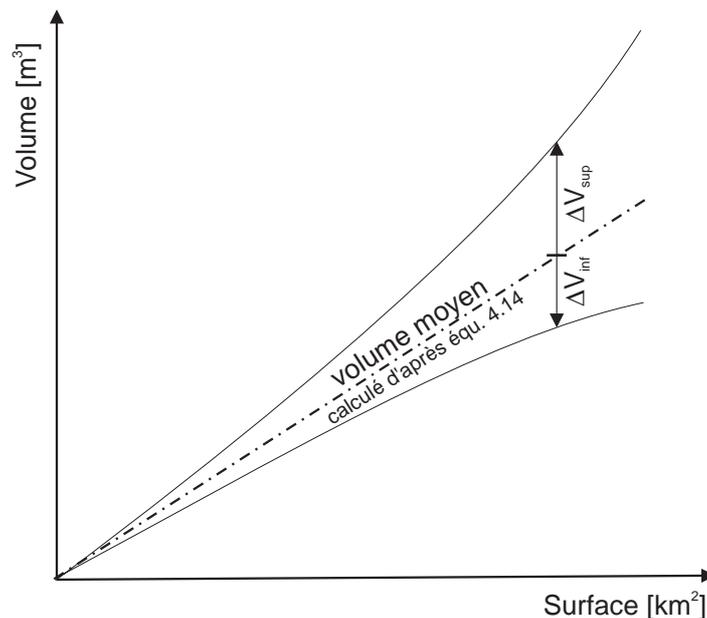


Figure 4-21: Principe du calcul de la variabilité temporelle du volume.

4.6.6. Estimation du volume par des méthodes géomorphologiques

Ces formules estiment le volume total mis en mouvement par une lave torrentielle. Elles ne tiennent pas compte du foisonnement. Un tel volume peut aussi être divisé en plusieurs bouffées. Cela implique d'associer des scénarios aux déterminations de volume, à savoir le nombre de bouffées, le type de déclenchement, l'apparition d'érosion régressive, la convexité du profil en long, etc.

4.6.6.1. Hungr 84

Cette méthode se base sur les surfaces de production pertinentes, c'est à dire les surfaces en connexion avec le torrent pouvant fournir du matériel. Pour faire l'estimation du volume, on doit diviser le torrent en biefs de productivité homogène. On attribue une valeur de productivité à chaque tronçon i (cf. tableau 4-4). Pour des bassins versants de moins de 3 km^2 , on a (Hungr, 1984) :

$$V = \sum_i (L_i \cdot e_i) \quad (4.19)$$

où L est la longueur du bief homogène, i un indice indiquant un tronçon homogène et e le taux de production linéaire selon les valeurs données par le tableau 4-4. Ces valeurs proviennent de travaux dans les Montagnes Rocheuses canadiennes.

Tableau 4-4: valeurs de productivité linéaire (Hungr, 1984)

Matériau du fond	Berges	Stabilité du lit (avant l'événement)	taux de production [m ³ /m]
substratum	non érodable	stable	0-5
couche fine de sol sur substratum	faiblement érodable	stable	5-10
dépôt épais, moraine	< 5 m de haut	stable	10-15
dépôt épais, moraine	de 5 à 20 m de haut	à la limite de l'équilibre	15-30
dépôt épais, moraine, sol	> 20 m de haut	instable	30-200 ^a ^a) à considérer comme une source ponctuelle

Une application de cette méthode est présentée au paragraphe 4.6.7.

4.6.6.2. Méthode des sections érodables

Similaire à la méthode précédente, cette méthode se base les traces d'érosion mesurées suite à des événements survenus dans les Alpes. Pour pouvoir l'utiliser il faut connaître la longueur sur laquelle cette érosion se produit. Le volume est donné par :

$$V = \sum_i L_i \cdot s_{ei} \quad (4.20)$$

où L est la longueur du bief homogène [m], i un indice indiquant un tronçon homogènes et s_e la section d'érosion dans le bief considéré [m²]. Les valeurs possibles de la section érodable peuvent être classées parmi les données du tableau 4-5. La valeur extrême de près de $3'200 \text{ m}^2$ à été mesurée dans les Alpes Grées lors des intempéries de 1987 (Tonanzi, 1996). De telles sections ne sont possibles que dans les parties convexes du profil en long, où le lit est composé de matériel meuble (par ex. moraines). Les portions du torrent où une érosion pareille peut avoir lieu doivent être traitées plus précisément en calculant le prisme potentiellement érodable.

Tableau 4-5: valeurs des sections d'érosion (Haeberli et al., 1992)

Degré d'érodibilité	faible	moyenne	grande	extrême
section érodable [m ²]	0-3	3-50	50-100	< 3'200

Des formules permettant d'estimer la profondeur d'érosion ont aussi été développées, la plupart du temps sur une méthodologie similaire à celle qui a conduit au développement des formules empiriques globales. Par exemple (Kronfellner-Kraus 1984) :

$$p = 1,5 + 0,125 \cdot J \quad (4.21)$$

où p est la profondeur maximale d'érosion en [m], et J la pente [m/m]. A l'origine, cette formule n'était valable que sur les cônes formés d'alluvions grossières. Cependant l'analyse faite après les intempéries de 1987 montre que cette formule peut aussi être utilisée dans les tronçons plus raides ou formés par des alluvions plus fines (Haeberli et al., 1991). L'application d'une telle formule peut aider à l'estimation de la section érodable maximale.

4.6.7. Utilisation des formules géomorphologiques

Si le manque de données fiables ne m'a pas permis de vérifier ces formules, l'exemple suivant montre leur valeur. Dans la nuit du 17 au 18 novembre 1939, deux torrents voisins, situés sur la commune de Fully, ont donné des laves torrentielles. Comme le montre la figure 4-22, le volume déposé est très différent. Pourtant, sur la figure 4-22 c les bassins versants montrent au premier abord une certaine ressemblance.

Comment expliquer une telle différence pour des bassins versants de taille, de géologie, de situation climatique, aussi semblables ? L'utilisation des formules globales donne pour chacun des torrents, et pour une même formule, des volumes presque égaux (cf. figure 4-24). L'extrait simplifié de la carte géologique (Badoux et al. 1971) présenté à la figure 4-23 permet déjà une réponse. Bien que de géologie identique (roches de type granitique), l'ampleur des formations quaternaires y est très différente (Marquis 2001).

La figure 4-22 montre aux images a) et b) l'ampleur de la lave torrentielle boueuse qui est descendue du torrent de Saxé. Les dépôts atteignent presque 5 mètres (personnage dans le coin supérieur droit de l'image a). Parallèlement, l'image d) montre que le torrent du Métin n'a provoqué que des dépôts de faible épaisseur (~20 cm dans les abricotiers). La ressemblance morphologique est donnée par l'image c), sur laquelle on peut voir les deux torrents et apercevoir la différence de taille de leur dépôts (torrent du Saxé à droite et celui du Métin à gauche).

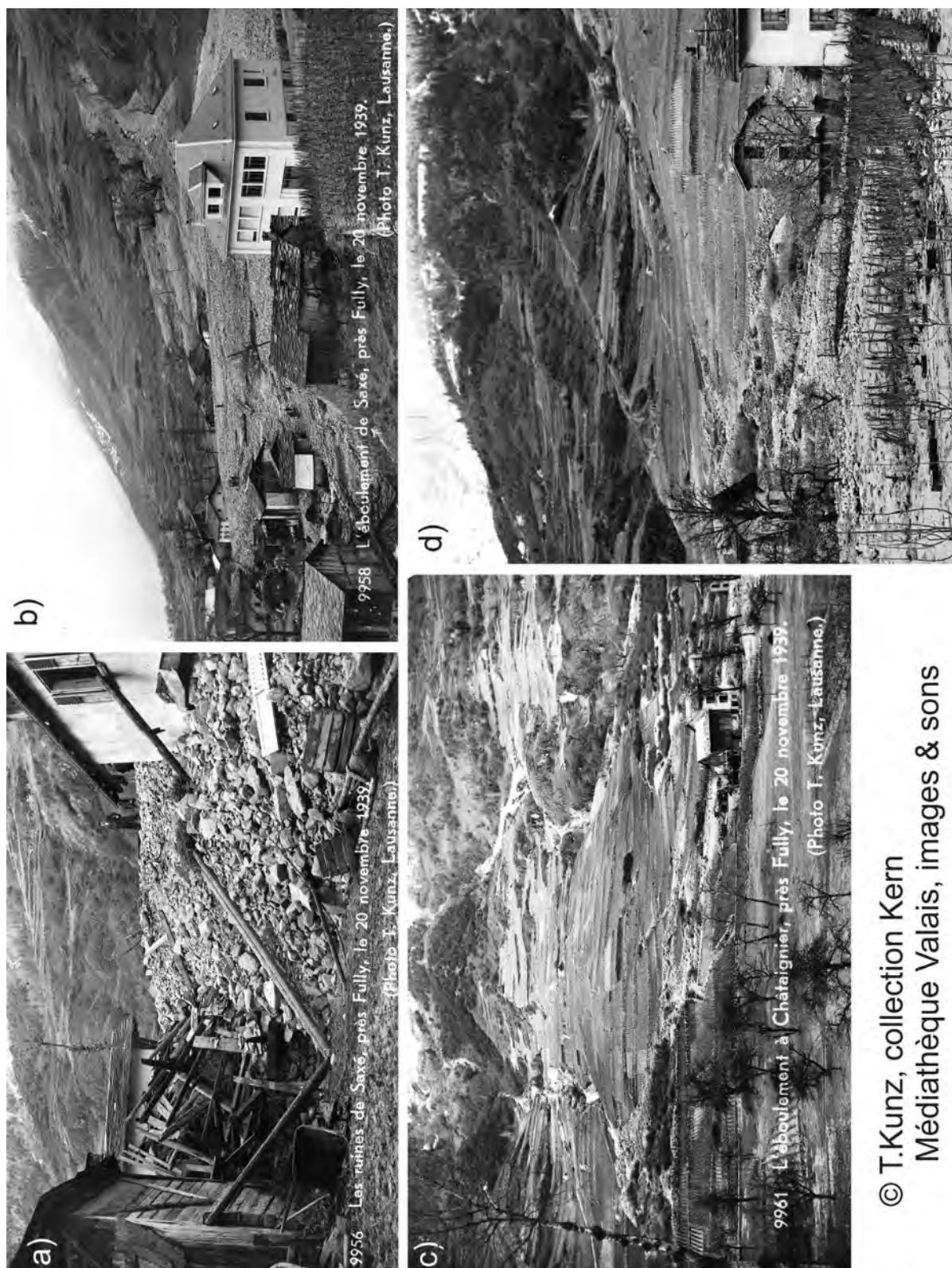


Figure 4-22: image des laves torrentielles survenues à Fully le 18 novembre 1939. a) et b) ampleur de la lave torrentielle boueuse qui est descendue du torrent de Saxé. c) différence de taille de leur dépôts (torrent du Saxé à droite et celui du Métin à gauche). d) torrent du Métin, qui n'a provoqué que des dépôts de faible épaisseur.

Le torrent de Saxé a tracé son cours dans une rigole remplie par les dépôts des écoulements précédents correspondant à un dépôt épais à la limite de l'équilibre (selon Hungr 1984, 5^{ème} ligne dans le tableau 4-4, avec une productivité de $40 \text{ m}^3/\text{m}$). Le torrent du Métin a tracé son lit en grande partie dans des affleurements recouverts d'une faible couche de matériaux remobilisables.

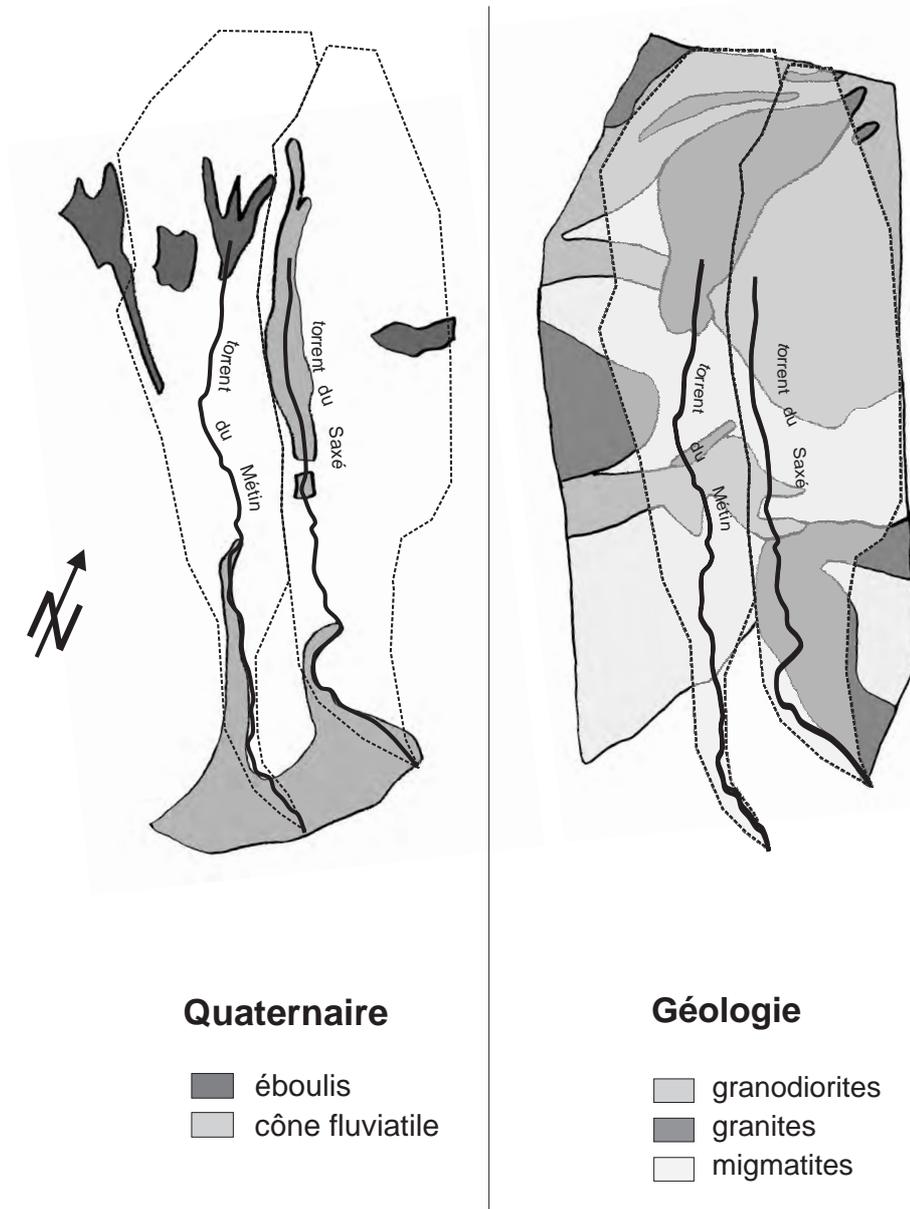


Figure 4-23: Aperçu géologique et géomorphologique simplifié des bassins versants de Saxé et du Métin (source Badoux et al. 1971)

En appliquant une formule géomorphologique (ici celle de Hungr), il est possible de différencier les volumes probables pour chacun des bassins versants. Soit $99'000 \text{ m}^3$ pour le torrent du Saxé, contre $10'200 \text{ m}^3$ pour celui du Métin.

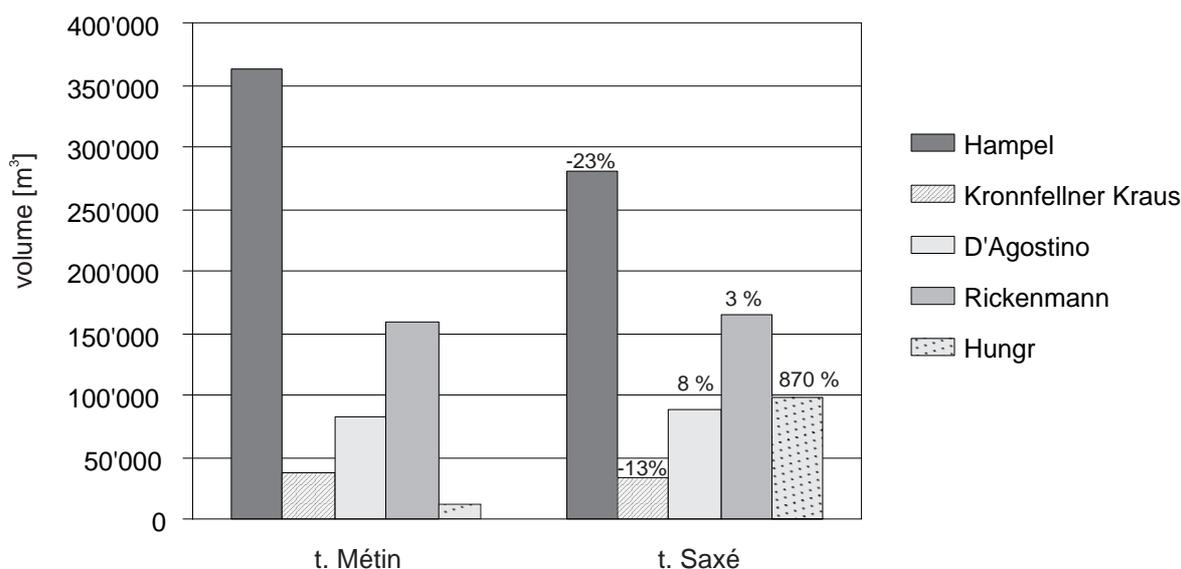


Figure 4-24: Les différents volumes estimés pour les laves torrentielles de Fully en 1939. Les chiffres en % au dessus des bâtons de l'histogramme du torrent de Saxé exprime la différence de volume par rapport à ceux estimés pour le torrent de Métin.

4.7. Caractéristiques géologiques

La géologie contrôle les caractéristiques des composantes éléments rocheux et matières fines. Elle peut aussi dans certains cas influencer la composante eau par le jeu des propriétés hydrogéologiques de certaines couches. Son rôle dans le diagnostic d'un bassin versant est de première importance.

Quel lien existe-il entre les prédispositions de base et les prédispositions variables et la géologie ? Est-il possible de quantifier les observations de terrain ? Afin d'établir quelles relations sont pertinentes, j'ai repris les trente bassins versants dont la dangerosité a été déterminée (cf. paragraphe 4.2.2). La dangerosité de ces torrents a été comparée avec les informations sur l'âge des roches, le **domaine paléogéographique** et la lithologie.

4.7.1. Âge des roches

L'âge des roches est l'un des paramètres géologiques actuellement facilement disponible. Il ne rend compte des caractéristiques physiques (qualité des massifs rocheux) que lorsqu'il est associé à une zone donnée, comme par exemple les massifs rocheux de mauvaise qualité associés au permien et à la nappe de Siviez-Mischabel.

Il faut être attentif à la non homogénéité de l'information. En effet, tous les compartiments lithologiques ne sont pas datés avec le même niveau de précision. Par exemple, il n'est pas possible de différencier les lithologies datées d'après les ères de celles datées d'après les périodes, les époques et les étages¹, avec pour conséquence de donner un poids plus important aux lithologies datées d'après la période, car c'est le niveau de détail le plus souvent atteint.

1. Les ères (du Précambrien au Cénozoïque) sont subdivisées en périodes, qui elles-mêmes sont subdivisées en époques, qui sont à leur tour subdivisées en étages.

Malgré cette difficulté et le caractère non physique de cette information, une comparaison entre l'âge des roches et la dangerosité a été tentée. Cet essai montre que tous les âges se retrouvent dans toutes les classes de dangerosité, sans qu'aucune tendance ne se dégage. Cette caractéristique ne peut donc pas être utilisée pour définir la propension d'un bassin versant à produire des laves torrentielles.

4.7.2. Le domaine paléogéographique

La deuxième information actuellement facilement disponible est l'appartenance des roches à un domaine paléogéographique. Quatre grands domaines sont présents en Valais : le socle continental, le socle océanique, la couverture et les massifs intrusifs ou extrusifs dans le socle.

La figure 4-25 montre que des roches appartenant à la couverture (plus jeune et généralement sédimentaire) sont plus souvent présentes dans les bassins versants de dangerosité élevée que dans ceux de dangerosité moyenne. Les roches appartenant aux autres domaines paléogéographiques apparaissent en nombre presque égal dans les deux sous-groupes de torrents.

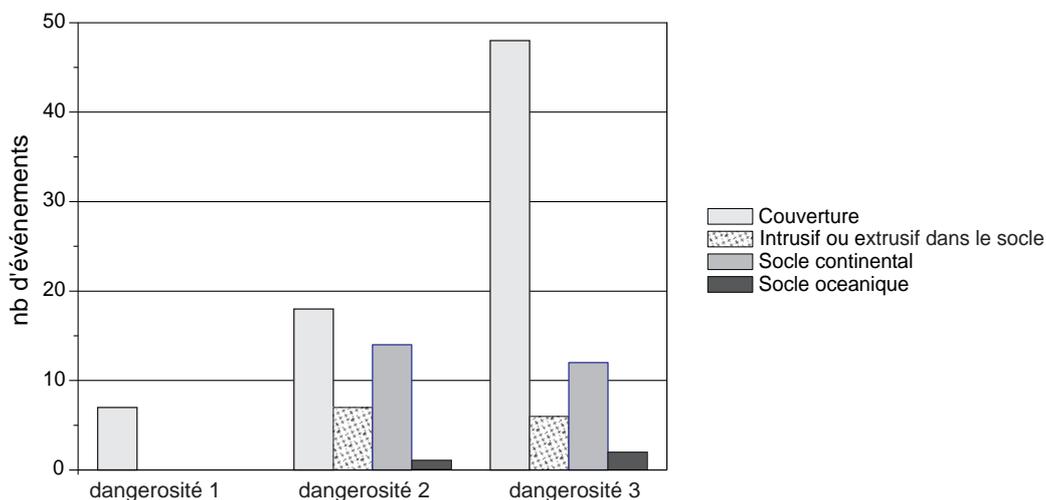


Figure 4-25: Différence de dangerosité des bassins versants en fonction du domaine paléogéographique auquel ils appartiennent.

Une explication possible à cette tendance est la diminution de la taille moyenne des grains constitutifs en allant des roches magmatiques vers les roches de couverture. Les roches des socles étant un intermédiaire. Pour une résistance mécanique similaire, les roches à grains plus fins produiront des matériaux plus fins donc plus disponibles pour le transport. Les produits d'altération et d'érosion auront tendance eux aussi à être plus fins et moins bien cimentés, donc plus favorables à la mise en mouvement.

4.7.3. Lithologie

4.7.3.1. Lithologie et dangerosité

Cette troisième information est directement liée aux caractéristiques mécaniques, ou du moins à une plage de valeurs pour un massif non altéré¹. L'information a été tirée de

1. En fait, il faudrait tenir compte de la fracturation et de l'altération, mais actuellement l'hétérogénéité de la qualité de cette donnée ne permet pas son utilisation pour une comparaison à grande échelle.

l'atlas géologique de la Suisse au 1:25'000 (feuilles datant de 1932 à 1999) et de la carte tectonique au 1:100'000 (Steck et al. 1999). A nouveau, l'homogénéité des appellations n'étant pas assurée, un long travail de préparation a été nécessaire. Par exemple, les prasinites et les gabbros, qui sont regroupées parmi les metabasites suivant les feuilles de l'atlas.

Le tableau 4-6 montre qu'aucune tendance n'apparaît (Sartori, 2001). S'il l'on tient compte de la variabilité naturelle (particulièrement forte dans les Alpes) et de la sous-représentation des bassins versants de faible dangerosité, on peut considérer que la plupart des lithologies se retrouvent dans les trois classes de dangerosité.

dangerosité 1	dangerosité 2	dangerosité 3
	Amphibolites	Amphibolites
Argilites		Argilites
		Brèches
Brèches carbonatées		
	Blocs ophiolitiques	
Calcaires	Calcaires	Calcaires
	Calcschistes	Calcschistes
	Conglomérats	Conglomérats
	Dolomies	Dolomies
	Evaporites	
	Flysch	Flysch
	Gneiss	Gneiss
	Gneiss granitiques	Gneiss granitiques
	Granites	
Grès	Grès	Grès
	Leucogranites	
	Marbres	Marbres
		Marbres siliceux
		Marbres siliceux
Marnes	Marnes	Marnes
	Métabasites	Métabasites
		Métagabbros
	Micaschistes	Micaschistes
		Prasinites
	Quartzites	Quartzites
	Rhyolites	
	Schistes	Schistes
	Schistes graphiteux	Schistes graphiteux
		Schistes marneux
	Schistes pélitiques	Schistes pélitiques
	Streifengneiss	Streifengneiss
	Wildflysch	

Tableau 4-6: Répartition par dangerosité des différentes lithologies présentes sur les bassins versants. L'importance surfacique des différents lithologies n'a pas été prise en compte. Cependant elles n'apparaissent dans ce tableau que si elles couvrent au minimum 5 % du bassin versant.

Bien que se traduisant dans le paysage par des différences d'altitude et de pente notables, la lithologie ne suffit pourtant pas pour définir la productivité d'un bassin versant. Les conclusions de cette analyse ne sont strictement valables que pour le domaine alpin.

4.7.3.2. Lithologie et comportement des laves torrentielles

Similairement à l'âge des roches, le lien entre les laves torrentielles et la lithologie n'est représentatif que pour une région donnée, comme le montre la figure 4-26. Des types de roches y sont comparés avec le comportement des laves torrentielles en écoulement (cf. chap. 6). Les résultats obtenus montrent une différence entre l'attribution d'un comportement préférentiel à un type de roche pour deux régions différentes.

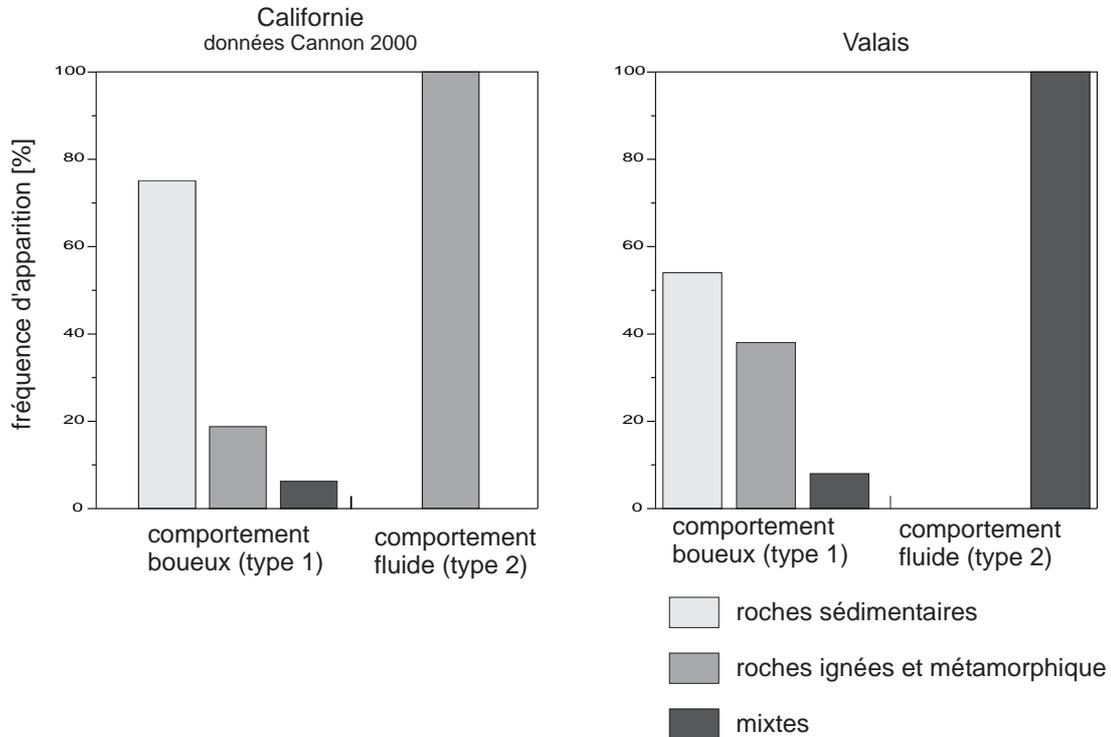


Figure 4-26: Familles lithologiques et comportement des laves torrentielles. Les types 1 et 2 font référence à l'appellation donnée par Cannon (2000). Ces types ont été traduits en fonction de la description qu'elle en donne. On voit que les laves torrentielles particulières de type fluide appartiennent dans l'une et l'autre zone géographique à une seule famille lithologique.

En effet, l'analyse faite par Cannon en Californie du sud met en évidence une appartenance des laves torrentielles au comportement fluide à une seule famille lithologique. En Valais, les laves torrentielles ayant un comportement identique, appartiennent à la famille mixte (en fait aux familles métamorphique et sédimentaire), mais avec des propriétés mécaniques semblant venir de la fraction sédimentaire (cf. § 6.6.2).

4.7.4. Synthèse sur l'influence de la géologie

L'utilisation des paramètres géologiques actuellement disponibles montre qu'aucune tendance ne se dessine clairement. Pourtant comme le montre la figure 4-27, toutes choses égales par ailleurs (les pentes moyennes des torrents du Matternal = 30° et celles des torrents du val Ferret = 30°), il faut des pluies différentes pour déclencher des laves torrentielles pour des bassins versants avec des géologies très contrastées (gneiss dans le Matternal, schistes dans le Val Ferret). Dès lors comment expliquer cette différence dans le déclenchement du phénomène ?

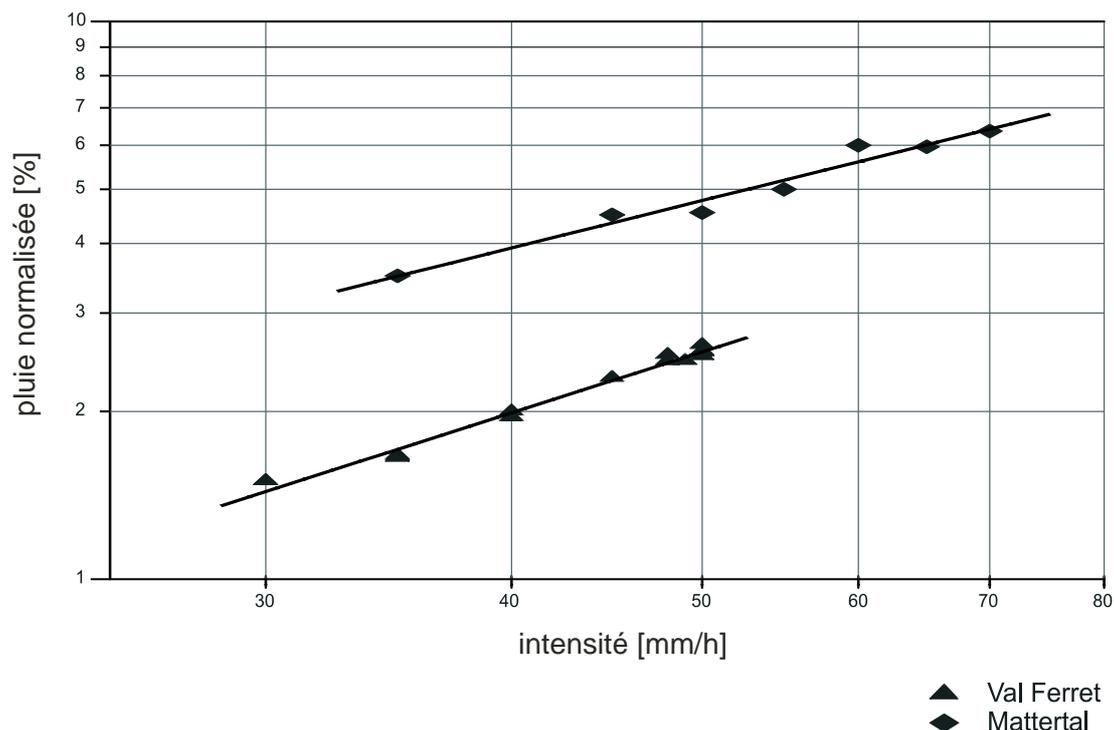


Figure 4-27: Différence entre les seuils de pluies nécessaires pour déclencher les laves torrentielles (analyse sans les non-événements) dans deux régions géologiquement différentes.

Après maints essais infructueux, les réponses à la question : "quelles variables expliquent les exceptions apparues dans les tentatives de classement ?", m'ont poussé à formuler l'hypothèse que seule une analyse multicritère pourrait apporter une réponse satisfaisante. Le manque de données directement utilisables a empêché d'aboutir dans cette voie. Cependant le choix des critères à retenir a pu être mis en évidence. Il s'agit de :

- la lithologie. C'est elle qui définit la sensibilité du substrat par rapport à l'un ou l'autre des phénomènes dégradants suivants.
- les effets tectoniques. Ceci est important car un massif rocheux de bonne qualité peut poser des problèmes de stabilité s'il a subi une forte action tectonique (par exemple pour un massif quartziteux), alors qu'un massif de moins bonne qualité ne verra pas d'apparition de problèmes de stabilité supplémentaires suite à un effet tectonique moindre.
- l'histoire holocène. L'action des agents érosifs (encore actifs de nos jours) se traduit sur les bassins versants étudiés par la quantité de matériaux mobilisables (éboulis, moraine, glacier rocheux, etc.). Tous ces éléments participent à l'alimentation des composantes granulaires et matière fine.
- l'altération. Elle dépend du climat et même du microclimat. Cela implique que l'exposition du bassin versant peut déjà avoir une influence, car l'altération sera différente en face nord de celle rencontrée en face sud. Elle concerne aussi bien la matière fine (altération des minéraux primaires en phyllosilicates) que les granules (altération des roches par gélifraction, par exemple).

Des approches similaires ont été développées pour la qualification d'un massif rocheux dans le cadre de la construction de tunnels. On peut citer la classification RMR (Beniawski 1989). Cette classification, sortie de son contexte, a été utilisée avec un certain succès pour définir l'état d'un bassin versant à laves torrentielles (Lin et al., 2000). Des améliorations devraient être entreprises, entre autres en introduisant des paramètres plus liés aux phénomènes superficiels.

4.8. Conclusion

L'analyse de certaines caractéristiques du bassin versant permet d'évaluer la probabilité¹ des laves torrentielles et l'ampleur qu'elles peuvent avoir.

L'analyse des caractéristiques morphologiques permet par exemple d'estimer la dangerosité du bassin versant en fonction des pentes (cf. § 4.3.4). L'analyse des caractéristiques hydrologiques peut indiquer des points particuliers (par exemple un saut brusque dans la courbe aire-distance, cf. § 4.4.2) qui seraient à analyser plus finement. Les indicateurs géomorphologiques permettent aussi, lorsqu'on analyse leur degré de connection avec le torrent, d'estimer la probabilité de formation de laves torrentielles.

Deux familles de formules d'estimation du volume, les formules globales et les formules géomorphologiques, permettent deux niveaux de précision. Les premières peuvent être introduites dès le diagnostic préliminaire (cf. chapitre 7) et les secondes, demandant des investigations de terrain, sont adaptées pour donner le diagnostic final du danger.

Enfin, l'analyse géologique a permis de faire ressortir seulement quelques caractéristiques pouvant être mises en relation avec les laves torrentielles.

Parmi les caractéristiques prises en compte dans ce chapitre il faut souligner l'importance de deux d'entre elles, la surface et l'altitude. La surface moyenne des 128 bassins versants retenus s'établit vers 1 km². Cette superficie est inférieure à l'échelle de bien des modèles hydrologiques. Une vérification des plages d'utilisation du modèle retenu s'impose. De plus, il est apparu que plusieurs surfaces pouvaient avoir une importance (surface topographique, hydrogéologique, productive). Il convient de bien les différencier lors de l'utilisation des modèles.

L'altitude, quant à elle, a une influence directe sur la quantité et la localisation spatio-temporelle d'une partie de l'eau du bassin versant. L'exemple présenté dégage certaines pistes utiles pour la gestion à long-terme des bassins versants.

Des progrès substantiels pourraient être faits dans le domaine des prédispositions géologiques. La compréhension de l'influence et de l'interdépendance des divers facteurs géologiques permettrait de quantifier la facilité de certaines dispositions à produire des laves torrentielles. Par manque de données ceci n'a pas été fait dans ce travail, mais les résultats préliminaires obtenus montrent qu'une analyse multivariée de la géologie pourrait être une possibilité. Cette analyse, outre la lithologie, devrait faire intervenir une quantification de la tectonique, de l'altération, de l'histoire holocène.

1. Dans le sens de savoir si d'après le bassin versant une lave torrentielle est probable ou non (si non, se pose alors la question du charriage), mais sans approche statistique.

"La géographie est le seul art dans lequel les derniers ouvrages sont toujours les meilleurs"

Voltaire

Chapitre 5

Le déclenchement

5.1. Introduction

Sans entrer dans les détails de la physique et de la mécanique, ce chapitre apporte un éclairage nouveau sur les mécanismes aboutissant à la formation d'une lave torrentielle. Deux approches ont été utilisées. La première consiste en une classification des informations bibliographiques aboutissant à distinguer les mécanismes des modalités de déclenchement. La seconde est la mise en évidence de façon expérimentale et rudimentaire du processus initial du mécanisme de déclenchement par érosion.

L'importance d'une bonne compréhension de ces mécanismes est essentiel pour permettre de relever dans le terrain les indices nécessaires à une détection des zones de déclenchement. De même, la connaissance des modalités de déclenchement permet la création de scénarios qui doivent être intégrés au diagnostic.

5.2. Les mécanismes de déclenchement des laves torrentielles

Il n'existe, à proprement parler, que deux mécanismes de déclenchement des laves torrentielles, soit :

- la formation à partir de la masse d'un glissement de terrain qui se fluidifie
- la formation par érosion suite à un ruissellement superficiel.

Plusieurs modalités mettant en cause l'un de ces deux mécanismes ont été reconnues comme cause de laves torrentielles. Le déclenchement peut être imputé à l'une des quatre modalités suivantes : l'érosion généralisée, la fluidification d'une masse glissée, le blocage momentané de l'écoulement (embâcle) et la déstabilisation du lit (rupture du pavage). L'analyse des mécanismes conduisant à la formation d'une lave torrentielle à partir de ces quatre modalités montre que les deux mécanismes cités ci-dessus expliquent l'ensemble des déclenchements.

5.2.1. Déclenchement par fluidification d'un glissement de terrain

Lorsqu'un glissement de terrain prend de la vitesse, il peut se fluidifier. S'il rejoint un chenal d'écoulement, il y a alors formation d'une lave torrentielle. Le processus même de la fluidification n'est pas encore bien compris. Le mouvement précurseur d'un tel déclenchement est typiquement celui d'un glissement de terrain.

L'analyse approfondie de ce mécanisme sort du cadre de cette thèse. En résumé, avec une vision chronologique, le premier mouvement qui apparaît dans un massif de sol est le fluage. Trois types de fluage peuvent survenir. Le fluage primaire avec une vitesse décroissante, le fluage secondaire avec une vitesse constante et le fluage tertiaire avec une vitesse croissante conduisant à la rupture (Vulliet 1986). Lorsqu'il y a rupture, celle-ci peut se propager selon une surface bien définie ou non et aboutir au déplacement d'un massif de sol. La transformation par fluidification de la masse glissée en une masse en écoulement n'est pas encore bien comprise (Fleming et al. 1989).

Une fois dans le torrent, la masse en mouvement peut s'alimenter en matériaux mobilisables (on assiste alors à un mécanisme par érosion), mais elle pourra aussi être diluée par le débit amont et se transformer en charriage.

Les causes suivantes sont généralement reconnues comme pouvant amener un compartiment de sol à se déplacer. Il s'agit des :

- variations des forces spécifiques volumiques → séisme, forces de percolation.
- variations des contraintes de surfaces → surcharges
- variations de la loi de comportement → changement de la force de cohésion avec la teneur en eau, changement des qualités mécaniques du matériau par altération ou déformations
- variations des conditions hydriques → augmentation des pressions interstitielles, modification du degré de saturation, gel créant un défaut d'exfiltration, tassements diminuant la perméabilité, infiltrations diminuant la résistance au cisaillement.

La variation des conditions hydriques a été investiguée entre autres, dans les travaux menés au laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL. Klubertanz (1999) a montré que lorsqu'on prenait en compte la nature triphasique du sol (présence d'eau, de minéraux et d'air), il existait une combinaison entre la perméabilité, la vitesse de saturation, la position initiale de l'aquifère, ainsi que la distribution temporelle de l'alimentation en eau, très défavorable vis à vis de l'augmentation des pressions interstitielles. Cette augmentation est elle-même cause d'une destruction de la structure du sol (Reid et al. 1997, Genevois et al. 2000). La figure 5-1 montre la complexité de ces diverses combinaisons de paramètres sur le déclenchement d'une lave torrentielle par fluidification d'une masse de terrain meuble. Le diagramme indique que la réaction maximum (cas 5) n'apparaît pas pour un hydrogramme extrême, mais pour une combinaison intermédiaire.

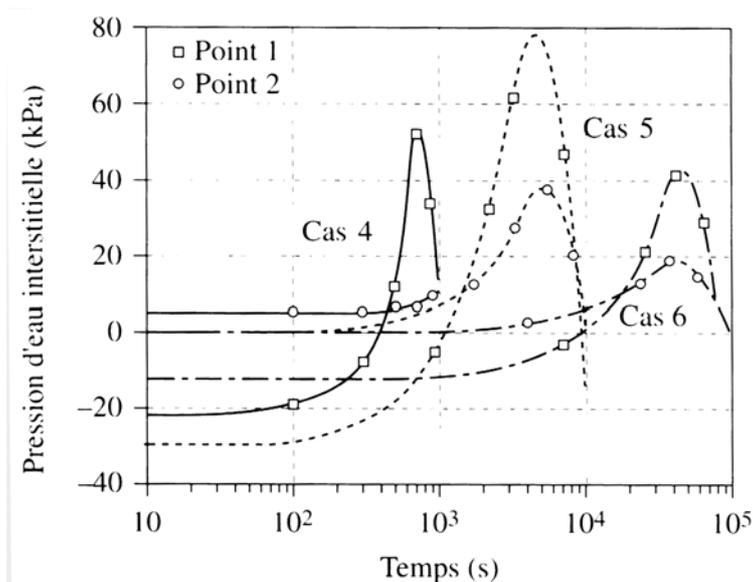


Figure 5-1: Développement de la pression d'eau interstitielle dans le temps pour trois hydrogrammes d'infiltration. Le débit maximum est atteint pour le cas 4, après 1'000 s, pour le cas 5, après 10'000 s, et pour le cas 6 après 100'000 s. Les points 1 et 2 correspondent respectivement à une mesure dans la partie supérieure et dans la partie médiane du massif de sol testé (Klubertanz et al. 2000, Klubertanz 1999).

Pour illustrer en pratique de tels déclenchements, il est intéressant de se pencher sur le cas du glissement des Peillettes (VS). Là les mouvements d'eau dans le sous-sol ont été suivis par Bianchetti et Fracheboud (2001). Ils ont ainsi montré que les déclenchements étaient favorisés lorsque la nappe est proche de la surface (cf. figure 5-2).

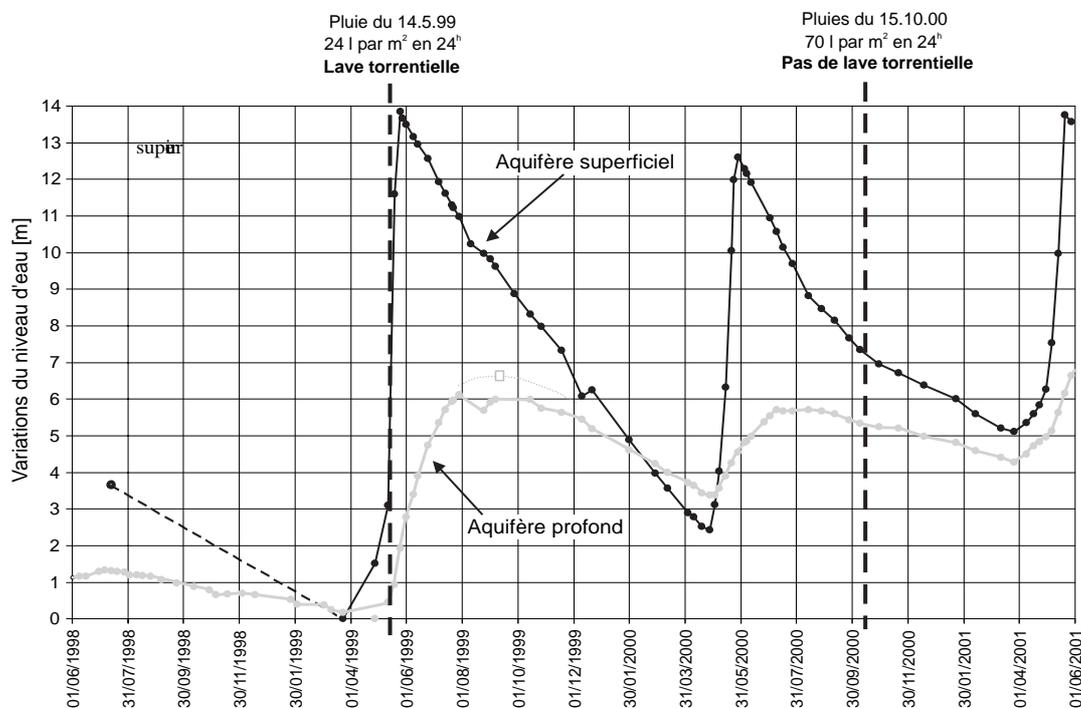


Figure 5-2: Comparaison entre la hauteur de la nappe (par rapport à la hauteur de référence fixée pour les deux aquifères par les basses eaux 1998) et la fréquence de déclenchement des laves torrentielles sur le glissement profond des Peillettes (Bianchetti et Fracheboud 2001).

Dans la nature, des glissements de terrain de très petite taille, environ 10 m^3 , peuvent être l'événement déclenchant de laves torrentielles bien plus importantes, environ $20'000 \text{ m}^3$. Ce fut le cas en octobre 2000 dans le torrent d'Orchéra (Val des Dix, Bovier 2001), où en 1997 sur les flancs du volcan Rucu Pichincha, Equateur (Perrin et al. 2000).

5.2.2. Déclenchement par érosion

Si plusieurs parties du bassin versant contribuent à acheminer des particules fines dans les talwegs, il y a formation d'un écoulement superficiel chargé. Cet écoulement va continuer à incorporer des particules, se transformer en écoulement hyperconcentré, puis en lave torrentielle (Tognacca 1999).

La cause première de ce mécanisme est l'érosion généralisée sur le bassin versant, comme le montre la figure 5-3 (les rigoles d'érosion sont indiquées par les flèches noires). De tels déclenchements sont très difficiles à identifier, car les traces de l'événement disparaissent lorsqu'on atteint les zones de départ.

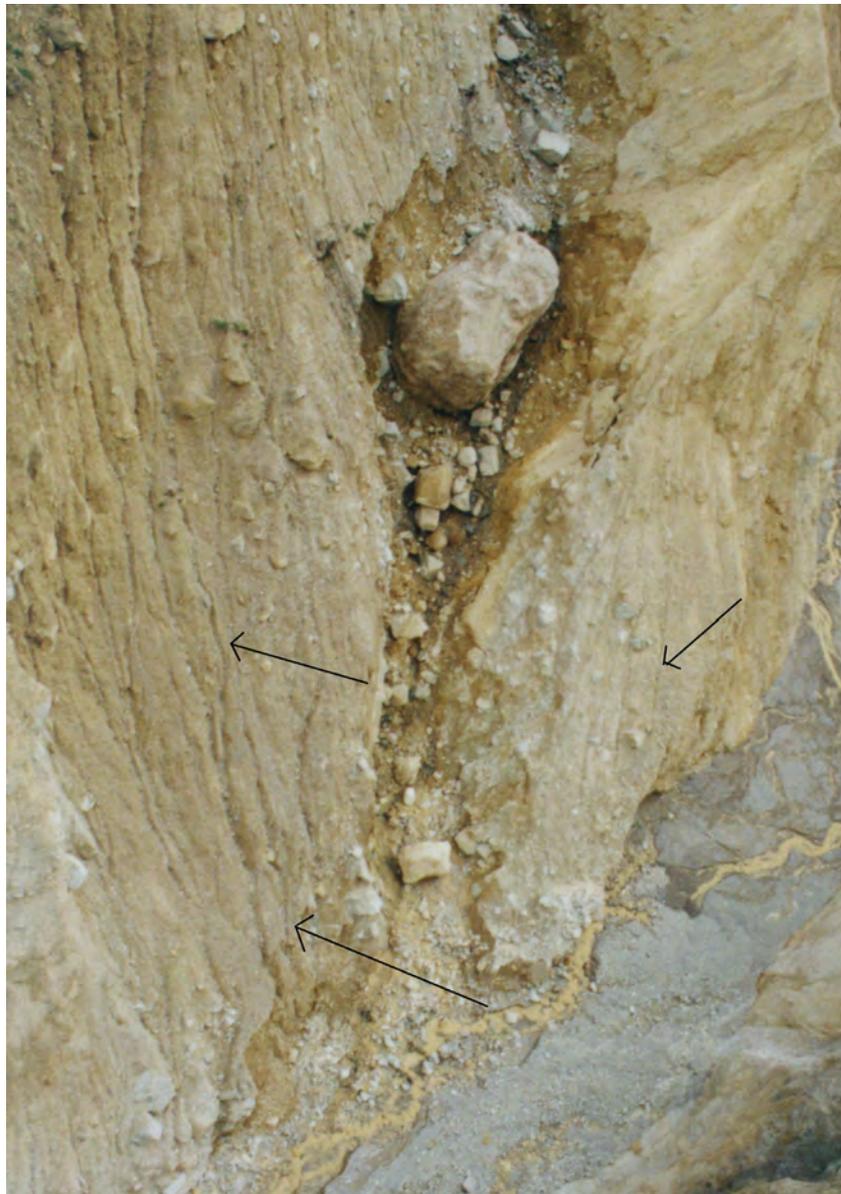


Figure 5-3: Cannelure d'érosion tapissant toute la partie supérieure du bassin versant de l'Ilgraben.

5.2.3. Les modalités de déclenchement

5.2.3.1. La déstabilisation du lit

Si une lave torrentielle, ou du charriage hyperconcentré apparaît, le pavage du lit peut être détruit. Des informations sur la résistance du pavage à l'érosion peuvent être trouvées dans le livre de Koulinski (1993). Il est très difficile de repérer de tels déclenchements, car les traces qu'ils laissent sont fréquemment éliminées par l'écoulement post-événement. La figure 5-4 montre un déclenchement de lave torrentielle qui s'est produit par déstabilisation du lit (la partie amont de la niche est certainement influencée par une érosion régressive). Une formule permet d'évaluer simplement la stabilité du lit. Elle a été établie à partir d'une courbe enveloppe d'événements survenus en Suisse (Zimmermann et al. 1997) :

$$\text{si } J > 0,32 A^{-0.2}, \text{ le lit est potentiellement instable} \quad (5.1)$$

où J est la pente du lit [m/m] et A la surface contributive amont [km²].



Figure 5-4: Déclenchement par déstabilisation du lit, Illgraben.

Cette formule provient de la courbe enveloppe déterminée à partir de 41 observations de déclenchements dans les Alpes suisses (cf. figure 5-5). Les surfaces des bassins versants impliqués vont de 0,04 à 25 km². Ce critère sera repris dans le diagnostic, permettant ainsi d'estimer sur quels tronçons il y a des instabilités potentielles. Durant l'étude, seuls trois déclenchements ont pu être identifiés comme étant dus à une déstabilisation du lit (triangle sur la figure 5-5). Deux des torrents de l'étude se trouvent sur des pentes supérieures au seuil de déclenchement (Salantin et Altebach). L'Illgraben se trouve en dessous du seuil et n'aurait par conséquent pas été détecté. Le caractère particulier de ce torrent ne remet pas cause le seuil de stabilité donné par Zimmermann et al. (1997).

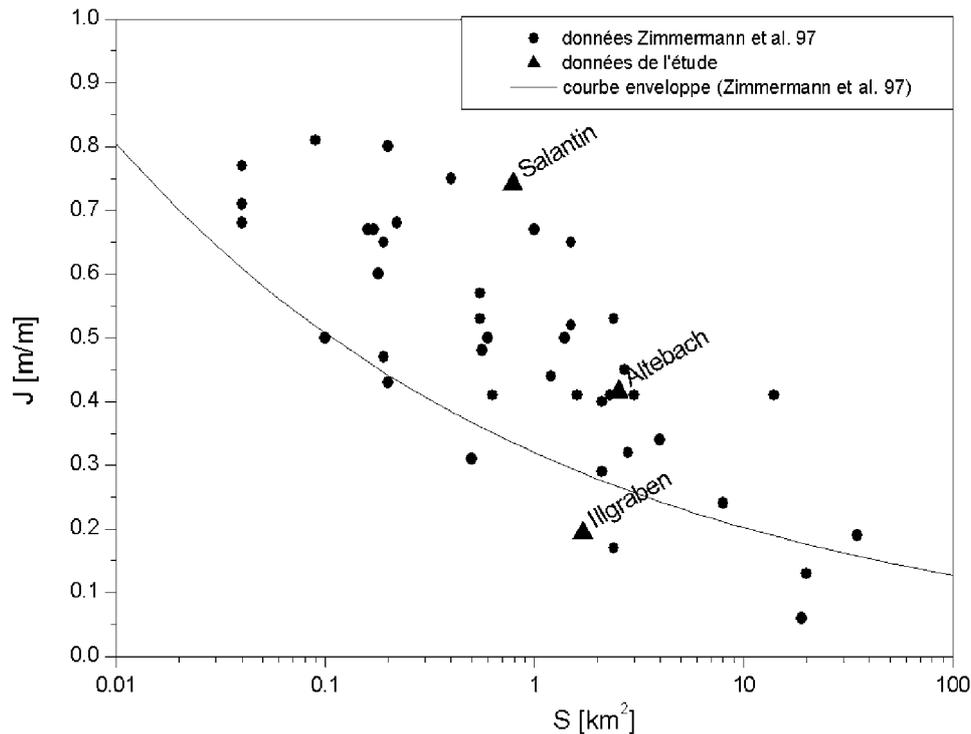


Figure 5-5: Pente du lieu de la déstabilisation du lit en fonction de la surface contributive.

5.2.3.2. La rupture de digue

Lorsqu'une masse de terre et de roche (ou un enchevêtrement de troncs) bloque le cours d'un torrent, il peut y avoir formation d'une retenue temporaire qui agit comme sur une digue. Trois processus peuvent alors aboutir à la formation d'une lave torrentielle. Il s'agit :

- D'une rupture brutale, due à la pression amont de la digue ainsi formée. Plusieurs auteurs ont modélisé les effets d'un tel déclenchement (Takahashi 1991, Hungr 1995).
- Du phénomène de renard, parfois très rapide, lié à la circulation d'eau dans le massif et qui peut aboutir à une fluidification de la masse de terre. Le mécanisme est alors semblable à celui décrit pour un glissement de terrain (cf. § 5.2.1).
- D'une érosion régressive du front aval de la masse par surverse. Le mécanisme du déclenchement est alors dû à l'érosion (cf. § 5.2.2).

5.2.3.3. Causes anthropiques favorisant le déclenchement

L'analyse d'événements récents impose une remarque. Plusieurs objets liés aux activités humaines ont accentué l'évolution des conditions qui aboutissent au déclenchement d'une lave torrentielle. Il s'agit entre autres :

- de digues paravalanches ou par-chute de blocs.
- de décharges de matériaux rocheux (ou de bois).
- de ruptures de canalisations.

Certaines laves torrentielles observées durant ce travail ont souvent pour origine une interaction complexe entre des phénomènes d'origine naturelle et l'un des trois objets cités ci-dessus. Certains de ces événements ont causé des pertes en vie humaine, en bétail et/ou de gros dégâts matériels. Le traitement de ces modalités de déclenchement dépasse le cadre de cette thèse.

Cependant, le dysfonctionnement de ces ouvrages (ou objet) est dû soit à une limitation de la propagation de l'eau (l'évacuation de l'eau est généralement prévue, mais on ne sait pas comment ces ouvrages vieillissent), soit à un apport massif d'eau en profondeur (cas extraordinaire des ruptures de canalisation).

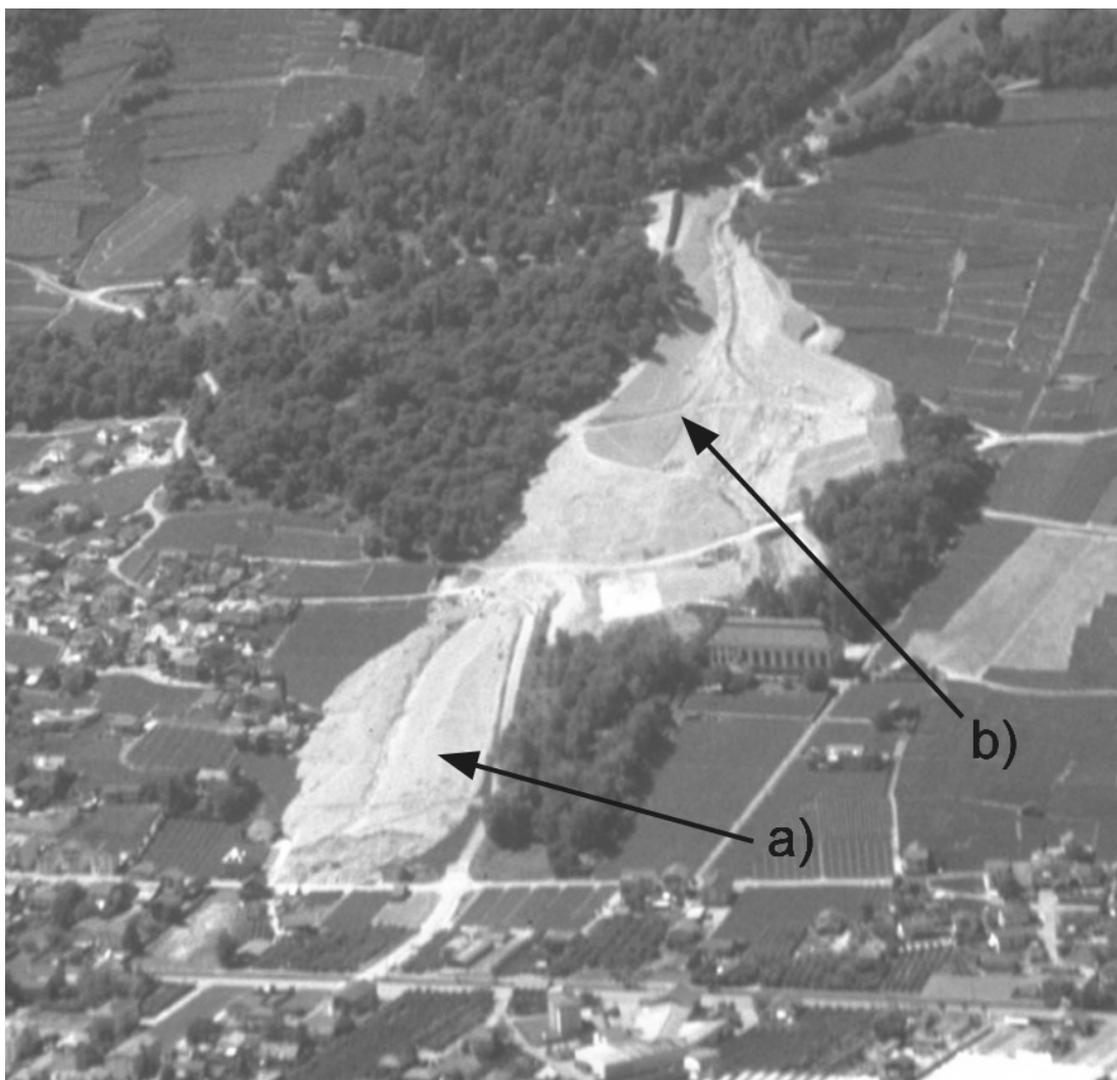


Figure 5-6: Lave torrentielle de Fully. En a) dépôt de l'événement d'octobre 2000 dû à la surverse de l'eau d'une conduite hydro-électrique dans une faille. En b) coulée d'origine naturelle ayant eu lieu le printemps suivant.

5.3. Détection des zones de déclenchement

Le diagnostic, que ce soit vis à vis du déclenchement, ou des caractéristiques probables de la lave torrentielle, comme le volume, se base sur l'analyse de la concomitance de l'eau, des matières fines et des grains grossiers. Cette analyse nécessite une cartographie détaillée et dépend de la probabilité de rencontrer sur ces zones l'un des mécanismes de déclenchement. Un tel travail est pour l'instant très difficile, aussi faut-il utiliser des moyens globaux pour délimiter les zones de déclenchement potentiel.

Sur la base du schéma proposé par Takahshi (1981), Zimmermann et al. (1997) ont appliqué en Suisse la zonation des sites de déclenchement potentiel avec les paramètres suivants (cf. tableau 5-1).

Tableau 5-1: Caractéristiques des sites de déclenchement potentiel (Zimmermann et al. 1997)

	morphologie	pente	surface contributive	déclenchement
zone 1	dans la pente	27° à 38°	0,5 ha	érosion glissements
zone 2	dans la pente en pied de falaise	> 25°	0,5 ha	glissements
zone 3	couloirs de falaise	-	-	déstabilisation du talweg
zone 4	chenal pré-existant	-	-	déstabilisation du lit

Le repérage de telles zones dans le bassin versant amène à limiter les surfaces sur lesquelles l'analyse de la disposition des trois composantes sera faite de façon approfondie. Toutefois, une telle zonation ne doit être utilisée qu'en association avec une bonne connaissance de la géomorphologie du bassin versant (présence d'indicateur géomorphologique, cf. § 4.5.1). En effet l'exemple de la figure 5-7 montre que les plages de pentes données sont relativement larges et que l'on peut être amené à rattacher une surface donnée à une zone de déclenchement probable, ou non.



Figure 5-7: Surface contributive de 0,5 ha (en rouge) dans une pente de la région des Dents du Midi. Sur l'image de gauche, les zones vertes représentent les pentes > 25°, au centre, les zones bleues les pentes > 27° et à droite, les zones jaunes les pentes > 38°.

La connaissance du bassin versant (lithologie, histoire holocène, type d'altération, tectonique, etc.) associée aux arguments développés à la section 5.4 et aux caractéristiques minéralogiques des fines, permet une meilleure qualification de la propension au déclenchement des sites (déterminée à l'aide des paramètres donnés au tableau 5-1). En effet, il est possible ainsi de réduire la surface des zones de déclenchement potentiel. L'exemple donné à la figure 5-8 illustre l'importance du bilan eau-fines-granulats.

Une falaise taillée de plusieurs couloirs y est visible. Seul l'un d'entre eux produit des laves torrentielles. Ce phénomène est régulier et dépendant seulement du dit couloir, puisqu'une deuxième lave torrentielle est venue remplir la rigole laissée par la première (flèche b). L'observation attentive du couloir d'où elles proviennent (ombre, flèche a), permet de remarquer que ce couloir a été creusé par une faille tectonique. De tels couloirs sont généralement remplis de roches broyées et de matières fines. Donc, lors de précipitations qui lessivent le couloir, les matériaux grossiers qui forment l'éboulis à l'aval, reçoivent directement un ruissellement chargé en matière fine. Tous les éléments sont donc réunis pour former une lave torrentielle. Cette situation ne se reproduit pas pour d'autres couloirs (par exemple celui sur la gauche de l'image) qui canalisent plus d'eau vers l'éboulis.

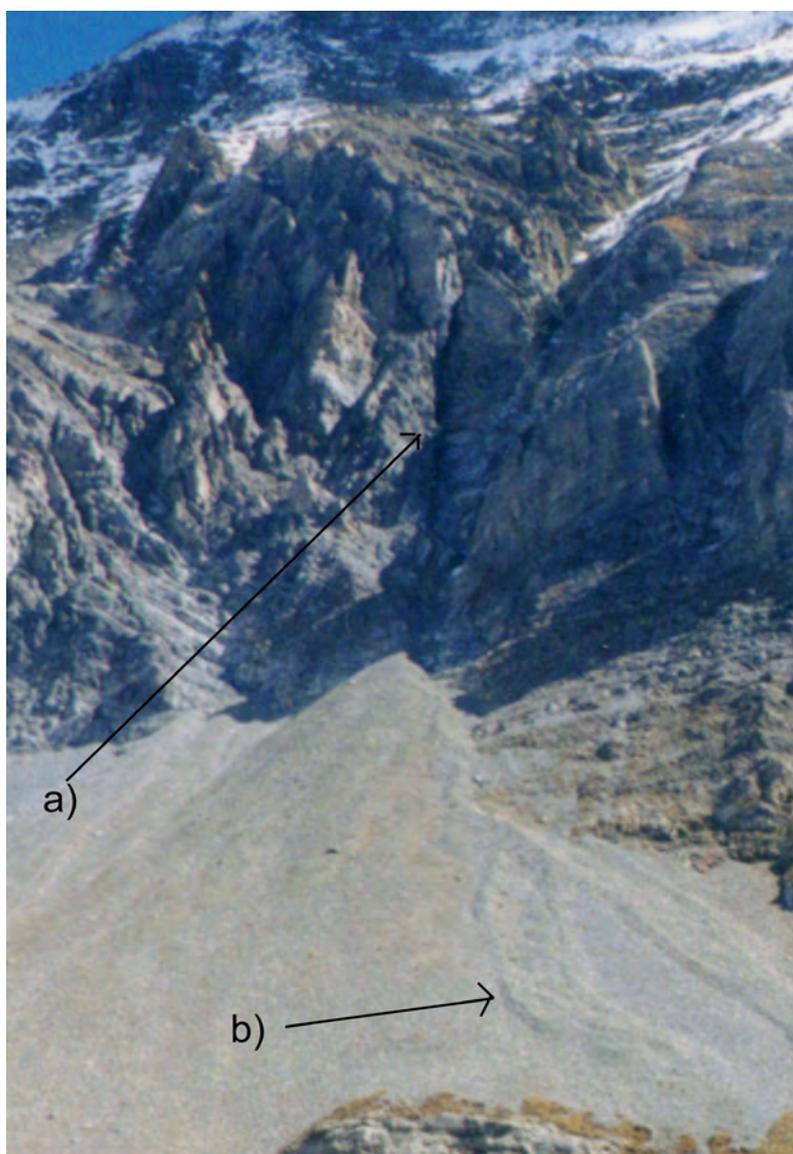


Figure 5-8: Laves torrentielles emboîtées, région du Chavalard

Cet exemple montre que la zonation proposée par Zimmermann et al. (1997) doit être affinée localement, en établissant pour chaque site de déclenchement potentiel, le bilan eau-fines-granulats.

5.4. Le déclenchement de laves torrentielles par érosion

La revue précédente a permis d'identifier les paramètres importants à relever dans le diagnostic, afin de définir les potentialités de déclenchement. Dans ce cadre l'eau est sans conteste la composante des laves torrentielles qu'il faut pouvoir le mieux diagnostiquer, mais qui est aussi la plus difficile à décrire. Cependant les composantes matières fines (matière formant la matrice des dépôts) et les matériaux grossiers (granulats) ont aussi leur importance. C'est l'interaction complexe entre ces diverses composantes qui rend possible l'analyse de l'érosion diffuse (entre autres).

5.4.1. Généralités

Sur la base des phénomènes décrits et des connaissances retirées du comportement rhéologique, en particulier sur la lubrification (la matrice formant le fluide interstitiel est alors définie comme un mélange d'eau et de particules $< 400 \mu\text{m}$), il paraît nécessaire de considérer que trois éléments sont nécessaires pour qu'une lave torrentielle se forme, comme le montre la figure 5-9.

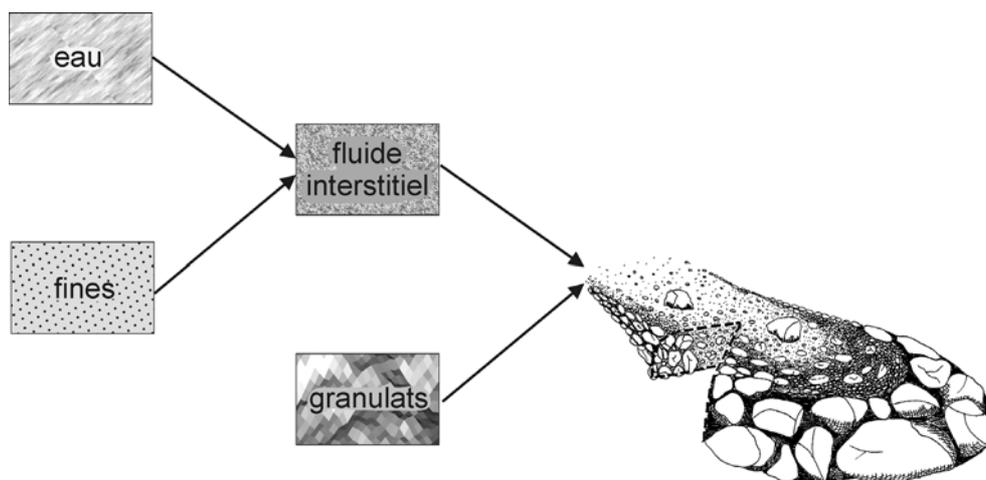


Figure 5-9: Schéma de formation des laves torrentielles impliquant un mélange d'eau et de particules fines, puis un mélange du fluide ainsi formé et de grains plus gros.

5.4.2. Séquences du déclenchement pas érosion

Cette description permet de mieux comprendre le mécanisme de déclenchement des laves torrentielles par érosion diffuse. Il est cohérent avec les observations faites par Blijenberg (1998). Ce mécanisme peut être décrit comme suit.

Phase 1 : détachement et transport de particules par **effet splash**.

Phase 2 : transport de particules par une fine couche d'eau en écoulement dont la capacité érosive est augmentée par la turbulence induite par l'impact des gouttes de pluie (Hudson 1995).

Phase 3 : augmentation de la capacité de transport du film d'eau par la mise en suspension de particules argileuses.

Phase 4 : concentration de ce ruissellement dans les premières petites rigoles (en anglais *rill*).

Phase 5 : développement d'un effet "boule de neige", les petites rigoles se déversant dans de plus gros canaux (en anglais *gully*, cf. figure 5-3) qui à leur tour finiront dans un chenal plus grand. A chaque étape, la charge sédimentaire du fluide s'accroît et change de composition (taille des particules), augmentant ainsi sa capacité à mettre en mouvement des particules d'un diamètre supérieur. Cette dernière phase est décrite en détail dans le travail de Tognacca (1999).

5.4.3. Importance pour le diagnostic

Dans le cadre d'une étude d'un déclenchement par érosion, la formation d'une lave torrentielle est limitée par deux principaux facteurs¹ :

l'eau → si le ruissellement de surface est insuffisant pour transporter tous les matériaux disponibles, l'érosion sera alors limitée. Une fois que le processus est amorcé, le débit de ruissellement superficiel a une grande influence sur la vitesse du front d'érosion (Tognacca 1999).

le substratum → s'il y a suffisamment de ruissellement mais peu de matériaux à transporter (sols peu érodables, réservoir sédimentaire faible cf. § 4.5.1), alors l'érosion sera limitée. Il est intéressant de remarquer que dans le cas où les sédiments sont toujours disponibles en quantité suffisante, il y a déclenchement dès qu'un ruissellement superficiel critique est atteint. On dit alors que le bassin versant est non contraint par l'alimentation en sédiments selon l'optique définie par Stiny (1929). Dans un tel cas, le temps de retour des événements de transport solide (laves torrentielles ou charriage) peut plus ou moins être relié avec le temps de retour du débit.

En milieu naturel non végétalisé (bassin versant en **rhéxystasie**), comme le sont la plupart des zones de déclenchement potentiel dans les Alpes, ces deux facteurs sont influencés par² :

- L'érodibilité du substratum (résistance et disponibilité en matériaux granulaires)
- L'érosivité des pluies

Si faute de données, il est très difficile d'estimer l'érodibilité du substratum, cependant l'analyse des précipitations typiques des Alpes peut amener quelques réponses.

1. Le phénomène de l'érosion étant avant tout étudié en vue de la conservation des sols agricoles, d'autres paramètres peuvent limiter l'érosion, comme la pratique culturale (Wischmeier 1976, Renard 1993)
 2. D'autres facteurs interviennent dans les modèles d'érosion, comme les pratiques culturales. Cela s'explique parce que la plupart des études spécifiques à ce problème sont orientées vers le domaine agricole (Morgan 1996, Bardou 1996).

5.4.4. Erosivité des pluies

La force érosive des pluies dépend de la vitesse terminale de chute et de la masse des gouttes. Plusieurs études ont été faites pour relier cette force érosive à des paramètres directement disponibles comme l'intensité pluviale. Un exemple d'une telle relation est donné à la figure 5-10. Comme il a été dit au chapitre 3, il est très difficile, pour diverses raisons, de connaître les pluies sur l'ensemble d'un massif montagneux. Pourtant les estimations des pluies ayant déclenché des laves torrentielles sont de l'ordre de 50 mm/h à 70 mm/h (cette étude, Haeberli et al. 1991, Zimmermann et Mani 1990, Grebner et al. 2000). Il est intéressant de comparer cette valeur avec le graphique de la figure 5-10. Ces intensités pluviales se trouvent proches du palier de la taille maximum des gouttes (érosivité maximale).

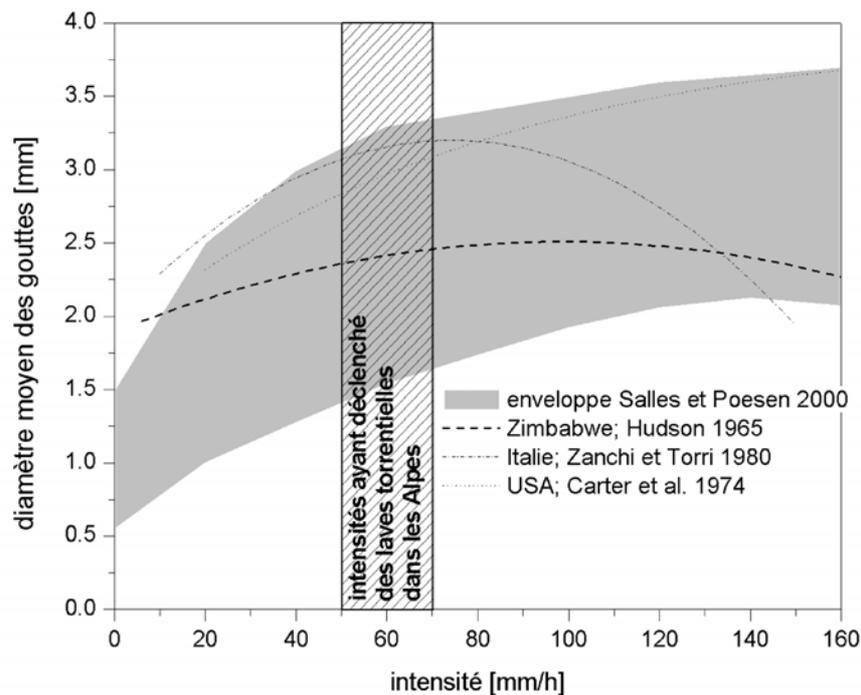


Figure 5-10: Taille des gouttes en fonction de l'intensité pluviale. La taille des gouttes peut être transformée en énergie érosive en calculant l'énergie cinétique de ces gouttes.

5.4.5. Erodibilité des sols

Ce paragraphe n'a qu'une vocation encyclopédique, car peu de travaux ont été faits sur la résistance à l'érosion des sols rencontrés en montagne. Lorsque l'on se retrouve dans la zone périglaciaire, les sols peuvent être classés comme lithosol, ou régosol (Baize et al. 1995). Ces classes de sols ne sont jamais prises en compte dans les modèles d'érosion comme RUSLE (Renard 1993). Seul les essais de Teyssere et al. (2000) effectués sur une moraine du glacier de Gruben (vallée de Saas) et ceux de Beyer-Portner et Boillat (1999), qui ont fait des essais en laboratoire, peuvent donner un élément de réponse.

Des pistes pour des recherches futures sont ainsi ouvertes, car il n'existe actuellement aucun modèle applicable en routine. Il faut donc rester prudent quant à l'utilisation de telles formules pour le diagnostic.

5.4.6. Mise en évidence expérimentale du déclenchement par érosion

5.4.6.1. Description de l'expérience

L'expérience vise à comprendre qualitativement quelles sont les séquences de mélange qui permettent d'aboutir à une lave torrentielle, ainsi que de comprendre quelles sont les premières phases d'un tel mécanisme. Pour cela, des essais de déclenchement artificiel ont été tentés dans le terrain.

Après plusieurs essais infructueux, il s'est avéré que seule une séquence de mélange particulière permettait de déclencher de véritables laves torrentielles : un écoulement lubrifié de grains et d'une pâte visqueuse qui forment un front granulaire qui dépose des levées.

Les expériences ont été effectuées sur cinq sites différents (mais sur quatre bassins versants seulement, cf. tableau 5-2). A chaque fois, elles ont été réalisées selon le même schéma, comme indiqué à la figure 5-11. Il s'agissait d'une source d'eau et d'une où plusieurs sources de matériaux selon la séquence de mélange. En profitant de la disposition naturelle, il était possible de maîtriser soit les apports d'eau (de 0,2 à 300 l/s), soit les apports en matériaux. Seul le cas de l'essai GD 1 est un peu particulier puisqu'il a été réalisé sur un torrent capté par les installations de Grande Dixence S.A., ce qui permettait un essai avec un apport d'eau important et instantané.

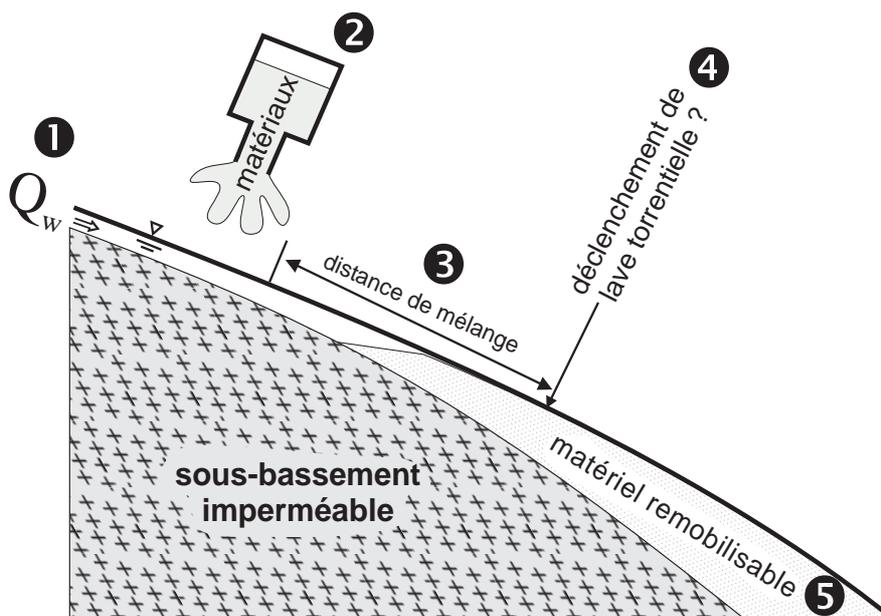


Figure 5-11: Disposition schématique des sites d'expérience.

Trois types d'expérience ont été réalisées :

- L'expérience A selon la séquence :
 - i) introduction de la matière fine en ② dans un débit constant en ①.
 - ii) mélange des fines et de l'eau en ③ jusqu'à l'amont du matériel remobilisable ⑤.
 - iii) observation du déclenchement ou non en ④.

- L'expérience B selon la séquence :
 - i) introduction de matériel fin et grossier en ❷ dans un débit constant en ❶.
 - ii) mise en mouvement de ces matériaux en ❸ formant un mélange inhomogène.
 - iii) observation du déclenchement ou non en ❹.
- L'expérience C selon la séquence :
 - i) augmentation du débit en ❶.
 - ii) les matériaux fins et grossiers se trouvent déjà mélangés dans la masse de matériel remobilisable en ❷.
 - iii) observation du déclenchement ou non en ❹.

Ces essais ont été réalisés dans le terrain avec les matériaux se trouvant à disposition et comportant toute la gamme granulométrique entre $2 \cdot 10^{-6}$ et 0,1 mètre. Lorsqu'il était possible, les fractions grossières ont été dissociées des fractions fines.

Tableau 5-2: Résultats des divers essais de déclenchement artificiel effectués au cours de cette étude.

Essai	Teneur en eau du lit	Lieu	Vitesse [m/s]	Pente	Roches	Expérience	Type de mouvement
ILL 5	Humide	Illgraben 1	0,10	20°	dolomie quartzite	A	I
ILL 6	Humide	Illgraben 1	0,10	20°	dolomie quartzite	A	I
ILL 7	Humide	Illgraben 1	0,10	20°	dolomie quartzite	A	I
TB2	Saturé	Torrent blanc	0,02	30°	prasinite	B	II
TB1	Saturé	Torrent blanc	0,02	30°	prasinite	B	III
TB3	Saturé	Torrent blanc	0,02	30°	prasinite	B	III
ILL 1	Humide	Illgraben 2	0,08	15°	dolomie quartzite	B	III
ILL 2	Humide	Illgraben 2	0,08	15°	dolomie quartzite	B	III
ILL 3	Humide	Illgraben 2	0,08	30°	dolomie quartzite	B	III
ILL 4	Humide	Illgraben 2	0,08	30°	dolomie quartzite	B	III
PEI 1	Saturé	Peillettes	0,02	30°	quartzite à séricite	B	III
PEI 2	Saturé	Peillettes	0,02	30°	quartzite à séricite	B	III
PEI 3	Saturé	Peillettes	0,02	30°	quartzite à séricite	B	III
GD 1	Sec	Pièce	2,13	25°	gneiss	C	IV

5.4.6.2. Résultats

Les résultats des divers essais de déclenchement sont résumés dans le tableau 5-2. On y trouve les valeurs des différents paramètres et la séquence de déclenchement, ainsi que le type de mouvement qui en a résulté. Les symboles adoptés pour décrire le mouvement sont expliqués sous le tableau.

Quatre types de mouvements ont été observés:

- I) → lave torrentielle bien formée, avec front et levée visible (cf. figure 1-8).
- II) → écoulement d'une masse homogène avec front sans levée.
- III) → mise en mouvement de paquets en masse, sans mélange des fines.
- IV) → pas de mouvement de masse observé.

Le tableau 5-2 appelle quelques commentaires. Les vitesses ont été calculées en fonction du débit mesuré et de la section d'écoulement. Les valeurs les plus faibles (essais TB et PEI) ont été mesurées directement. La vitesse très élevée de l'essai GD1 est celle qui a pu être estimée avec le plus de précision (installation sur le réseau de Grande Dixence S.A.). Ce qui amène une seconde remarque quant à la représentativité de cet essai.

5.4.6.3. Discussion

Ces essais sont dépendants des contraintes naturelles. La pente et le débit sont fixes. Cependant, même si des essais supplémentaires devraient être faits (entre autres pour couvrir une gamme de débit plus grande entre 4 l/s et 300 l/s), une tendance nette peut déjà être dégagée de ces essais.

Seul le type d'expérience A, a permis de déclencher de véritables laves torrentielles. La séquence de mélange utilisée dans cette expérience se rapproche du déclenchement par érosion diffuse. Si on fait l'hypothèse que le fluide résultant du mélange d'eau et de fines a encore un comportement newtonien (cf. chapitre 6), une petite analyse paramétrique montre que la vitesse critique d'érosion des grains du lit diminue lorsque l'écoulement passe de l'eau pure au mélange eau + fines. En effet, comme le fluide ainsi formé va voir sa viscosité apparente augmenter plus rapidement que sa densité, la vitesse critique lors du passage du mélange va diminuer. Julien (1998) donne l'expression de la vitesse critique V_c comme :

$$V_c = \frac{16}{9\pi} \frac{(\gamma_s - \gamma_m)}{\eta_m} R^2 \quad (5.2)$$

où γ_s est le poids volumique des solides (ici les grains), γ_m le poids volumique du mélange eau + fines, η_m la viscosité apparente du mélange et R le rayon du grain emporté. Il ressort de cette formule que l'ajout de particule en suspension, qui a pour effet d'augmenter rapidement la viscosité apparente et plus faiblement le poids volumique du mélange, conduit à diminuer la vitesse critique d'entraînement.

On peut voir sur la figure 5-12 que la vitesse critique est dépassée pour les grains d'un diamètre ≤ 4 cm lorsque la concentration solide du fluide atteint ≈ 30 %, soit le 50 % de la concentration d'entassement maximum, ce qui correspond aux observations du terrain. Si le mélange a déjà des propriétés non newtoniennes, l'analyse devient déjà beaucoup plus difficile (Huang 1997, Altinakar 2001).

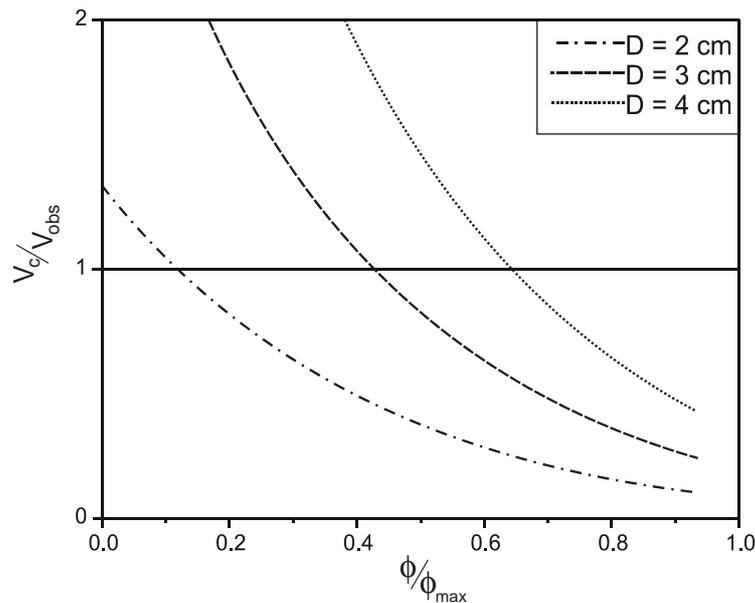


Figure 5-12: Seuil de mise en mouvement des grains en fonction du ratio concentration solide sur concentration maximale d'empilement pour les essais faits sur le site Illgraben 1.

L'essai TB 3 (cf. tableau 5-2) a montré un écoulement proche des laves torrentielles, mais les deux essais précédents avaient creusé un léger talweg canalisant l'écoulement. Cet essai n'est pas représentatif car la reproductibilité n'est pas assurée. Les essais dans l'Illgraben (ILL 1 à ILL 7) sont très intéressants car ils ont permis d'utiliser la même matière et de faire varier soit la séquence, soit la pente, soit le débit.

Il ressort de ces essais qu'il existe un point critique pour lequel le mélange fine/eau est suffisamment visqueux pour entraîner des grains de sable qui eux aussi augmentent la viscosité et la densité du mélange, permettant l'entraînement de particules plus grosses.

5.5. Conclusion

Deux résultats de ce chapitre, la différenciation entre les mécanismes et les modalités et l'importance de l'érosion, peuvent être associés aux recherches en cours sur la fluidification des masses de terre, afin de détecter les zones de déclenchement. Cette zonation du bassin versant sera reportée sur un support cartographique. Ce document sera amélioré tout au long du processus de diagnostic.

La classifications à deux niveaux des processus de déclenchement, les modalités étant subordonnées aux mécanismes, permet une vision plus fine de la réalité. Les laves torrentielles sont produites suite à deux mécanismes, l'érosion ou la fluidification d'une masse de terre. Cependant, quatre modalités peuvent mettre l'un ou l'autre, voire une combinaison de ces deux mécanismes, en cause dans la génération d'une lave torrentielle. Il est donc possible maintenant de différencier qualitativement la susceptibilité d'une zone du bassin versant (mécanisme), de la probabilité d'un scénario (modalité).

La zonation déductible du tableau 5-1 peut être affinée en faisant le bilan de la présence des fines, des granulats et de la façon dont ils peuvent être liés à l'eau. L'analyse du déclenchement pourra s'appuyer sur la compréhension des mécanismes ainsi que les travaux en cours concernant les potentialités de fluidification ou d'érosion.

L'expérience réalisée dans le terrain sur le déclenchement par érosion permet de compléter les travaux de Tognacca (1999) sur le processus initial. L'analyse qualitative de ces essais, comme la séquence de mélange, ou la plage propice des pluies alpines pour engendrer de l'érosion, indique qu'un effort de rapprochement entre les domaines de l'érosion (pédologie) et celui de la géotechnique doit être fait.

Deux domaines de recherche pourraient ainsi améliorer notre capacité de détection des zones de déclenchement, soit une meilleure appréhension des sols de montagnes et l'évaluation du changement des propriétés du fluide (viscosité) circulant dans un massif granulaire.

Ces recherches ne devraient être entreprises qu'après la reproduction de l'expérience en conditions maîtrisées et en établissant un protocole exhaustif des séquences de mélange.

"[Le naturaliste] entend le bruit sourd et profond des explosions que produit le dégagement de ces fluides élastiques [...] et voit jusque dans leur fond les nombreux cratères [...] de l'Etna"

H.-B. de Saussure, 1779

Chapitre 6

Les caractéristiques intrinsèques des laves torrentielles

6.1. Introduction

Le but de ce chapitre est de pouvoir estimer les paramètres des lois de comportement nécessaires au modèle d'écoulement. Afin de pouvoir rendre compte de la différence entre les bassins versants, l'un des critères des modèles était de pouvoir relier la valeur de ces paramètres à des observations et des mesures provenant du terrain. Cette estimation représente l'étape finale du diagnostic, étape qui précède la modélisation de la propagation des laves torrentielles (finalisée par une carte de danger). Les paramètres à estimer dans le diagnostic dépendent donc du modèle choisi par la suite. Parmi tous les modèles existants, le choix s'est reporté sur une famille de modèles qui permet de rendre compte exhaustivement des observations de terrain. D'autres modèles sont possibles (cf. ci-dessous), dans ce cas ce sont d'autres paramètres qui doivent être donnés par le diagnostic.

Dès les années 1990 des différenciations ont été faites entre divers comportements de laves torrentielles, principalement le comportement boueux et le comportement granulaire. Les classifications qui en ont résulté une dizaine d'années plus tard montrent que phéno- minologiquement, on tend vers une classification universelle (Ancy 1999, Takahashi 2001). Toutefois ces diverses classifications se basent (historiquement) sur des approches différentes.

Le figure 6-1 résume les points de départ de ces diverses approches. Deux options de la modélisation du mouvement ont été utilisées jusqu'à aujourd'hui. L'une essaie de dériver directement les équations du mouvement (branche de droite de la figure 6-1) et l'autre, plus détaillée, essaie d'obtenir une loi de comportement avant de l'introduire dans un jeu d'équations décrivant le mouvement.

Les modèles de cette deuxième approche sont influencés par trois types de considérations : soit des considérations microstructurelles, expérimentales ou phénoméno- logiques. Chacune de ces considérations peut ensuite être traitée sur des bases différentes (cf. figure 6-1). Certaines ne sont valables que pour un type de lave torrentielle et d'autres sont plus générales.

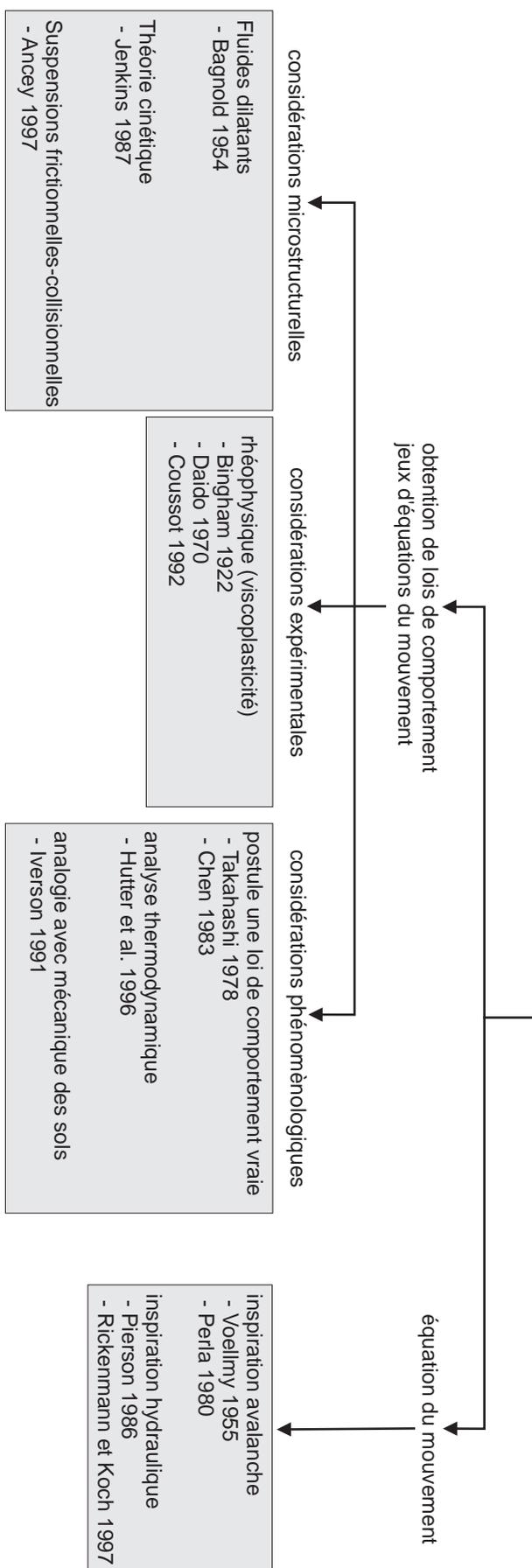


Figure 6-1: Origines des diverses modélisations possibles des laves torrentielles

Les modèles issus de la première option (dérivation directe des équations du mouvement) sont plus globaux et s'inspirent principalement du domaine des avalanches et de l'hydraulique classique. Une autre classification possible pour les modèles de la deuxième options est de considérer (1) une fluidité quasi-homogène (Bingham 1922, Coussot 1992), (2) un écoulement granulaire (Bagnold 1954, Takahashi 1978), (3) un comportement bi-phasique (Iverson 1991).

Les développements utilisés dans ce chapitre résultent de l'option passant par l'obtention des lois de comportement. Ces modèles se basent sur des considérations à la fois microstructurelles et expérimentales. Ils ont pu bénéficier de l'intégration des travaux de Coussot (1993) et d'Ancey (1997) et de la synthèse qui en a été tirée (Ancey 1999). Ce cadre n'exclut pas forcément d'autres approches, mais implique un vocabulaire relatif à cette dernière uniquement.

6.2. Rappels et énoncé du problème

6.2.1. Rhéologie

La rhéologie est la science des relations entre les contraintes et les déformations d'un élément de volume d'un corps, compte tenu de l'histoire de ces déformations et ainsi que des valeurs actuelles de leur dérivée par rapport au temps (Groupe Français de Rhéologie 1988). C'est sur la base de l'analyse des déformations apparues sur le corps représenté par la lave torrentielle, ainsi que sur les contraintes nécessaires à ces déformations, qu'est ici envisagée l'étude de l'écoulement. L'accent sera donc mis sur la contrainte et en particulier la contrainte seuil, plus que sur la viscosité du mélange. Toutefois le lien entre ces deux grandeurs, contrainte et viscosité, est facilement établi dans le cas d'un fluide newtonien :

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (6.1)$$

où η est la viscosité [Pa s], τ la contrainte de cisaillement [Pa] et $\dot{\gamma}$ le taux de cisaillement [s^{-1}]. Dans le cas d'un fluide non newtonien cette relation est plus complexe et doit être déterminée en fonction des divers types de comportements.

Avant de définir ces différents comportements rhéologiques, il faut aussi donner la définition d'un fluide. Voici la définition rhéophysique d'un fluide qui est donnée par Coussot et Ancey (1999) : " Un fluide est formé en plaçant dans un volume délimité de l'espace un certain nombre d'éléments de formes, de tailles et de natures variées (atomes, molécules, billes de verre, cailloux, etc.). Ces éléments interagissent de manières diverses et sont distribués dans l'espace de façon désordonnée à longue distance. Enfin les propriétés mécaniques du fluide, après un temps de repos suffisant, ne varient pas sensiblement lorsque les éléments sont redistribués dans l'espace d'une manière quelconque et plus ou moins aléatoire. Ceci traduit notamment l'absence d'une configuration privilégiée mais n'exclut pas un comportement élastique pour de faibles déformations associé à une configuration privilégiée provisoire".

Le **rhéogramme** présenté à la figure 6-2 illustre les divers comportements rhéologiques possibles pour un fluide. Les laves torrentielles sont des fluides à seuil rhéofluidifiant (en échelle non logarithmique), dont le modèle généralisé est représenté par une loi de Herschel-Bulkley de la forme (Steffe 1996) :

$$\tau = \tau_c + K \dot{\gamma}^n \quad (6.2)$$

où τ_c est le seuil de contrainte [Pa], K est appelé consistance dont l'unité dépend de n , et n est un index de comportement de l'écoulement.

- Si $\tau_c = 0$, et $n = 1$, on retrouve l'expression d'un fluide newtonien (alors $K = \eta$).
- Si $\tau_c \neq 0$, et $n = 1$, on obtient une loi de Bingham pour un fluide à seuil.
- Si $\tau_c = 0$, $n > 1$, on obtient une loi de Ostwald pour un fluide rhéoépaississant.
- Si $\tau_c = 0$, $n < 1$, on obtient une loi de Ostwald pour un fluide rhéofluidifiant.

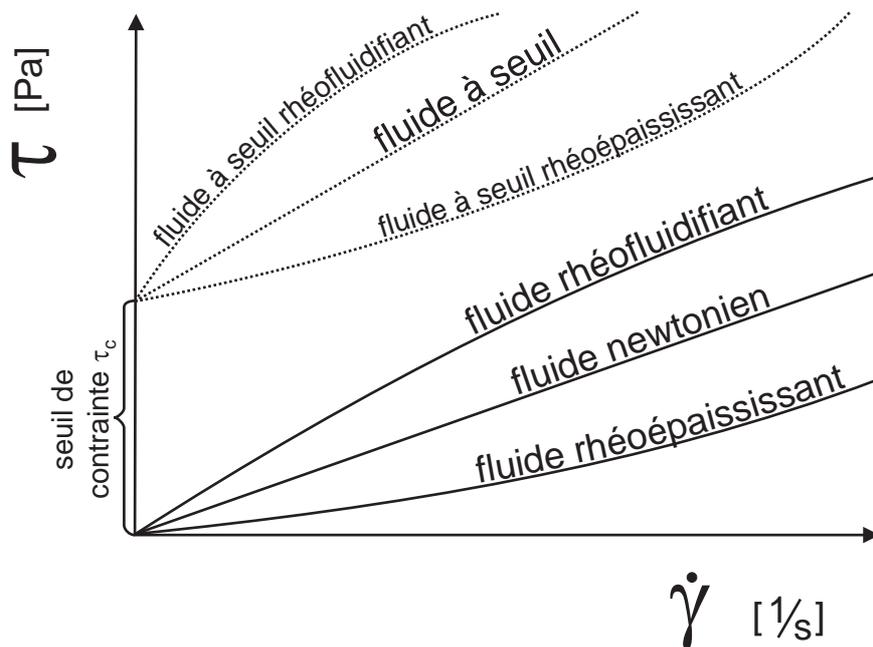


Figure 6-2: Divers types de comportements rhéologiques pour les fluides.

6.2.2. Rhéologie des entités fonctionnelles

Comme cela a été défini au chapitre 2, les laves torrentielles sont des événements transitoires comportant trois entités fonctionnelles soit : un front très granulaire; un corps composé d'un fluide matriciel et de grains; une queue en écoulement hyper-concentré. Chacune de ces composantes a une implication différente pour la gestion du danger. Des formules (non testées dans le cadre de cette thèse) permettant d'estimer certaines de ces caractéristiques seront données à l'annexe 10. Les considérations qui suivent ne sont valables que pour une échelle de temps et d'espace identique, l'échelle d'un homme à pied ayant une vision instantanée.

6.2.2.1. Le front

Le front est la partie de la lave torrentielle qui déterminera la section maximale. La connaissance de cette section est nécessaire pour le dimensionnement des ponts, des passages sous-routes, etc. Les caractéristiques importantes sont :

Q le débit; **V** la vitesse; **h** la hauteur d'écoulement.

Le front est aussi le responsable de destructions lors d'impacts directs. Dans ce cas, il faut connaître :

V la vitesse, ρ la densité de la lave torrentielle, \varnothing le diamètre des plus gros blocs.

Des essais en laboratoire ont montré que le front n'avait pas d'influence sur le lit du torrent (Tognacca 1998). Cela laisse supposer que le front ne participe pas à l'érosion du lit, donc à l'alimentation du corps de la lave torrentielle. Cette hypothèse demande encore à être vérifiée dans la pratique car un pré-front de charriage hyperconcentré précède souvent le front (visible sur la partie gauche des diagrammes de la figure 6-3). Durant les essais en laboratoire, cet effet n'a pas été observé.

Au niveau rhéologique, le front peut être vu comme un milieu granulaire lubrifié, où la taille des pores est suffisamment grande pour permettre une redistribution aisée des deux fluides (boue et air). A la même échelle d'observation que le corps, le front n'est pas macroscopiquement monophasique.

Généralement, le premier front est plus important que les fronts secondaires (visibles sur les événements de la figure 6-3). Ces fronts secondaires ont une apparence identique au premier front. Ils sont dus avant tout à un phénomène d'alimentation de l'écoulement, même si des observations supplémentaires sont nécessaires pour vérifier cette hypothèse.

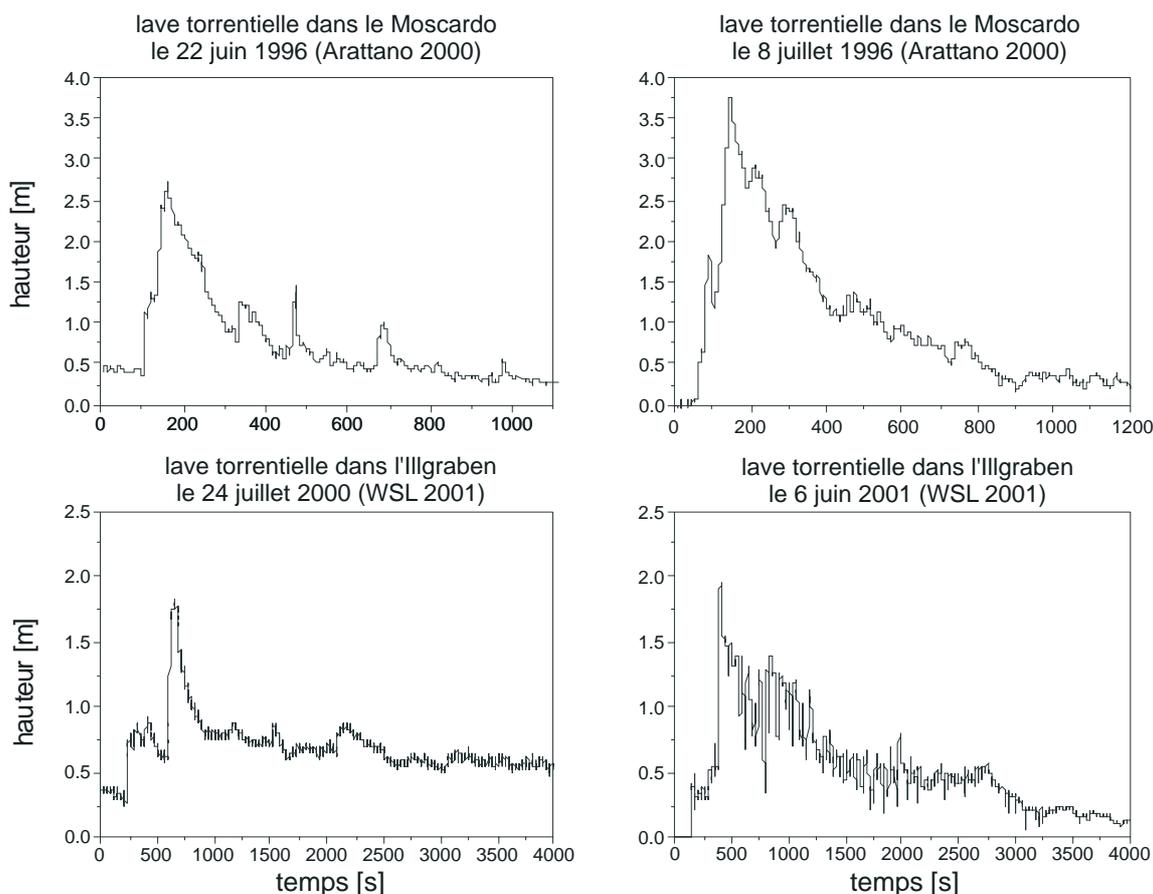


Figure 6-3: Différentes hauteurs d'écoulement (lavogramme) déterminées sur les torrents du Moscardo (Arattano 2000b, et de l'Ilgraben (données échosondeur WSL)

6.2.2.2. Le corps

Le corps est la partie qui détermine le volume de l'événement. Il est important pour le dimensionnement des plages de dépôt. C'est aussi le corps qui est responsable de la durée et de l'intensité des efforts de frottement sur les parois (provoquant l'érosion) et les obstacles qui ont résisté au front. Les caractéristiques importantes sont :

Vol le volume ; **t** la durée; τ_{pa} la contrainte à la paroi.

Dans le corps, des blocs de taille bien supérieure aux constituants du fluide homogène sont transportés. Ils peuvent provoquer des impacts directs. Les caractéristiques importantes sont alors :

\varnothing le diamètre des blocs; **V** la vitesse

Des essais préliminaires montrent qu'une partie du lit est mise en mouvement sous le corps pouvant dans les cas exceptionnels aboutir à des érosions importantes. On est alors intéressé par :

h_e la profondeur d'érosion.

Cependant on ne sait pas pour le moment à quelles caractéristiques de l'écoulement cette hauteur peut être reliée.

Les essais présentés plus loin ne permettent de caractériser que cette partie de la lave torrentielle. De plus l'existence probable d'un fond mobile doit être l'objet de recherches approfondies, car cela influence l'établissement du profil vertical de vitesse.

6.2.2.3. La queue

La queue et la fin du corps (la transition entre le corps et la queue n'étant pas nette) montrent que dans les cas fréquents (laves torrentielles annuelles), il y a déposition du matériel transporté sur toute la section du chenal. L'écoulement hyperconcentré qui suit érode ces matériaux plus ou moins fortement.

Les caractéristiques de cette partie de la lave torrentielle sont moins défavorables, donc moins importantes pour la gestion du danger.

6.2.3. Variations des caractéristiques des laves torrentielles

Les écoulements observés (synthèse de 32 laves torrentielles observées et de 28 observations de traces fraîches) montrent une très grande variabilité. Ils passent d'une allure de béton fluide (voire même de crème caramel !) à celle d'un flot de roche à peine lubrifiée. Les principales différences qui concernent cette partie du diagnostic (caractérisation des écoulements) sont :

- les pentes d'arrêt entre 1° et 18°.
- la forme des dépôts allant de nettes et arrondies à diffuses et planaires.
- la texture des dépôts allant de homogène et cohésive à hétérogène et particulaire.
- l'érosion du lit entre 0 et 10 m (voire au contraire déposition).
- Le volume événementiel mis en mouvement est lui aussi très variable. De plus il est difficile de déterminer son influence sur les lois de comportement.

- La concentration en matériaux solides, elle varie peu, mais on verra plus loin qu'elle intervient sous forme d'une loi puissance.

Au vu de ces différences peut-on utiliser des lois de comportement identiques pour tous ces écoulements ? Il semble que non. Peut-on alors utiliser ces différences pour nous aider à choisir le bon modèle ? Oui, cela semble possible.

6.3. Différenciation rhéologique des laves torrentielles

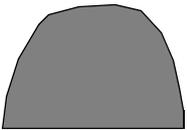
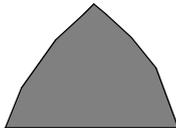
La classification choisie est basée sur la mécanique des milieux continus en s'appuyant sur des études rhéophysiques. Elle peut facilement être reliée aux observations de terrain. De plus elle est généralisable à d'autres phénomènes de transport tels que les avalanches et les laves volcaniques (Coussot et Ancey 1999).

6.3.1. Base mécanique

Cette classification, présentée au tableau 6-1, est le résultat d'un travail de longue haleine commencé par l'étude du comportement viscoplastique par une approche expé-

Tableau 6-1: Classification rhéologique des laves torrentielles. La convention suivante a été adoptée pour définir l'intensité ou la quantité (Ancey 1999) :

- très faible;
- faible;
- + forte;
- ++ très forte.

Nom commun	boueuse	granulaire	fluide ¹
Nom scientifique	viscoplastique	frictionnel-collisionnel	frictionnel-visqueux
Forme des dépôts	réguliers, avec des limites bien définies, très cohésifs une fois secs 	chaotiques, sans limite franche, peu cohésifs une fois secs. 	en terrasse alluvionnaire, très cohésifs une fois secs. 
Pente d'arrêt	$\geq 2^\circ$	$\geq 10^\circ$	$\leq 1^\circ$
Modèle rhéologique	Herschel-Bulkley Bingham	Coulomb	Coulomb à V -- Newtonien à V ++
Granulométrie	grains ++ matrice fine ++ argile +	grain ++ matrice fine -- argile --	grain - / + matrice fine ++ silts + argile -

1. Dans la première classification donnée par Ancey, ce type de comportement a été appelé lahar car seuls les matériaux volcaniques présentaient un tel comportement. Par la suite des matériaux provenant de laves torrentielles alpines ont présenté un comportement similaire. Aussi pour éviter toutes confusions, je propose d'appeler ce comportement fluide.

mentale (Coussot 1992) puis complété par l'étude du comportement frictionnel-collisionnel avec une approche microstructurale (Ancey 1997). L'étude du comportement viscoplastique est plus avancée que celle du comportement frictionnel-visqueux, mais le cadre général a été formulé par Ancey (1999).

Cette classification a été choisie pour les raisons suivantes :

- elle donne une bonne correspondance avec le terrain;
- elle permet une meilleure prise en compte du mélange boue/grain;
- elle offre la possibilité de faire des mesures en laboratoire et sur le terrain;
- peu ou pas de paramètres sont pris par défaut;
- elle offre la possibilité d'utiliser par la suite des méthodes simplifiées à l'usage du praticien (Coussot 1996).

Un défaut est de se baser sur des essais très fins, parfois difficiles à réaliser. L'évolution des variables selon une loi puissance (avec des exposants élevés entre 8 et 10) en fonction de la concentration solide et la nécessité d'extrapoler les valeurs (à cause d'une limitation des appareils de mesure) rendent délicate l'analyse des matériaux naturels.

6.3.2. Démarche

La démarche adoptée était itérative. Entre chaque étape un aller et retour a été fait entre le laboratoire et le terrain. Le but était de faire correspondre les informations provenant de l'un et l'autre. J'ai choisi délibérément de rester à un niveau de détail moyen afin de satisfaire :

- un besoin de généralisation (demande du mandant, le canton du Valais)
- la contrainte logistique qui ne permettait pas un niveau de détail accru sur quelques torrents vu la durée de travail limitée.

La première étape a consisté à étudier les dépôts sur le terrain et à essayer de les comparer à la classification de Ancey (1999). Cette étape avait pour but d'établir le niveau de correspondance entre la théorie et le terrain. Pour que ce but soit considéré comme atteint, il fallait qu'en classant les dépôts, on n'obtienne pas de nouveau comportement rhéologique, ni qu'une part importante des dépôts soit de type indéterminé.

Dans la deuxième étape, il a fallu vérifier au laboratoire que les formes de dépôts correspondaient bien au type rhéologique prévu.

Une fois vérifié le bien fondé de cette classification, elle a servi de base aux étapes ultérieures visant à mieux comprendre la rhéologie particulière des laves torrentielles, ainsi que de pouvoir caractériser les matériaux mis en jeu. C'est par ces recherches que des possibilités de prédiction pourront voir le jour.

6.3.3. Résultats des observations de terrain

Afin d'établir s'il existait une correspondance entre la classification rhéologique des laves torrentielles et la nature, le principal travail a consisté en des reconnaissances de terrain. Un classement des traces de dépôts a été effectué sur chacun des torrents auscultés en suivant la classification (cf. tableau 6-1). Des dépôts de charriage hyperconcentré ont aussi été intégrés à cette étude car ils sont responsables des deux événements impliquant les plus

grands dégâts de cette dernière décennie en Valais, soit Brig en 1993 et Baltschieder en 2000. De plus il existe toute une gamme de torrents où les deux types de phénomènes sont possibles en alternance (cf. chapitre 4).

La figure 6-4 donne le résultat de cette première reconnaissance. Seuls quelques torrents provoquent des traces qu'il est difficile de classer. De plus le doute sur la classification de ces traces reste lié à deux comportements seulement, le comportement viscoplastique et le comportement frictionnel-collisionnel. Aucune autre typologie de déposition n'est apparue. La classification proposée est donc pertinente sur le plan des observations de terrain.

Si l'échantillon est de petite taille ($n=35$) et peut-être pas entièrement représentatif statistiquement parlant, il permet tout de même de connaître l'importance des différents comportements sur le territoire valaisan.

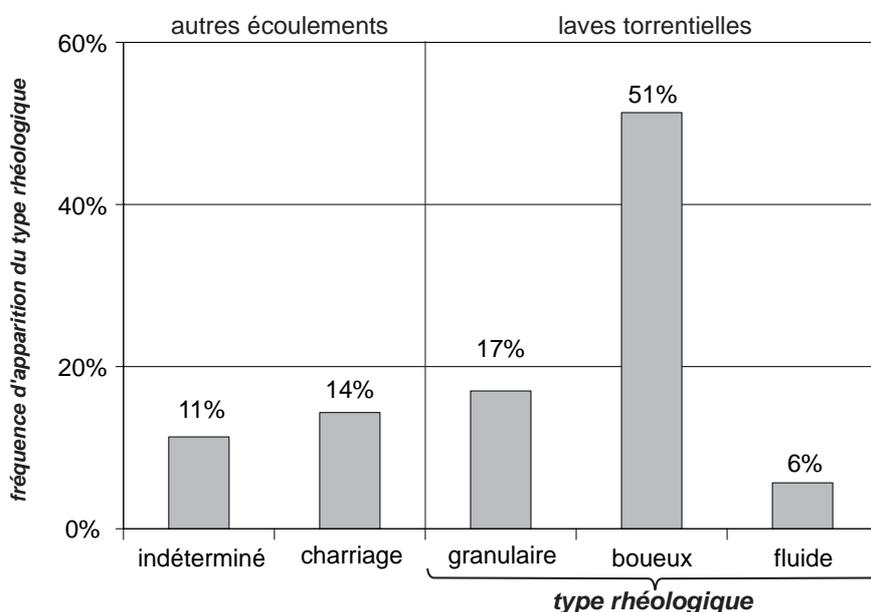


Figure 6-4: Classification des dépôts de 35 torrents selon le type rhéologique.

6.3.4. Résultats des essais rhéométriques

Avant d'adopter la classification présentée au tableau 6-1, il faut encore vérifier la concordance entre les comportements prévus par la théorie mécanique et ceux observés sur des matériaux naturels. Pour cela plus de 40 échantillons de dépôts de laves torrentielles ont été cisailés au rhéomètre. Des précisions quant au déroulement de cet essai sont donnés à la section 6.4.

Sur la figure 6-5 on peut voir qu'il y a une bonne correspondance entre les courbes d'écoulement théoriques et celles observées pour le comportement viscoplastique. Cependant (non visible sur la figure) j'observe une évolution temporelle (hystérèses non réversibles) des échantillons. Cette évolution peut être due à plusieurs effets perturbateurs, comme l'évaporation (la teneur en eau diminue d'environ 2 % durant l'essai) et la sédimentation. Il n'est pour l'instant pas possible de dire si cette observation est à relier à une différence dans le processus de déstructuration du matériel, le seuil de contrainte pouvant alors chan-

ger s'il est approché par un faible ou un fort taux de cisaillement, ou si elle ne reflète que l'influence des effets perturbateurs cités ci-dessus.

Pour les laves torrentielles au comportement collisionnel-frictionnel, la courbe expérimentale type donne l'impression qu'un comportement mixte viscoplastique/collisionnel-frictionnel est observé. Il n'est pourtant pas possible de dire (à partir des essais menés ici) si pour une autre échelle temporelle la courbe ne se rapprocherait pas de la courbe théorique. L'effet observé est-il dû à des effets perturbateurs (dans ce cas l'évaporation est proche de 3 %) ou à des effets microstructuraux non détectés? Si aucune donnée quantitative ne pourra être tirée de ces essais, leur forme est suffisamment caractéristique pour qu'elle ne soit pas confondue avec celle des autres comportements. Je peux ajouter qu'il n'est pas nécessaire d'attendre la fin de l'essai pour connaître ce résultat. En effet, pour les échantillons collisionnels-frictionnels (et seulement ceux-ci), le crissement des grains frottant les uns sur les autres est distinctement audible.

Pour les laves torrentielles au comportement frictionnel-visqueux, il y a une différence entre la courbe d'écoulement prévue et celle observée. Ceci est dû avant tout à la géométrie utilisée pour la détermination rhéométrique. La pâte au comportement frictionnel-visqueux est en effet sujette à la sédimentation. La géométrie plan-plan n'est dans ce cas pas la plus adéquate. Cependant l'essai présenté à la figure 6-5 est reproductible. Le comportement rhéologique observé montre une évolution temporelle négative forte à chaque essai. On verra au sous-paragraphe 6.4.3.2 que cette particularité permettra d'expliquer certaines observations faites sur ce type de pâte.

Les buts visant à valider la classification choisie sont donc atteints :

- sur le terrain, on obtient peu de traces dont le rattachement à un type de comportement rhéologique soit problématique.
- au rhéomètre, chaque comportement donne une réponse différenciée et quasiment conforme aux prédictions théoriques.

On considère donc cette classification comme pertinente. Elle servira de base pour les analyses subséquentes.

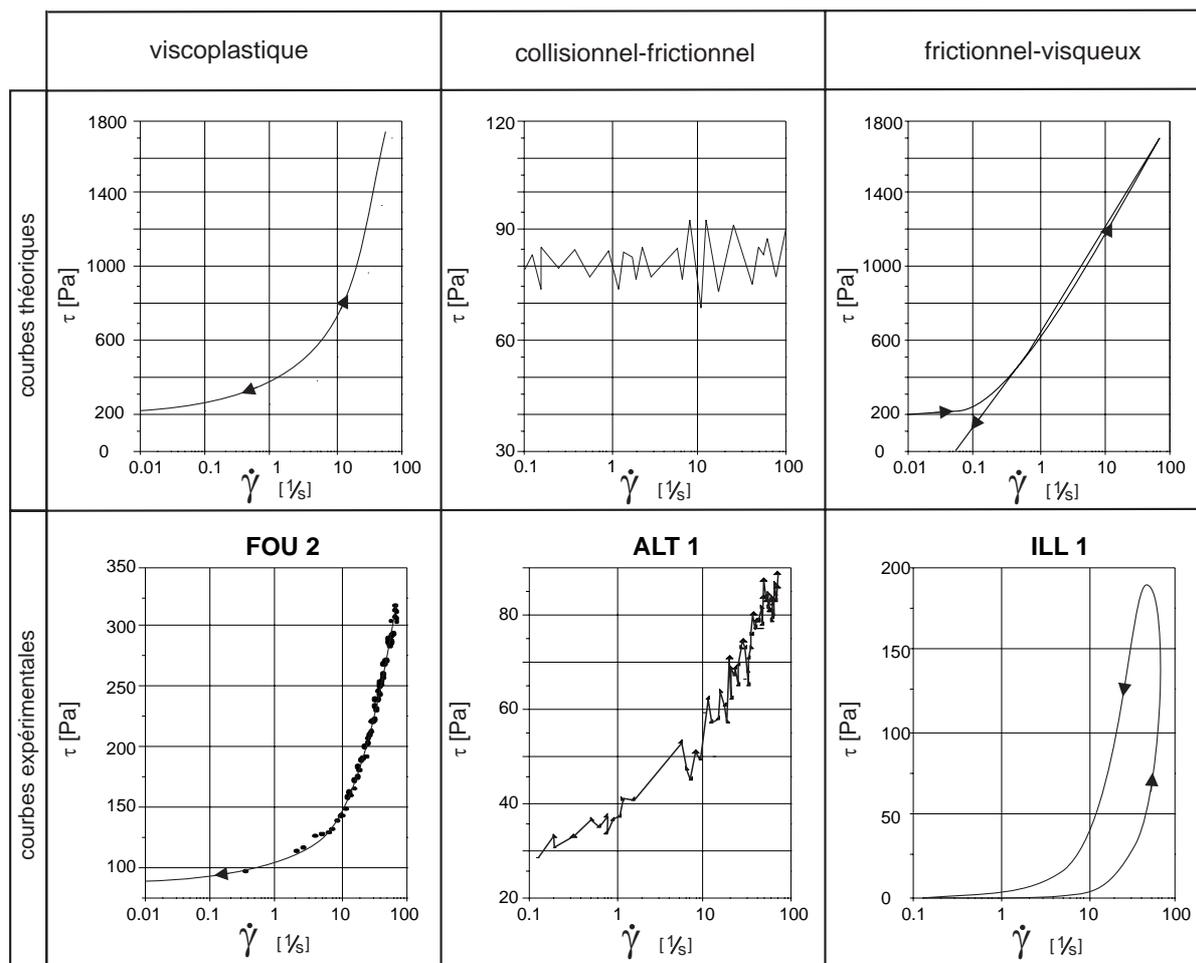


Figure 6-5: Correspondance entre les courbes d'écoulement prévues (en haut, Ancey 1999a) et celles observées, illustrées par trois des essais effectués au cours de l'étude (en bas). τ représente la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement.

6.4. La caractérisation rhéologique des dépôts

Pour caractériser la rhéologie des dépôts de laves torrentielles, la courbe d'écoulement a été déterminée sur le matériel, écrêté à 400 μm . Ces tests ne sont donc représentatifs que du fluide matriciel du corps de la lave torrentielle. Une régression permet d'extrapoler ces résultats à l'ensemble de la lave torrentielle (cf. § 6.5.2., et figure 6-15).

Ces essais ont été réalisés sur un rhéomètre pouvant être conduit en déformation. L'appareil utilisé est un rhéomètre Haake de type Rheostress RS100 (cf annexe 9). Un tel appareil est nécessaire pour la mesure de très faibles couples ainsi que des très faibles déplacements correspondants.

Seule la configuration plan-plan a été utilisée dans cette étude (cf. figure 6-6). Le plateau était du type Haake PP35. D'autres configurations plus complexes sont possibles avec l'appareil utilisé. Elles n'ont pas été retenues pour les raisons suivantes :

- Possibilité d'observer les dysfonctionnements de l'essai (sédimentation, rupture de l'éprouvette, glissement des outils par rapport à l'éprouvette).

- Possibilité de maîtriser la mise en place de l'échantillon, ce qui n'était pas le cas avec une configuration à double cylindre où la maîtrise de la hauteur est primordiale. Cette maîtrise n'était pas possible avec certains des matériaux utilisés.
- Il n'y a pas de coincement des grains dans l'éprouvette, ce qui peut arriver avec la configuration cône-plan.
- Possibilité de réaliser une rugosité pour un moindre coût, ce qui n'est pas possible avec une géométrie cône-plan.

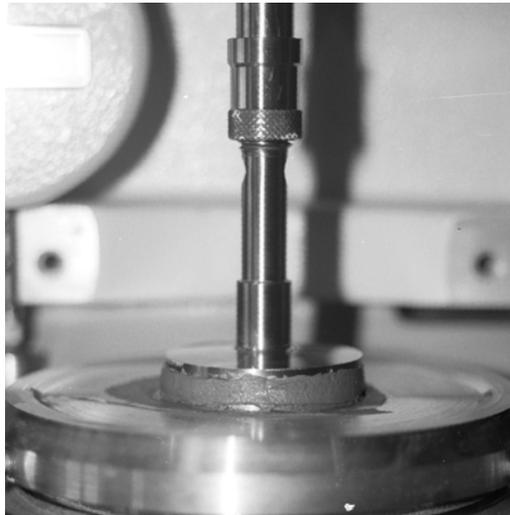


Figure 6-6: Début d'un essai réalisé sur un rhéomètre Haake Rheostress RS100, avec une configuration plan-plan faisant intervenir un plateau Haake PP35.

La mesure réalisée pour obtenir la courbe d'écoulement a été définie selon les valeurs données à la figure 6-7. Si le taux de cisaillement supérieur a été fixé à 70 s^{-1} , c'est avant tout pour une raison technique. En effet certains matériaux se retrouvaient éjectés de l'éprouvette si des taux de cisaillement supérieurs étaient appliqués. Au vu du nombre d'essais à entreprendre, j'ai décidé de me limiter à cette valeur pour tous les échantillons.

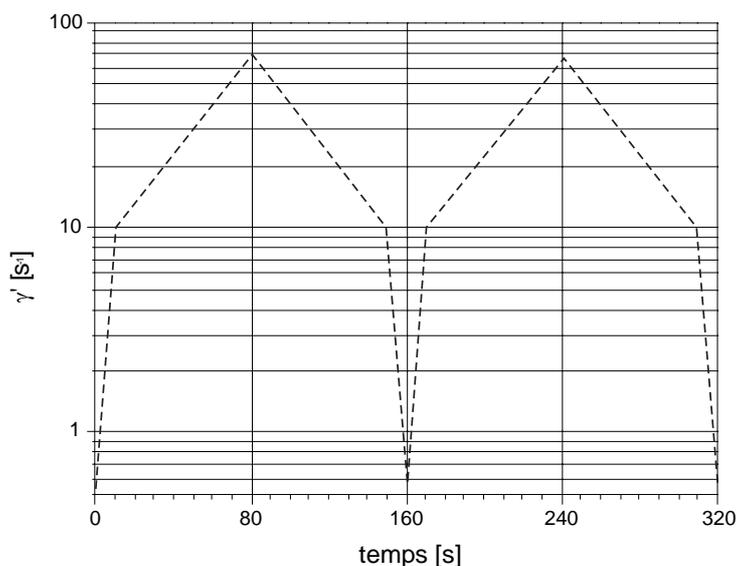


Figure 6-7: Définition de la mesure pour les courbes d'écoulement. Conduite en déformation au cours du temps.

6.4.1. Détermination des caractéristiques rhéologiques

A partir des valeurs du couple C en [N m] et des valeurs du taux de cisaillement en [s^{-1}] obtenues du rhéomètre, il est possible de calculer la contrainte de cisaillement d'un fluide non-newtonien τ en [Pa] par la formule (Månson et al. 1999) :

$$\tau(\dot{\gamma}) = \frac{3C}{2\pi R^3} + \frac{\dot{\gamma}}{2\pi R^3} \cdot \frac{\delta C}{\delta \dot{\gamma}} \quad (6.3)$$

où R est le rayon du plan mobile utilisé, soit ici 17,5 mm.

Une fois cette valeur obtenue, on peut dessiner les couples $\dot{\gamma} : \tau$ sur un graphique. Cette représentation permet de visualiser la courbe d'écoulement. Généralement l'axe $\dot{\gamma}$ est mis sous forme logarithmique. Pour chaque essai (c.-à.-d. différente teneur en eau) un rhéogramme est établi.

On ajuste alors par les points obtenus le modèle rhéologique retenu. Dans le cas des laves torrentielles viscoplastiques, le modèle de Herschel-Bulkley (cf. équation 6.2) est celui qui ajuste le mieux la courbe d'écoulement. Des essais ont été faits avec un modèle de Casson, autre modèle de fluide à seuil rhéofluidifiant, mais où seuls deux paramètres sont à caler. Ce modèle s'écrit (Casson 1959) :

$$\tau = \left(\sqrt{\tau_c^{cas}} + \sqrt{K^{cas} \dot{\gamma}} \right)^2 \quad (6.4)$$

où τ_c^{cas} représente respectivement le seuil de contrainte déterminé par extrapolation d'une loi de Casson et K^{cas} la consistance de Casson [Pa s]

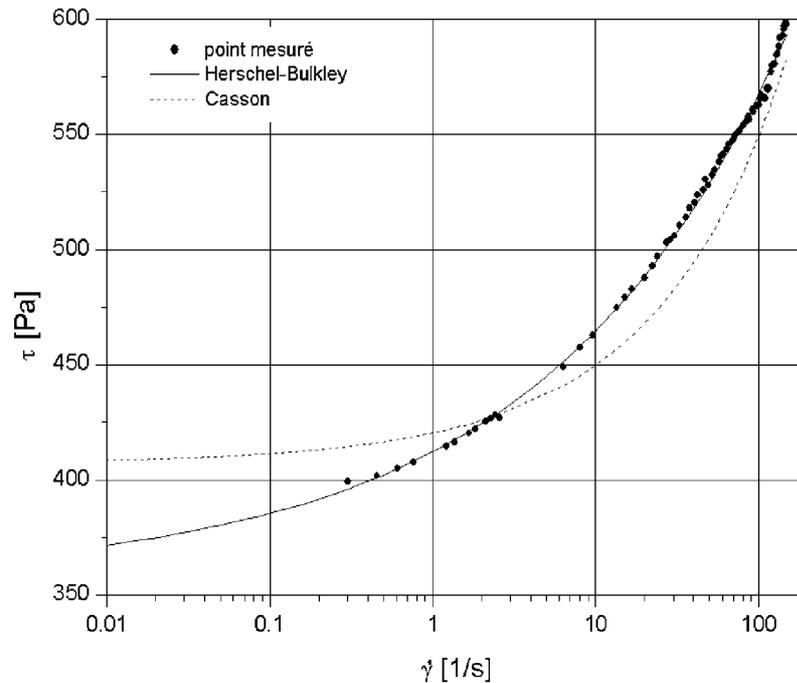


Figure 6-8: Comparaison de l'ajustement d'une courbe d'écoulement par un modèle de Herschel-Bulkley et un modèle de Casson pour un échantillon provenant du torrent de Vernette près d'Anzère (VS).

Comme le montre la figure 6-8, ce modèle n’ajuste pas correctement dans ce cas la courbe d’écoulement. Un décalage identique est observé pour d’autres échantillons. Ces essais montrent que le modèle de Herschel-Bulkley est celui qui permet le mieux de rendre compte du comportement viscoplastique. C’est ce modèle qui sera utilisé par la suite.

Pour des raisons techniques (procédure de mélange et limitation du rhéomètre), il n’est pas possible de tester les matériaux prélevés à une teneur en eau identique à celle observée dans la nature. Pour obtenir les paramètres du modèle rhéologique représentatifs des valeurs réelles, il faut répéter plusieurs fois l’essai à des concentrations solides différentes. La concentration solide est reliée à la teneur en eau par :

$$C_s = \frac{\rho_s}{\frac{\rho_w}{w} + \rho_s} \quad (6.5)$$

où C_s est la concentration solide, ρ_w la masse volumique de l’eau [kg/m^3], w le rapport pondéral entre la phase solide et la phase liquide [g/g] et ρ_s la masse volumique des grains [kg/m^3].

Les paramètres rhéologiques sont obtenus en plaçant successivement les valeurs du seuil de contrainte τ_c (respectivement de K et de n) sur un graphique $\tau_c : C_s$ (respectivement un graphique $K : C_s$ et un graphique $n : C_s$). La valeur recherchée est extrapolée jusqu’à la concentration solide correspondant à la limite de liquidité. Cette limite de consistance a été déterminée par l’essai normalisé dit d’Atterberg.

Pour assurer une bonne qualité de ces valeurs, un minimum de cinq déterminations à des concentrations solides différentes est nécessaire, ceci d’autant plus que l’essai demande une certaine habileté manuelle pour la mise en place. De plus la réussite de l’essai n’est pas assurée à coup sûr, des effets perturbateurs (glissement aux outils, rupture de l’éprouvette, etc.) pouvant apparaître en cours d’essai.

Tableau 6-2: Principaux résultats rhéologiques obtenus sur des échantillons viscoplastiques

	identification du comportement au rhéomètre	détermination de τ_c sur le terrain [Pa]	détermination de τ_c au laboratoire [Pa]
Marais	boueux	470	200
Batsoule 2	boueux	2500	370
Batsoule 1	boueux	2750	524
Rotbach 1	boueux		640
Rotbach 2		12200	
Anzère	boueux	5040	1250
Fully	boueux	6500	2200
Ruffibach	boueux	6350	3020
Fouly	boueux	4000	3831
Vésivi	boueux		C_s [46-51] et τ_c [30-60]
Merdenson de Vollège	boueux	3200	
St Antoine		3700	

6.4.2. Résultats

Le graphique de la figure 6-9 illustre le résultat acquis pour les dépôts d'une lave torrentielle survenue dans le torrent de Verneffe, près du village d'Anzère. Cette lave torrentielle déclenchée par des pluies continues (2 jours) faisait suite à un printemps très humide. Le tableau 6-2 donne une vue synthétique des résultats rhéométrique obtenus sur des matériaux provenant de laves torrentielles viscoplastiques.

L'analyse des diverses déterminations faites sur des matériaux de dépôts et des matériaux des zones de déclenchement probable montre une tendance commune à tous les échantillons, soit :

- lors de la première phase d'augmentation de cisaillement, le matériel se met en place (probablement remise en suspension des plus grosses particules après qu'elles ont sédimenté pendant la mise en place). La courbe d'écoulement de la figure 6-10 montre clairement cette instabilité.
- le seuil de contrainte est supérieur lors de la phase d'augmentation du taux de cisaillement que lors de la phase de diminution. Cette évolution temporelle est positive (hystérèse dans le sens des aiguilles de la montre) et non réversible (l'évolution se poursuit lors du deuxième cycle en repartant du seuil atteint lors de la première diminution du taux de cisaillement). Le phénomène physique du seuil de contrainte, même s'il est remis en question par certains (Barnes 1999), reste un point incontournable pour l'analyse de l'écoulement au niveau macroscopique. Il faudra donc toujours préciser si le seuil de contrainte est celui de déclenchement (déterminé à partir des courbes en phase montante) ou celui de déposition (déterminé à partir des courbes en phase descendante).

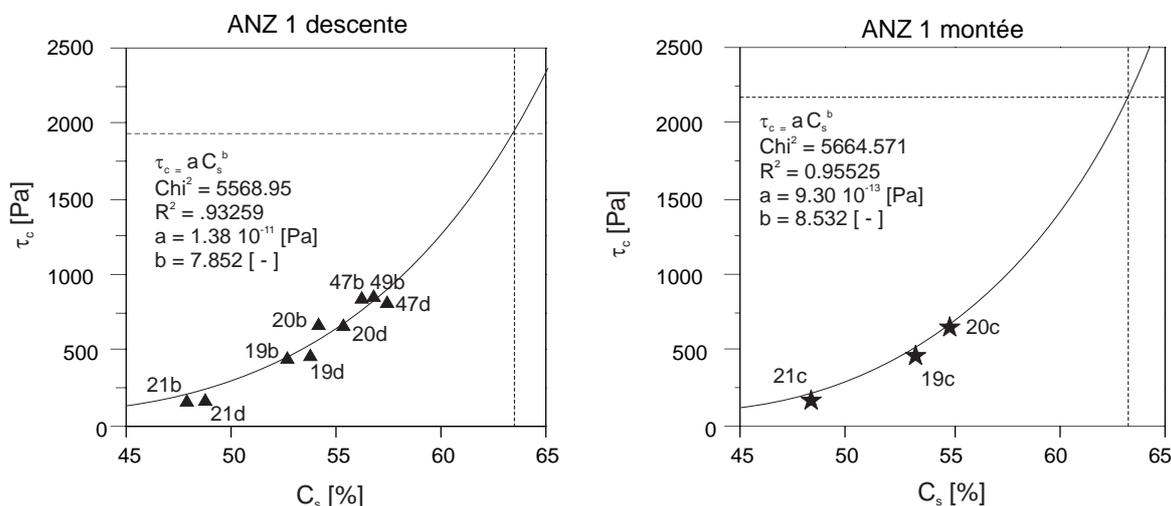


Figure 6-9: Détermination du seuil de contrainte pour la lave torrentielle du torrent de Verneffe. Les lignes pointillées verticales indiquent la valeur de la limite de liquidité. Les lignes pointillées horizontales renvoient aux seuils de contrainte correspondant. Les lettres accolées au numéro de l'essai correspondent à : *b* et *d* aux branches descendantes; *c* à la seconde branche montante de la mesure (cf.figure 6-7)

- le seuil de contrainte pour des suspensions où la concentration solide est proche de la concentration d'empilement maximum évolue selon une loi puissance (Ancey 2000). Cet aspect pose problème pour les suspensions naturelles. En effet il n'est parfois pas possible de couvrir une plage de C_s suffisante pour assurer une bonne extrapolation. Ceci est vrai surtout pour la détermination des paramètres rhéologiques lors de la phase d'augmentation des déplacements. Cela pose aussi des problèmes au niveau de la procédure de mélange (cf. annexe 9).

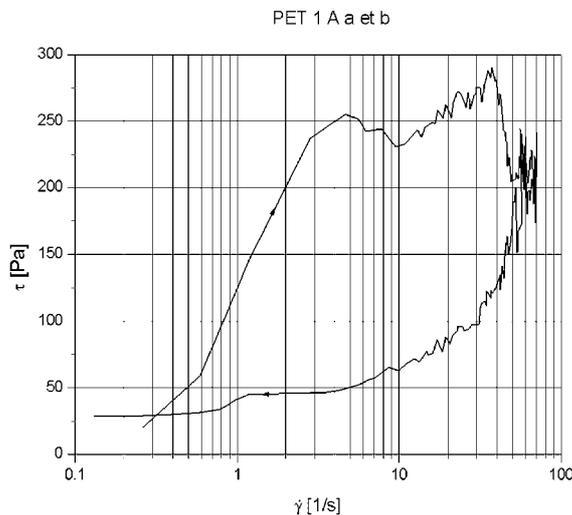


Figure 6-10: Mise en place du matériel lors de la première montée, ici illustrée sur des matériaux provenant du torrent du Péterey dans le val d'Anniviers. La phase de montée est représentée par la courbe supérieure.

- comme la première phase d'augmentation du taux de cisaillement n'est pas utilisable, cela réduit le nombre de données disponibles, d'autant plus que des effets perturbateurs interviennent durant l'essai, comme le creusement de l'éprouvette et l'évaporation (Coussot et Ancey 1999). Cela rend la poursuite de l'essai impossible au-delà d'un certain temps (ou nombre de phases). Une autre procédure d'essai doit donc être appliquée pour déterminer le seuil de contrainte de déclenchement. Une technique pourrait être celle de fluage-recouvrance. Cette méthode est moins destructive et permet d'atteindre le seuil de contrainte par "en dessous" (Nguyen et Boger 1992). Elle nécessite d'avoir un rhéomètre qu'on puisse conduire en contrainte. Cette méthode ne permet pas d'obtenir les autres paramètres de la courbe d'écoulement.

6.4.3. Effets perturbateurs

6.4.3.1. Glissement aux outils et fracturation de l'échantillon

La figure 6-11 montre l'action de divers effets perturbateurs survenus lors d'essais préliminaires de fluage/recouvrance sur un même matériau à la même concentration solide. Le diagramme de l'essai ILL 4 a montre une courbe fluage/recouvrance où il n'y a pas eu d'effet perturbateur (soit 5 cas sur 11 essais).

L'essai ILL 4 e montre une courbe où il y a eu glissement entre l'éprouvette et le plateau mobile. L'observation visuelle de l'éprouvette montre qu'une bonne partie du matériau est mise en mouvement vers la fin du palier, mais ne peut détecter le glissement qui est toujours présent. Même à la fin l'intensité de la contrainte de cisaillement est environ 5 fois inférieure à ce qu'elle devrait être (2 essais sur 11).

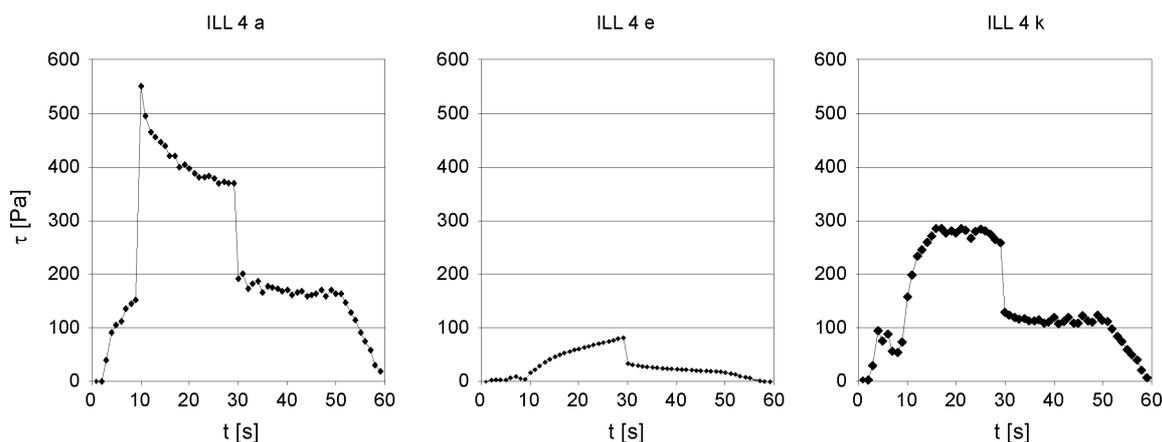


Figure 6-11: Exemples d'essais qui n'ont pas réussi suite à l'apparition de divers effets perturbateurs (matériel de l'Illgraben). ILL 4 a montre l'essai réussi, l'essai ILL 4 e montre un essai où il y a eu décollement aux outils, et l'essai ILL 4 k montre un essai où il y a eu fracturation de l'échantillon.

L'essai ILL 4 k montre une courbe où il y a fracture dans l'éprouvette lors de l'augmentation de la contrainte. On ne mesure alors plus que le frottement entre les deux parties de l'éprouvette (l'intensité est environ 2 fois moindre). La surface de glissement peut être localisée ou diffuse au vu des observations faites durant l'étude.

6.4.3.2. Evolution du matériau durant l'essai

L'observation des éprouvettes au comportement frictionnel-visqueux après le cisaillement montre qu'une couche d'argile surmontée d'un film d'eau apparaît. Ceci peut expliquer le très faible seuil de contrainte mesuré (seul le film d'eau est cisailé). Ce phénomène est-il dû à une ségrégation dynamique pendant l'essai, ou est-ce un phénomène plus complexe ? Pour essayer de comprendre cette particularité, une analyse granulométrique avant et après le cisaillement a été effectuée. A la figure 6-12 on peut voir qu'après le cisaillement, il y a moins de sables fins et un peu plus de silts et d'argiles. L'apparition d'une fine couche d'argile en haut de l'éprouvette a été observée sur chacun des échantillons frictionnels-visqueux. Il y a donc durant le cisaillement une destruction d'agrégats argilo-silteux suivie d'une migration des particules argileuses vers la surface de l'éprouvette (ou une sédimentation des particules plus grandes).

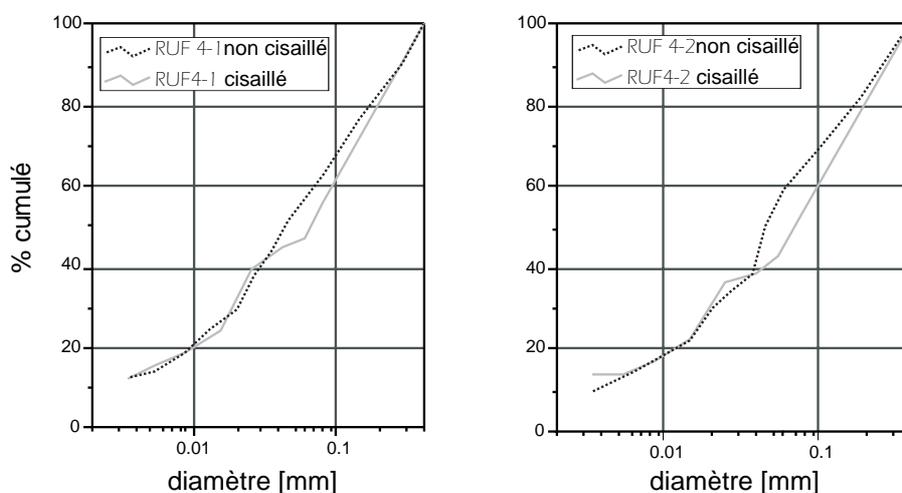


Figure 6-12: Granulométrie d'un matériau frictionnel-visqueux avant et après le cisaillement. Les deux échantillons proviennent du Rufibach.

Ce résultat pourrait expliquer l'évolution temporelle négative de ces échantillons. En effet, en analysant des coulis de béton, Mansoutre (2000) a obtenu des rhéogrammes avec une forte hystérèse, mais positive cette fois-ci. Suivant l'explication de Catalot-Martinent (1997), elle explique ce comportement par une apparition d'agrégats au cours de l'essai. La figure 6-13 permet de comparer les deux matériaux lors d'un essai.

Avec du matériel qui présente une hystérèse positive, il y a sédimentation lors de la mise en place (a). Ensuite lors du taux de cisaillement maximum, tout l'échantillon est homogène, mais des agrégats se forment (b). Pendant la phase de diminution du seuil de cisaillement, il y a à nouveau sédimentation, mais comme il y a eu formation d'agrégats, la couche de ressuage est moins chargée en gros éléments (ici sables fins), donc avec un seuil de contrainte moins élevé (c).

Dans le cas d'un matériel avec une hystérèse négative, on a aussi de la sédimentation lors de la mise en place (d). Puis au taux de cisaillement maximum, des agrégats sont détruits libérant des particules plus fines (silts et argiles) qui en réagissant avec le fluide interstitiel font encore augmenter l'effort de cisaillement alors que le taux de cisaillement a déjà commencé à diminuer (e). Pendant la phase finale de diminution du taux de cisaillement, il y a ségrégation normale des particules et une pellicule argileuse est alors visible en surface de l'éprouvette (f).

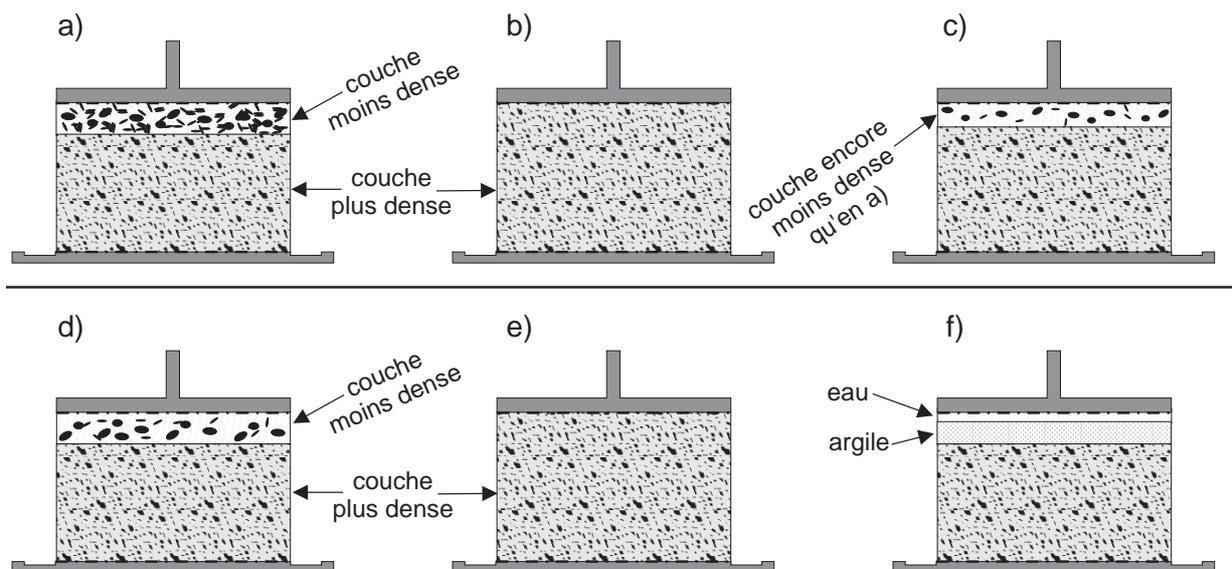


Figure 6-13: Evolution de l'éprouvette lors d'un essai au rhéomètre plan-plan. Le cas d'un matériel avec une hystérèse positive en haut (Catalot-Martinent 1997), et d'un matériel avec une hystérèse négative en bas (cette étude)

Ces résultats montrent que des progrès dans l'analyse rhéométrique sont nécessaires pour bien comprendre le comportement microstructural des pâtes minérales comme les laves torrentielles. Une étape supplémentaire pourrait être franchie en analysant le mouvement des particules pendant l'essai, par exemple en associant l'imagerie à résonance magnétique nucléaire et un rhéomètre (Coussot et al. 2002).

6.4.4. Discussion

Le résultat principal apporté ici est de pouvoir déterminer le type de comportement rhéologique d'une suspension formée à partir de matériaux provenant du bassin versant. Cette étape du diagnostic est très importante car elle permet de choisir quel modèle d'écoulement est représentatif pour telle source de matériel. Comme il a été dit plus haut, les modèles d'écoulement ne sont pas tous arrivés à un niveau opérationnel. Cependant, il paraît certain qu'à l'avenir, l'ingénieur disposera d'une palette de modèles lui permettant de calculer les effets d'un écoulement, quelque soit le comportement rhéologique incriminé.

Bien qu'assez délicats à réaliser, les essais de rhéométrie effectués sur des matériaux de laves torrentielles permettent d'estimer les paramètres rhéologiques du fluide matriciel (eau + fines). Ces paramètres sont plus ou moins représentatifs des valeurs probables de l'écoulement du corps. Ces essais montrent toutefois que des recherches supplémentaires devraient être entreprises pour améliorer et standardiser la procédure de mélange avant l'essai avec pour but de couvrir une plus grande gamme de concentrations solides (limitation de l'extrapolation).

Dans un deuxième temps il faut aussi pouvoir relier ces résultats aux dépôts observés dans le terrain qui sont eux le résultat d'un mélange entre le corps et des morceaux du front. C'est ce passage entre la rhéologie du fluide matriciel et celle de la lave torrentielle qui font l'objet de la section suivante.

6.5. Comparaison des mesures de terrain avec celles du laboratoire

La théorie développée dans le domaine des laves torrentielles au comportement boueux (et uniquement pour ce type de comportement) permet d'estimer les paramètres rhéologiques sur le terrain d'après la forme des dépôts. La méthode définie par Coussot (1996) et précisée par Ancey (1999) consiste à déterminer la valeur du seuil de contrainte en fonction de la forme du bourrelet. Cette méthode ne permet pas de déterminer les autres paramètres de la loi d'écoulement.

6.5.1. Rappel théorique

Pour obtenir le seuil de contrainte, il faut pouvoir placer une référence horizontale dans le terrain afin d'obtenir une mesure précise de la décroissance de l'épaisseur du dépôt. La procédure détaillée est donnée à l'annexe 9. On ajuste alors à travers ce profil une courbe de type (Liu et Mei 1989) :

$$\frac{\rho g x (\sin \theta)^2}{\tau_c \cdot \cos \theta} = -\frac{\rho g h \cdot \sin \theta}{\tau_c} - \ln \left(1 - \frac{\rho g x \cdot \sin \theta}{\tau_c} \right) \quad \text{pour un lobe frontal} \quad (6.6)$$

$$\frac{\rho g h \cdot \sin \theta}{\tau_c} = \sqrt{2 \cdot \frac{\rho g x \cdot (\sin \theta)^2}{\tau_c} - \left(\frac{\rho g x \cdot (\sin \theta)^2}{\tau_c \cos \theta} \right)^2} \quad \text{pour un bourrelet latéral} \quad (6.7)$$

Connaissant la masse volumique ρ du mélange (par estimation), l'accélération g et les données géométriques x et θ , on en déduit le seuil de contrainte τ_c . La mesure du profil du bourrelet demande une bonne vision dans l'espace et un lissage de la courbe est déjà faite lors de la mesure. D'autre part, il est souvent difficile de mesurer la pente dans le terrain.

Lorsqu'une mesure directe n'est pas possible, il faut faire l'hypothèse que la pente de la trace d'écoulement (ou de la surface plane du lobe) équivaut à la pente du lit (ou zone d'arrêt).



Figure 6-14: Mesure d'un bourrelet latéral sur le torrent de Batsoule. La mesure est prise à partir d'une référence horizontale.

6.5.2. Résultats

Pour commencer, une analyse de sensibilité a été faite pour connaître la variabilité de la valeur obtenue pour une même lave torrentielle. Le tableau 6-3 donne un aperçu de cette variabilité. On voit que les mesures faites sur les bourrelets latéraux sont en moyenne inférieures de 23 % par rapport aux mesures faites sur les lobes frontaux. A nouveau il peut s'agir d'une différence de comportement entre le front plus granulaire et les bourrelets plus viscoplastiques. La comparaison est encore moins favorable entre les mesures de bourrelets et celles faites sur des lobes non perpendiculaires au mouvement (dans le tableau 6-3, α indique l'angle en degré par rapport à l'axe de l'écoulement). Là il s'agit probablement d'un artefact mathématique qui provoque une surestimation systématique du seuil de contrainte.

Au vu de ces données, la recommandation de n'utiliser que la détermination de bourrelets latéraux, même si ceux-ci montrent une variation plus importante que les mesures frontales, peut être faite. Cette variabilité est due surtout à la non-uniformité de la surface sur laquelle le dépôt survient.

Six déterminations conjointes du seuil de contrainte ont ensuite été faites au cours de ce travail. Sur chaque bourrelet dont le profil a été déterminé, de la matière a été prélevée et analysée au rhéomètre. A la figure 6-15 on peut voir que les valeurs de τ_c au laboratoire peuvent être obtenues en divisant la valeur de τ_c sur le terrain par 2,49. Cette augmentation du seuil de contrainte sur les bourrelets peut s'expliquer par l'incorporation dans les bourrelets latéraux de grains grossiers provenant du front (Coussot 2000). Des essais sur des matériaux idéaux (billes de verre) montrent que l'incorporation progressive de matériaux grossiers dans une suspension a d'abord tendance à diminuer le seuil de contrainte avant de l'augmenter à nouveau avec une allure similaire à celle de la suspension sans grain gros-

sier (i.e. selon une loi puissance). Le résultat obtenu à la figure 6-15 ne doit donc pas être extrapolé en dehors des limites présentées ici.

Tableau 6-3: Différentes valeurs du seuil de contrainte de déposition déterminées sur un même dépôt de lave torrentielle dans le torrent de Batsoule (Val Ferret)

n° essai	τ_c [Pa]
bourrelet n°1	3040
bourrelet n°2	2152
bourrelet n°3	2760
bourrelet n°4	2058
lobe frontal n°1	3212
lobe frontal n°2	3212
lobe frontal n°3	3280
lobe α 30°	~3600
lobe α 43°	~3600
lobe α 57°	~3700
moyenne ecart-type	3061 ± 19 %

Ce résultat a une grande importance, car il permet de différencier la rhéologie du corps de la lave torrentielle de celle du front. Il faudra à la fin du diagnostic préciser toujours quelle est la méthode de détermination des paramètres qui a été utilisée.

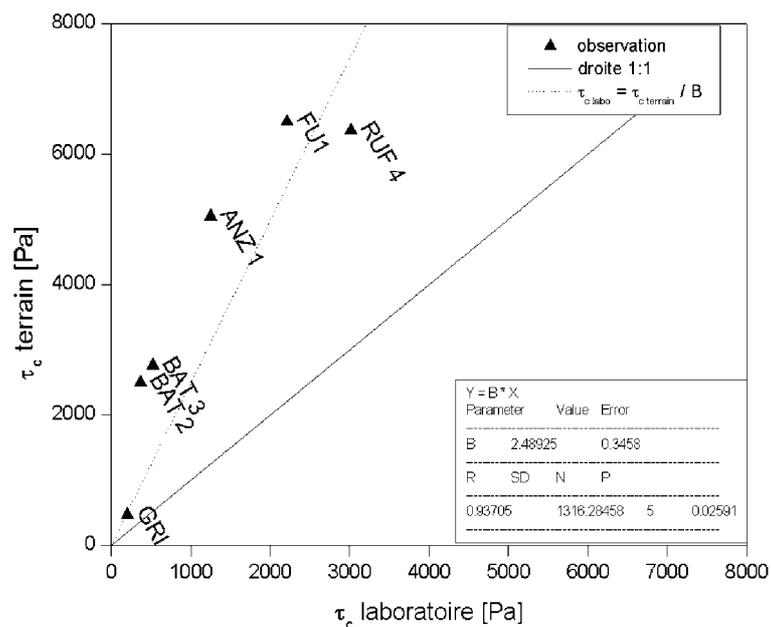


Figure 6-15: Comparaison entre les valeurs des seuils de contraintes déterminées au laboratoire et sur des bourrelets latéraux.

6.5.3. Discussion

Les résultats montrent qu'il n'y a pas concordance complète entre le terrain et le laboratoire. Cependant une relation linéaire permet de relier les valeurs obtenues sur le terrain et celles obtenues au laboratoire. Toutefois la valeur de cette correction est supérieure à celle prévue lors des essais de détermination de la valeur de τ_c au laboratoire. Qu'est ce qui peut expliquer cette différence ?

Cette différence, qui montre des τ_c déterminés au laboratoire deux fois et demi moins intenses que ceux déterminés sur le terrain, est probablement en relation avec le matériel testé. En effet il y a une grande différence entre les éprouvettes testées au rhéomètre écrêtées à 400 μm , et les dépôts comportant des cailloux voire des blocs. Cette différence peut se traduire par la nature des contacts entre les grains et des effets d'échelle.

Il y a, d'autre part, un effet d'échelle mal maîtrisé. En effet, lors de la préparation des échantillons pour les tests au laboratoire, ceux-ci s'enrichissent relativement en argile. L'effet d'échelle a été supposé nul par Coussot (1993) en remarquant que le matériau avait la même apparence suivant les échelles (image a et image b de la figure 6-16). En fait, par le tamisage, on élimine les gros grains ce qui a pour conséquence d'augmenter la concentration des grains les plus petits, en l'occurrence les argiles. Comme les particules d'argile ont un effet électro-chimique sur la suspension et les grains un effet mécanique seulement, il est probable que la suspension testée au rhéomètre n'ait pas les mêmes propriétés que la suspension représentative de la lave torrentielle. Une caractérisation complète des matériaux est donc nécessaire pour mieux comprendre les propriétés de la suspension naturelle.

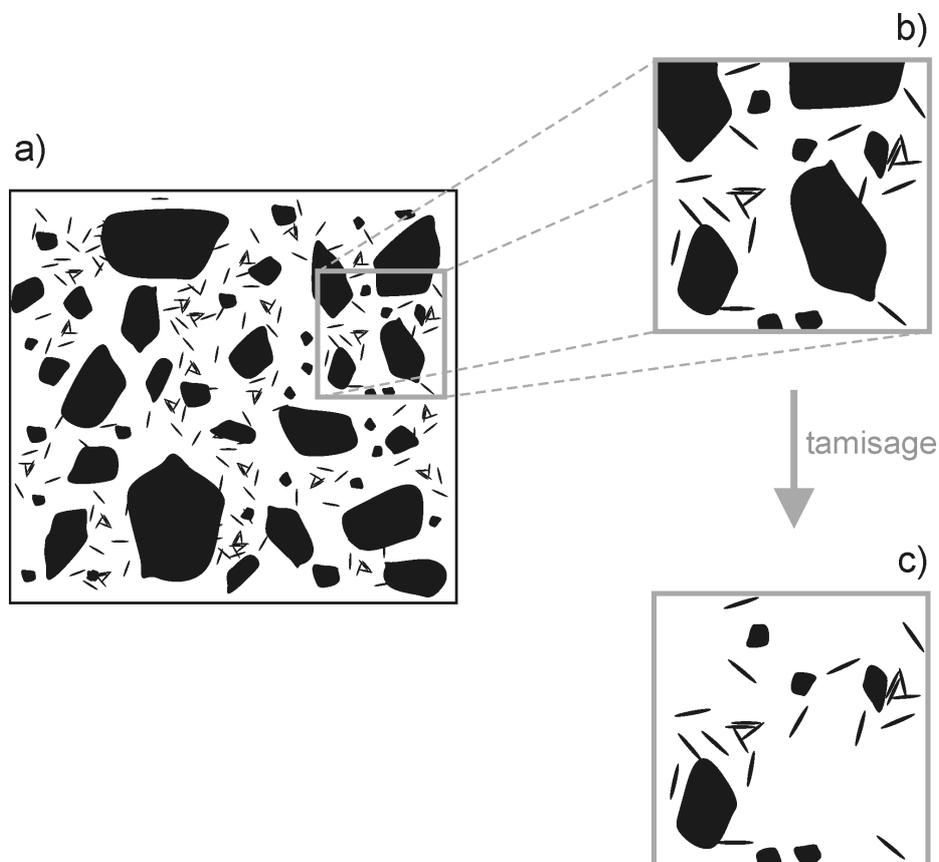


Figure 6-16: Effet d'échelle lors de la préparation des échantillons pour le passage au rhéomètre

6.6. Caractérisation minéralogique et granulométrique

Peu d'études géotechniques ont été faites sur les matériaux de base des laves torrentielles, tels que les moraines ou les éboulis. L'évolution temporelle constatée sur les matériaux formant les laves torrentielles ajoute une difficulté supplémentaire (par exemple pour la détermination des états de consistance, cf. annexe 9).

6.6.1. Minéralogie

Comme on a pu le voir au chapitre 4, la lithologie seule ne permet pas une bonne distinction entre les zones où les laves torrentielles sont fréquentes et celles où elles le sont moins. L'accent a donc été mis sur la composante minéralogique la plus fine, les argiles. Bien qu'en faible, voire très faible proportion en poids (cf. 6.6.1), les argiles ont une importance fondamentale sur le comportement rhéologique (par l'influence de leurs propriétés électro-chimiques qui va croissant lorsque l'on passe des argiles 1:1 aux argiles 2:1).

6.6.1.1. Types d'argile

Le tableau 6-4 montre quels types d'argiles (phyllosilicates) sont présents dans un échantillon de bassins versants valaisans (tous les diffractogrammes se trouvent à l'annexe 10). Le principal résultat qui en ressort est que l'argile majoritaire est de l'illite. Ceci est très important car la plupart des essais rhéométriques présentés dans la littérature sont faits avec de la kaolinite.

Tableau 6-4: Représentation semi-quantitative du type d'argile parmi quelques bassins versants. La convention suivante a été adoptée : ++ quantité importante, + quantité moyenne, - quantité faible, ? présence possible.

Echantillons	Géologie	Phyllosilicates				
		Kaolinite	Illite	Chlorite	Smectite	Interstratifié Illite- Smectite
FOU 2	schistes, calcschistes, flysch		++	+	+	++
BAT 3	schistes, calcschistes, flysch		++	++		+
CHA 1	gneiss		+	++		-
FU 1	granites		++	-		+
VE n 5	gneiss	-	-	-	?	+
ANZ 1	calcaires schisteux		++	++	+	++
ILL 4	quartzite, calcaires, cornieules		++	-		-
ALT 2	granito-gneiss		-	-	-	+
RUF 3	gneiss, micaschistes		+	++		

Comme le montre le tableau 6-5, la kaolinite a une surface spécifique 4 à 30 fois plus faible que l'illite et une **capacité d'échange cationique** (CEC) 2 à 40 fois plus faible. La présence dans plusieurs torrents d'argiles interstratifiées de type illite/smectite est aussi à relever. Ces argiles ont une influence électro-chimique encore plus significative.

Tableau 6-5: Caractéristiques physico-chimiques de quelques argiles (McBride 1994)

Type d'argile	Surface spécifique [m ² /g]	CEC [cmol/kg]
Kaolinite	5-20	1-15
Illite	80-150	10-40
Smectite	700-800	70-120

6.6.1.2. Effet sur la rhéologie

L'exemple de la figure 6-18 montre l'effet de telles argiles (cf. figure 6-17) sur le seuil de contrainte de trois dépôts au comportement viscoplastique. Les échantillons, comportant l'interstratifié illite-smectite, montrent une augmentation plus douce du seuil de contrainte lorsque la concentration solide se rapproche de la concentration d'empilement maximale. Inversement pour des concentrations solides plus faibles, les échantillons comportant des interstratifiés présentent des seuils de contraintes plus élevés. Ceci est dû à la cohésion.

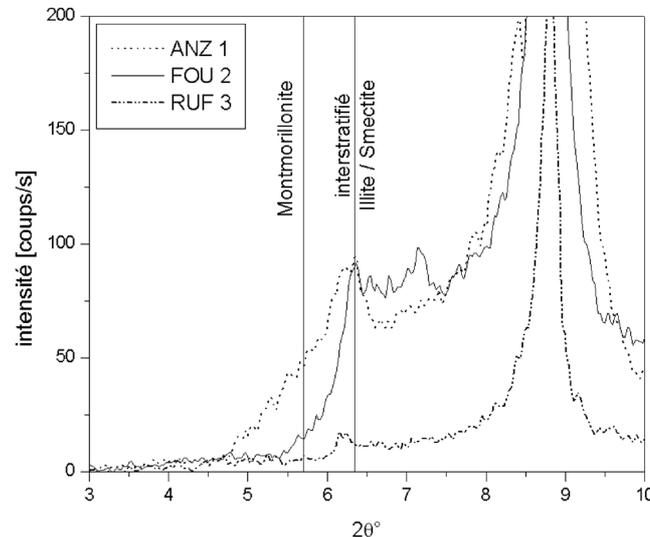


Figure 6-17: Diffractogramme X pour trois échantillons, deux contenant des interstratifiés illite / smectite (ANZ 1, FOU 2) et un n'en contenant pas (RUF 3).

Ces effets ont pu être observés lors de la mise en place, très difficile, de ces matériaux dans le rhéomètre. La cohésion était telle que l'éprouvette devait être arasée au plus proche de l'entrefer, car sinon elle opposait une résistance à l'étalement supérieure aux limites acceptables de l'appareil.

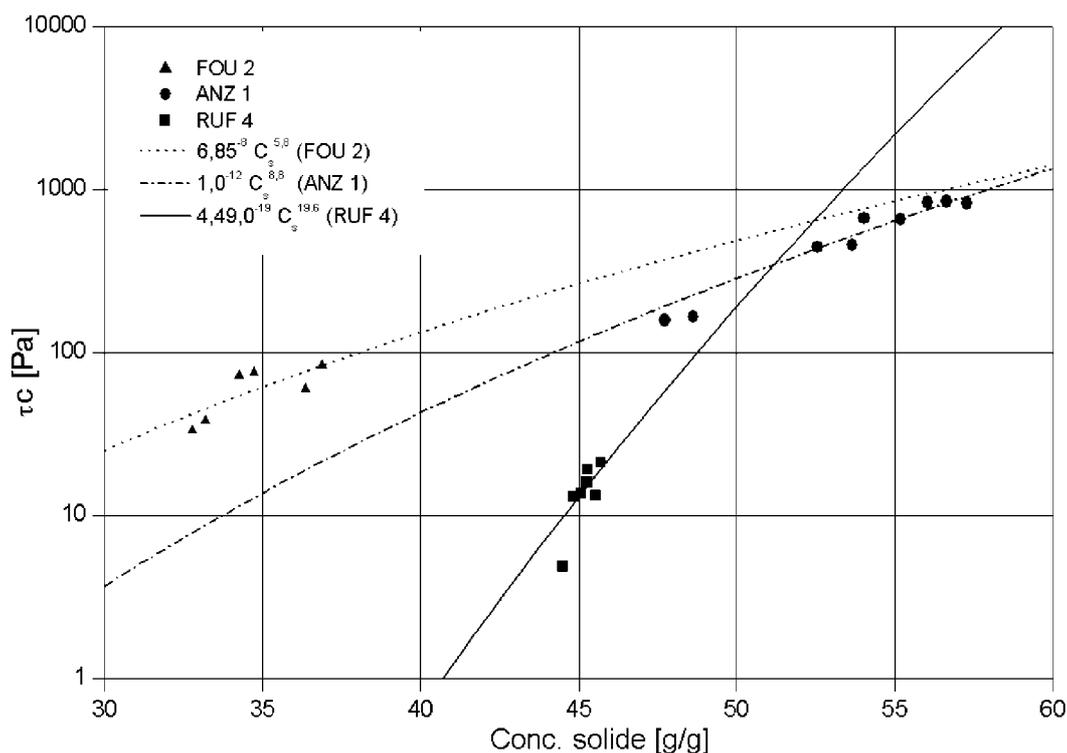


Figure 6-18: Effet des argiles interstratifiées illite-smectite sur le seuil de contrainte en fonction de la concentration solide pour les matériaux dont le diffractogramme X est présenté à la figure 6-17.

Si des recherches sur la sensibilité rhéologique du mélange à certains paramètres (pH, type de cations en suspension) devaient être entreprises, il serait nécessaire de tenir compte de la différence de réactivité entre les types d'argile. De nouveaux problèmes seront alors à résoudre, entre autres la maîtrise de la concentration en électrolyte de l'eau utilisée lors de l'essai. Ceci est dû à la réactivité plus grande des argiles 2:1, comme l'illite ou la smectite. Une suspension aqueuse d'illite passant d'une concentration de 2,5 % à 5 % voit son seuil de contrainte multiplié par trois environ (Williams et Williams 1989, cit. in Barnes 1999).

Un rapide survol de la littérature montre que l'implication de ces résultats n'est pas encore bien intégrée aux études sur la stabilité des sols (Vulliet 1986, Moore 1991, Anson 1998). Les effets de la solution interstitielle sur la dynamique des argiles (floculation - dispersion, passage qui se fait par un effet seuil) peuvent être très importants. Ces effets, évidents sur la rhéologie, peuvent probablement expliquer aussi une partie du déclenchement des laves torrentielles. L'essai présenté au sous-paragraphe 6.6.1.3. permet une mise en évidence qualitative des propriétés des matériaux du fluide matriciel vis à vis des argiles.

6.6.1.3. Mise en évidence expérimentale

La réaction des sédiments vis à vis de l'eau en fonction de la présence d'argile et de leur réactivité peut déjà être mise en évidence avec une expérience simple. Sur la figure 6-19 la fraction < 400 μm (fraction testée au rhéomètre) a été photographiée à l'état sec et après humidification pour un échantillon viscoplastique (NES 1) et pour un échantillon de charriage (SBA 4). On peut voir que la réaction des argiles y est très différente. Dans l'échantillon NES 1, les argiles sont présentes à l'état sec sous forme de croûte brune (partie inférieure de l'échantillon). Après adjonction d'eau les argiles se trouvent à l'état dispersé dans tout l'échantillon, qui de ce fait prend la même couleur. Au contraire dans l'échan-

tillon SBA 4, provenant des Préalpes calcaires, il y a très peu d'argile et s'il y en a, elles se trouvent sous forme floculée. Dans ce cas, après adjonction d'eau, l'eau ressort des particules quasiment pures.

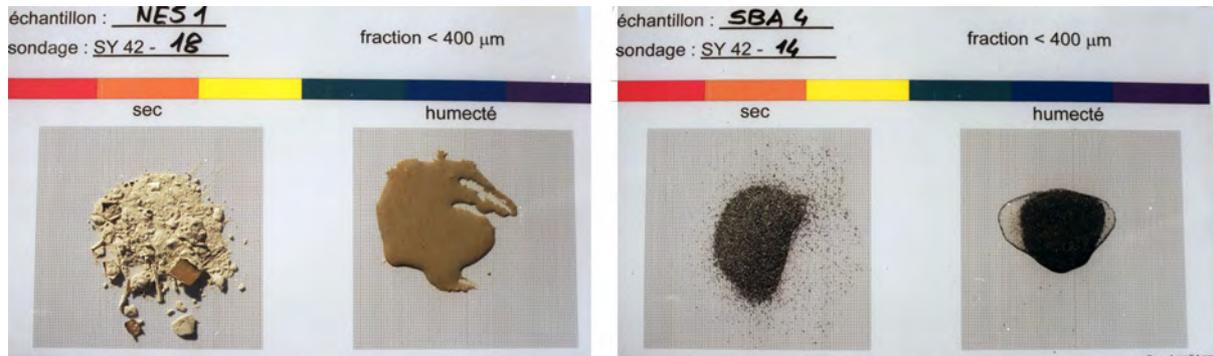


Figure 6-19: Effet de la présence et de la forme des argiles sur les échantillons écrêtés à 400 µm

Ce test simple permet déjà d'estimer le comportement probable de la pâte. En fonction des observations suivantes, on peut dire :

- comportement viscoplastique → une croûte d'argiles est présente; après adjonction d'eau, elles se retrouvent dispersées dans l'échantillon et lui donnent sa couleur.
- comportement frictionnel-visqueux → même comportement que les pâtes viscoplastiques.
- comportement frictionnel-collisionnel → l'argile est en petite quantité dans l'échantillon sec; lors du mélange avec l'eau, celle-ci peut apparaître en excès mais teintée par l'argile.
- charriage → l'argile n'est pas visible dans les sédiments et après adjonction d'eau, cette dernière ressort quasiment pure de l'échantillon.

6.6.2. Granulométrie

Sur tous les échantillons prélevés (70 au total), la distribution de la taille des particules a été déterminée (cf. annexe 11). Comme Major et Pierson (1992) le soulignent, la distribution de taille des particules a un effet sensible sur la rhéologie des pâtes du type de celles qui composent les laves torrentielles. Ils montrent par exemple que plus la fraction sableuse est grande par rapport à la fraction silts + argile, plus le seuil de contrainte s'accroît rapidement.

6.6.2.1. Détermination du type rhéologique en fonction de la granulométrie

En fonction de ces observations, j'ai classé les courbes granulométriques des échantillons testés au rhéomètre d'après leur comportement rhéologique. La figure 6-20 montre ce résultat. Même s'il y a recouvrement des fuseaux, ils présentent tous une allure générale bien particulière. Il est clair que vu la variabilité naturelle, les limites entre les fuseaux pourront légèrement changer si on augmente la base de données. Ces fuseaux pourront aussi légèrement changer d'un massif à l'autre.

L'utilisation de fuseaux permet une meilleure discrimination entre les comportements rhéologiques qu'un seuil limite. Ce résultat complète la discrimination entre le comporte-

ment viscoplastique et collisionnel-frictionnel trouvée par Bonnet-Staub (1998). Il affine en même temps ce résultat en prenant en compte les autres types de comportement.

Il est donc possible d'estimer le type de comportement en fonction des composantes granulométriques.

L'écrêtage à 20 mm du matériel ne porte pas préjudice au résultat, car la rhéologie de la lave torrentielle est dictée par le fluide matriciel qui lubrifie les plus gros grains entre eux (Ancy 2001). De plus des essais visant à évaluer la variabilité spatiale et temporelle des dépôts de laves torrentielles montrent que les variations sont relativement faibles (dus au mélange vigoureux pendant l'écoulement).

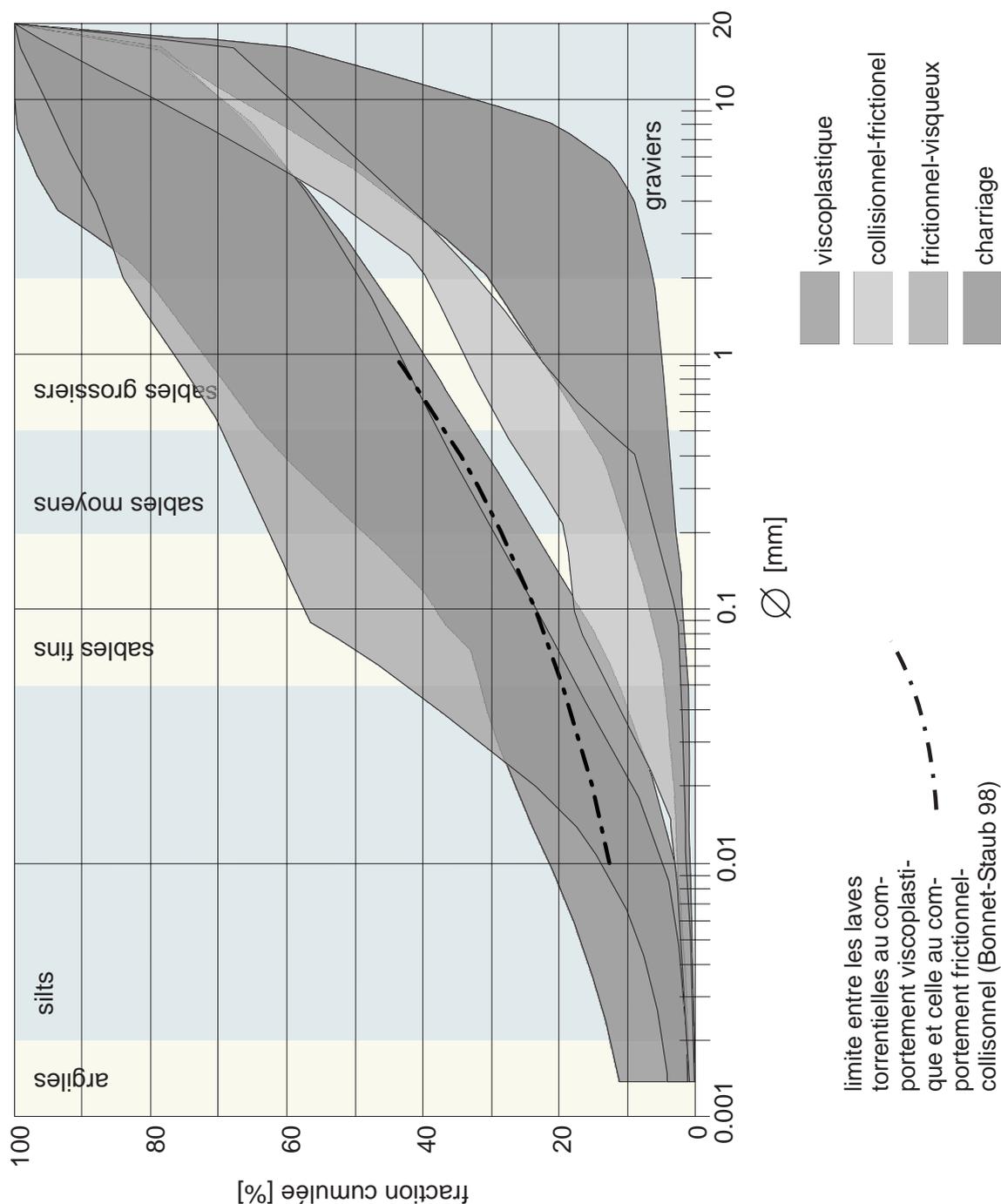


Figure 6-20: Fuseaux granulométriques en fonction des types de comportement rhéologique.

L'utilisation de tels fuseaux est donnée à la figure 6-21. Deux courbes granulométriques provenant de dépôts observés et identifiés d'un point de vue rhéologique ont été placées sur les fuseaux. On peut voir que même si les courbes ne sont pas entièrement contenues dans un seul fuseau, leur allure générale permet de choisir le bon comportement rhéologique.

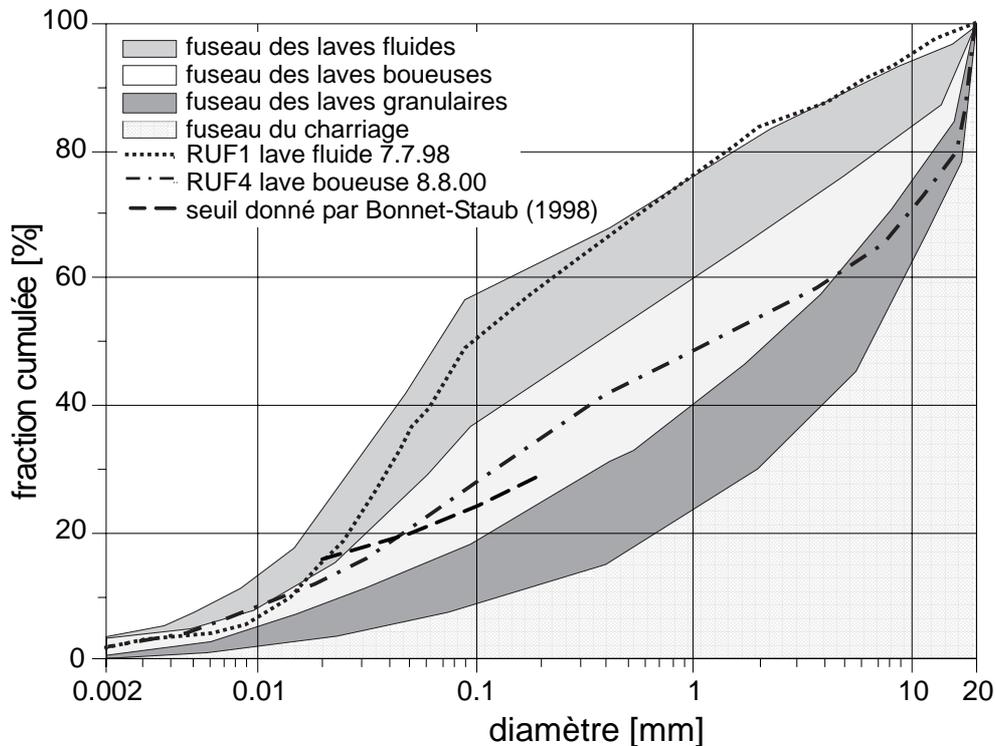


Figure 6-21: Exemple d'utilisation de fuseaux granulométrique pour estimer le comportement rhéologique.

6.6.3. Discussion

Les résultats obtenus lors de la comparaison de la minéralogie des matériaux naturels et de leur rhéologie constituent une approche préliminaire. Ils montrent qu'il y a une influence du type d'argile sur la réponse rhéologique, que cette réponse semble liée à une différence de réactivité électro-chimique entre les argiles et que dans l'environnement alpin la kaolinite est un phyllosilicate minoritaire. L'effet du type d'argile sur le comportement, illustré à la figure 6-18, est aussi visible lors d'observations de laboratoire (facilité à mettre en place, "coulabilité" entre les récipients, etc.).

Ce résultat, bien que préliminaire, a plusieurs conséquences. La réactivité des argiles est dépendante de la composition des électrolytes contenus dans le fluide interstitiel. Le comportement d'une suspension sera donc différent sur le terrain (eau chargée en ions) et au laboratoire (eau déminéralisée). Il est donc à prévoir de prélever de l'eau dans le bassin versant et de conduire pour chaque échantillon deux séries d'essais rhéométriques, l'un avec l'eau du terrain et l'autre avec de l'eau déminéralisée. Il est à noter que des études détaillées avec des argiles de référence devraient être faites avec d'autres argiles que la kaolinite puisque celle-ci est rarement présente et d'une réactivité plus faible.

La comparaison entre la granulométrie écrêtée à 20 mm et le comportement rhéologique a permis la mise au point d'un outil simple, utile pour le diagnostic. Les fuseaux déterminés pour chacun des comportements (plus celui pour les phénomènes de charriage)

montrent que pour une granulométrie étendue, on observe un comportement viscoplastique, que pour une granulométrie plus resserrée avec une forte teneur en sable, on a un comportement frictionnel-collisionnel et que pour une granulométrie étendue avec un pic dans les silts et les sables fins, on a un comportement frictionnel-visqueux.

L'analyse comparative de ces fuseaux renforce l'hypothèse que le comportement est gouverné par la partie fine ($< 400 \mu\text{m}$). Lorsqu'il y a suffisamment d'argile, une pâte lubrifiante (mais aussi collante) se forme et une lave torrentielle viscoplastique se forme. S'il n'y a pas assez d'argile, les contacts intergranulaires sont seulement facilités par la présence de grains encore plus petits, fonctionnant comme un roulement à billes (n'offrant donc pas de cohésion).

Le résultat de cette différenciation des comportements rhéologiques (cf. figure 6-21) peut être directement utilisées pour le diagnostic. Comme l'information de base, une courbe granulométrique est bien meilleur marché qu'une analyse rhéologique, et il est possible de prendre une quantité plus importante d'échantillons. Dans le cas d'une étude en prédétermination, il est donc possible de prélever des échantillons sur plusieurs sites de déclenchement potentiel, ainsi que sur les zones d'alimentation intermédiaire pour en déduire le type de comportement probable des laves torrentielles sur ce bassin versant.

6.7. Conclusion

Les observations de terrain montrent que la classification choisie permet une bonne concordance avec la théorie. Ce sont les paramètres nécessaires aux modèles résultants qui doivent être investigués. S'il n'est pour l'instant pas toujours possible de quantifier tous les paramètres nécessaires aux modèles d'écoulement, la vérification de la loi de comportement (sur laquelle le modèle se base) reste une priorité.

Dans ce travail un effort particulier a été porté sur le comportement viscoplastique, car ce sont les modèles qui se basent sur cette loi de comportement qui sont les plus avancés (Coussot 1996, O'Brien et al. 1993). L'analyse rhéologique permet d'estimer sur le terrain l'un des paramètres nécessaires, le seuil de contrainte. Au laboratoire il est possible d'estimer tous les paramètres de la loi de comportement, mais sur une fraction seulement du matériel. La comparaison de cinq seuils de contrainte déterminés à la fois sur le terrain et au laboratoire montre qu'une relation existe (cf. § 6.4.2).

Toujours dans l'optique de relier les lois de comportement à des paramètres mesurables dans le bassin versant, deux caractéristiques des matériaux ont été analysées. La minéralogie de la fraction fine montre l'importance du type d'argile sur le comportement rhéologique, sans qu'à ce stade une quantification de ces effets ne soit possible (cf. § 6.6.1). L'analyse granulométrique permet d'estimer auquel des trois types de comportement un dépôt de sédiments appartient (cf. § 6.6.2).

La relation établie entre la détermination du seuil de contrainte (comportement viscoplastique) sur le terrain et au laboratoire est d'un point de vue microstructural plus compliquée que ce que l'approche macroscopique semble montrer. Une étude faite sur des matériaux idéaux montre que l'effet de l'ajout de grains grossiers suit une loi puissance dès qu'une certaine quantité de matériaux grossiers est atteinte. La relation linéaire obtenue ici sur des matériaux naturels n'est donc valable que sur la plage testée. Ce résultat devrait être confirmé par des travaux complémentaires.

Les essais de déterminations des couples contrainte de cisaillement/taux de cisaillement pour tous les types de matériaux (dépôts de laves torrentielles des trois comportements répertoriés) ont permis aussi de mettre en évidence plusieurs effets perturbateurs. Ces effets sont soit dus à des défauts de l'éprouvette lors de la mesure (fracturation, glissement aux outils, cf. § 6.4.3.1) soit à une évolution du matériel durant l'essai (sédimentation, évaporation, destruction d'agrégats, cf. § 6.4.3.2).

Chapitre 7

Le diagnostic d'un bassin versant

7.1. Introduction

Ce chapitre donne le cadre méthodologique pour réaliser le diagnostic d'un bassin versant à laves torrentielles. Il représente une synthèse des résultats exposés dans le reste de ce travail. La méthodologie proposée se base sur une succession d'étapes obligeant le praticien à formuler un avis, à le confronter au terrain, puis à donner une caractérisation finale du bassin versant concerné.

Le style d'écriture passe du domaine scientifique au domaine technique. Les affirmations qui y sont données s'appuient sur des renvois aux chapitres précédents. Si les actions concrètes (essais de laboratoire, types d'échantillon) qui y sont proposées dépendent du choix fait sur les modèles d'écoulement (cf. figure 6-1), la méthode décrite restera, elle, identique pour un choix de modèles différents. L'écriture de ce chapitre replace l'étude dans le contexte de l'analyse des dangers requise en Suisse.

Le diagnostic présenté ici ne concerne que les laves torrentielles et ne représente qu'une partie de la gestion d'ensemble des dangers naturels (cf. flèche dans la figure 7-1). Le praticien doit de ce fait connaître les recommandations officielles qui la régissent (Loat et Petraschek 1997, SIA-104 1999, PLANAT 2000). Il ne sera pas non plus expliqué comment sont réalisées les différentes analyses, hydrologique, géologique, hydrogéologique, géomorphologique, qui peuvent être nécessaires à l'établissement du diagnostic.

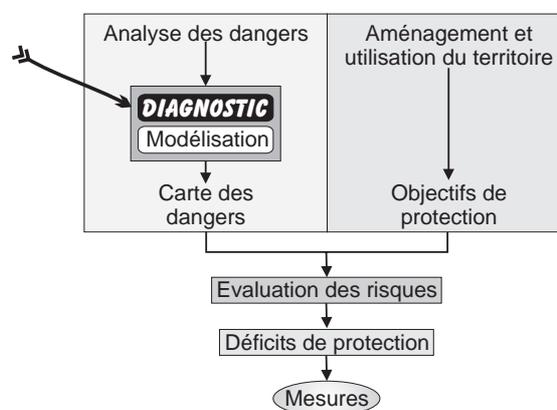


Figure 7-1: Place du diagnostic dans la gestion des risques naturels

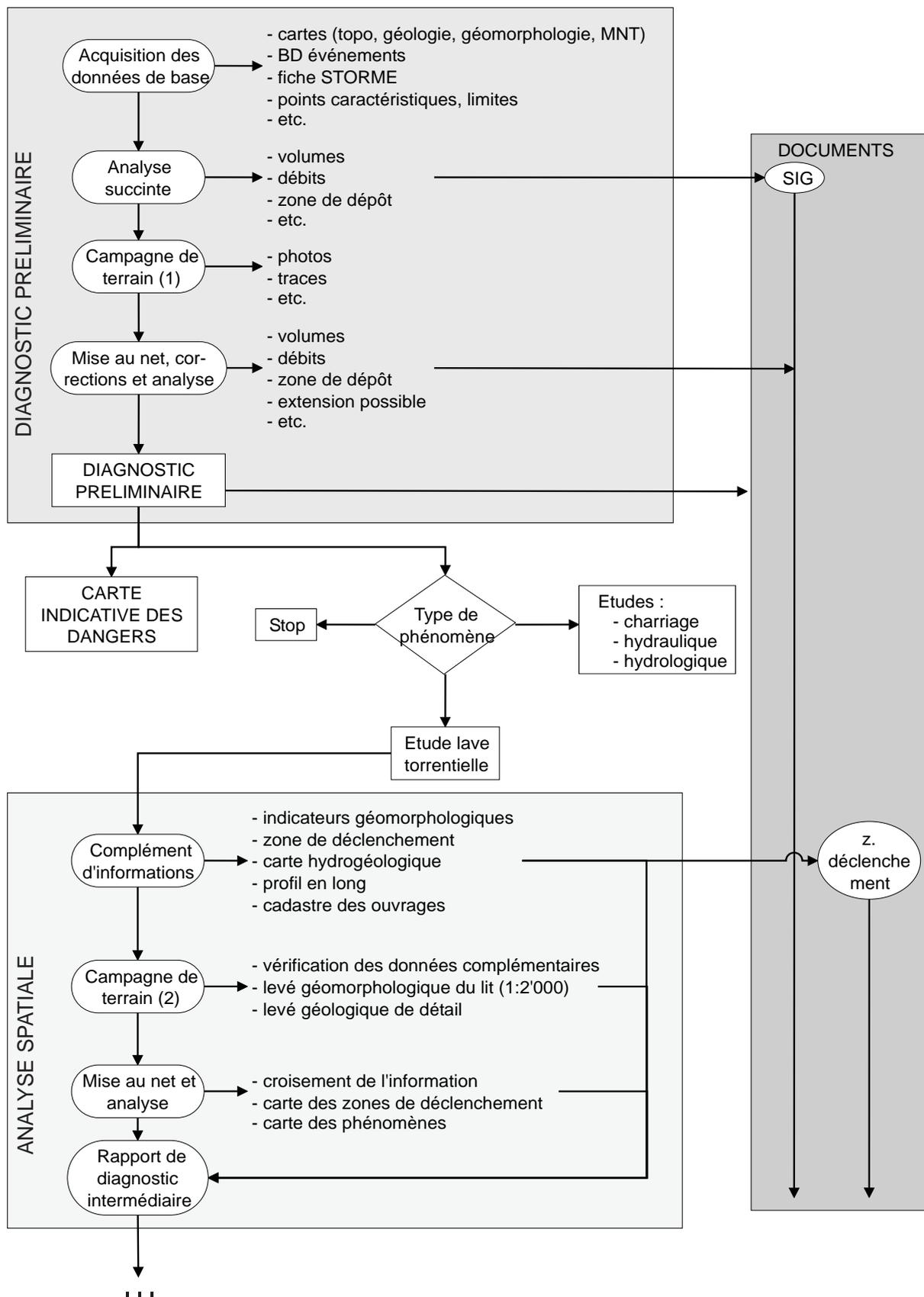


Figure 7-2: Les diverses étapes du diagnostic du danger

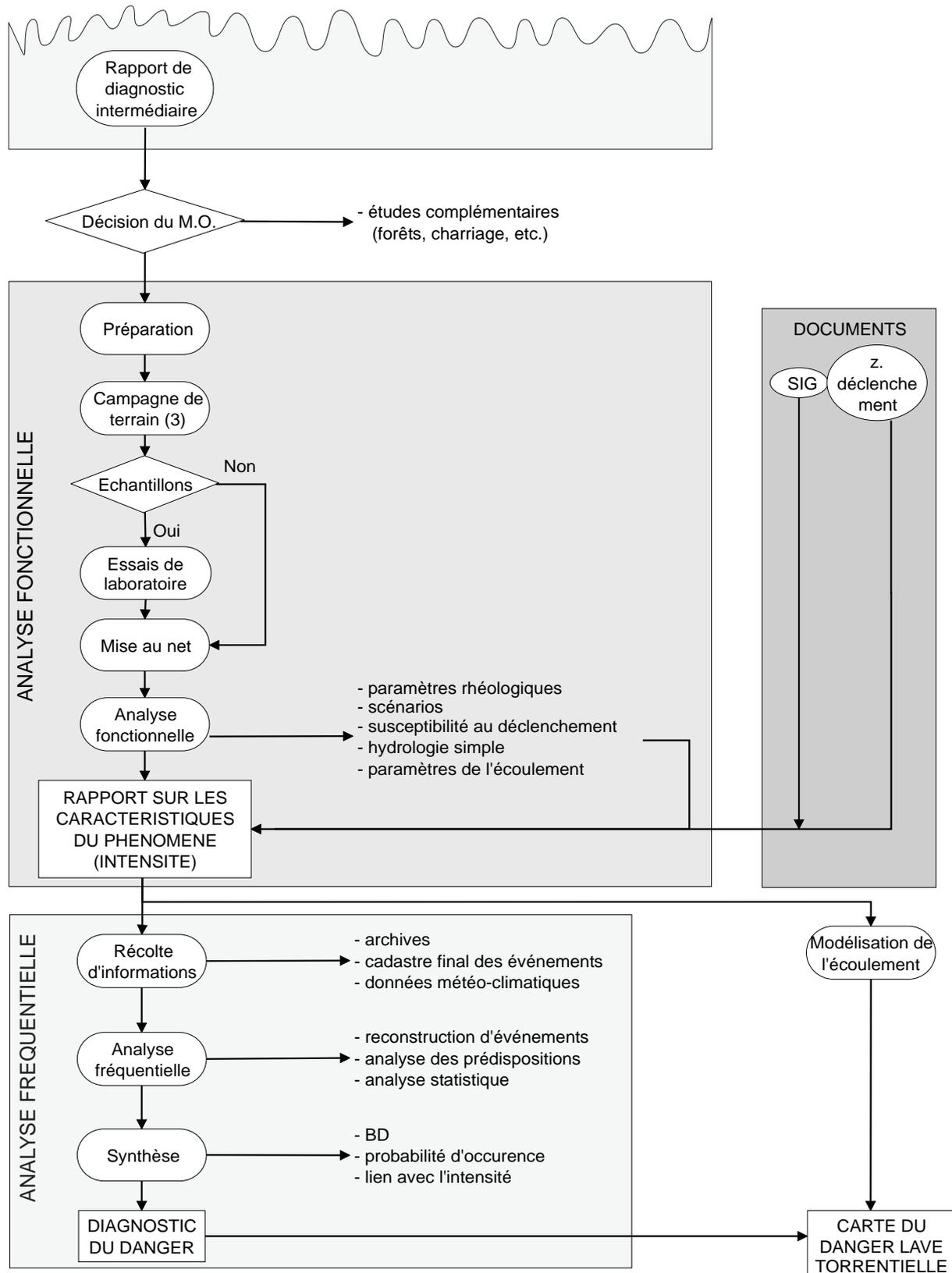


Figure 7-2 (suite): Les diverses étapes du diagnostic du danger

7.2. Diagnostic préliminaire

Le but du diagnostic préliminaire est de se faire une représentation du fonctionnement du bassin versant. Cette représentation doit être aussi juste que possible, en se basant sur les éléments faciles à obtenir (carte, archives, etc.).

Le diagnostic préliminaire se divise en trois grandes étapes (cf. figure 7-2). La première consiste à acquérir les données de bases et en faire une analyse succincte. Cette étape sert à préparer le praticien à la première campagne de terrain (1 ou 2 jours), afin qu'il puisse en profiter un maximum. Il commencera à alimenter la base de donnée géoréférencée gérée par un système d'information géographique (SIG). La seconde étape consiste en une reconnaissance sur le terrain (principalement photographique). Enfin dernière étape, la mise au net des informations acquises et leur analyse est faite afin d'en tirer la première représentation du bassin versant. Cette analyse sera finalisée par le rapport de diagnostic préliminaire.

7.2.1. Acquisition des données de base

Au cas où des documents de base n'existeraient pas, il convient de les créer et d'avertir le maître d'œuvre (MO) du niveau de détail qu'on peut atteindre avec les informations existantes.

7.2.1.1. Cartes

Deux types de carte sont utiles pour l'analyse des dangers sur un bassin versant. Les cartes topographiques (y.c. le modèle numérique de terrain correspondant) et les cartes thématiques, comme la carte géologique, la carte hydrogéologique et la carte géomorphologique.

Les cartes topographiques sont nécessaires pour déterminer les caractéristiques morphométriques du bassin versant en plan et en coupe. Il faut se souvenir que plusieurs surfaces sont importantes pour traiter le problème (cf. § 4.3.1).

Pour avoir un niveau de détail suffisant, il est nécessaire de travailler à l'échelle 1:10'000. Cependant les choix de l'étude (niveau de détail et étendue) guideront le choix de l'échelle du report final. Dans ce cas il faudra vérifier la validité de la base topographique. En effet, il existe des distorsions entre les divers documents existants, surtout dans le tracé des torrents. Il est donc important de décider quel est le document qui fait référence afin que tous les levés soient compatibles.

Les cartes thématiques ne sont pas toujours existantes, mais des renseignements peuvent être obtenus auprès des universités (travaux d'étudiants) ou auprès des bureaux ayant travaillé précédemment sur la zone (responsabilité du MO d'en signaler l'existence).

7.2.1.2. Photos aériennes

L'analyse des couples de photographies stéréoscopiques permet d'obtenir une information rapide et nécessaire sur les formes de faible amplitude du terrain. Ces formes ne sont pas toujours visibles sur la carte topographique et permettent de détecter certains des indicateurs géomorphologiques comme les glissements des terrains. Pour la personne non initiée, il peut être intéressant de lire les critères utilisés pour la détection automatique d'images (Noverraz 1999, Jaquet et al. 2000).

L'utilisation d'une orthophoto, avec représentation des courbes de niveaux, est un moyen très utile pour les levés géologiques et géomorphologiques complémentaires.

7.2.1.3. Archives

Plusieurs sources d'archives existent. Elles ne sont pas toutes d'utilisation facile (certaines ne concernent pas le diagnostic préliminaire, mais l'analyse fréquentielle, cf. § 7.5.2). Les différentes sources disponibles sont :

- Les archives cantonales, où sont répertoriés tous les grands événements au travers des crédits qu'ils ont occasionnés (elles peuvent nécessiter de faire appel à un historien pour les interpréter).
- Les archives des communes concernées, souvent assez détaillées, mais dont la qualité varie d'une commune à l'autre.
- Les archives du service des cours d'eau concerné contiennent les rapports techniques sur d'éventuels travaux réalisés sur le torrent étudié.
- En Valais, il existe "La documentation valaisanne", base de donnée classée géographiquement et contenant tous les articles parus dans la presse y relatifs (déposée à la bibliothèque cantonale).
- Les archives fédérales avec les fiches STORME existantes (géré par l'OFEP un exemple de ces fiches est donné à l'annexe 14) et les synthèses publiées chaque année par différents offices fédéraux (cf. § 7.5.1.2).
- La consultation des dossiers techniques des ouvrages de protections déjà construits (archive du service des routes et des cours d'eau en Valais).
- Les archives de particuliers, riverains des torrents, qui contiennent souvent des photographies d'événements. Elles sont difficiles à localiser. L'interview de ces témoins est aussi une bonne source d'information.

Ces informations doivent permettre de constituer un premier cadastre des événements. Une reconstitution des conditions ayant conduit à ces événements est ainsi possible. Cela permet d'identifier la présence d'un mécanisme de déclenchement particulier ou non. Ce cadastre permet de compléter les fiches STORME, mais devra être complété par les travaux de l'analyse temporelle (cf. § 7.5.2).

L'une des informations qui doit être fournie avec l'analyse des archives, c'est l'existence de documents qui n'ont pu être consultés dans le temps imparti pour aboutir au diagnostic préliminaire. La consultation de ces documents sera de première importance pour l'analyse fréquentielle, il ne faut donc pas en perdre la trace.

7.2.2. Analyse succincte

7.2.2.1. Données morphométriques

A partir des données existantes, en plus de la surface (cf. § 4.3.1) qui est une donnée de base, il est possible de définir :

- Le périmètre, les altitudes extrêmes, les pentes du cône et du bief principal, la longueur depuis les zones de déclenchement.
- La courbe hypsométrique, qui est importante pour des phénomènes liés à la neige et à la température (cf. § 4.3.2).
- Les courbes aires-distances qui permettent de détecter des anomalies hydrographiques (cf. § 4.4.2).

- La carte des pentes du bassin versant utiles pour diverses applications par la suite
- L'indice d'érodibilité qui qualifie le potentiel du bassin versant (cf. § 4.3.4). Cet indice ne doit pas être utilisé pour des bassins versants karstiques.

7.2.2.2. Mise en place d'une base de donnée géoréférencée

A ce stade il faut déjà créer le dictionnaire des données qui permet ainsi d'ordonner les informations, ainsi que d'en faire le bilan. En plus des champs intrinsèques à un thème particulier, il doit y avoir la date de la saisie, l'auteur du levé et la qualité de l'information (Burrough et M^c Donnel 1998, Hugon 2000).

7.2.2.3. Estimation du volume

C'est un point très délicat du diagnostic préliminaire. Il nécessite d'avoir analysé la géologie, car chaque type de roche a une fourniture sédimentaire différente (cf. tableau 4-2) et la géomorphologie, qui par la présence d'éléments particuliers peut amplifier la fourniture sédimentaire (cf. § 4.5.1). Il est important de faire cette estimation avant la première campagne de terrain afin de fixer les ordres de grandeurs et les confronter à la réalité.

Au niveau du diagnostic préliminaire, seules les formules empiriques globales peuvent s'appliquer (cf. § 4.6.3). Il faut confronter les résultats obtenus par chacune d'elle car le présent travail a montré qu'aucune formule n'était meilleure qu'une autre. Une analyse au cas par cas, augmentée de l'expérience du praticien (qui doit être grande), est nécessaire. Voici quelques recommandations vis à vis de ces formules :

- Le choix d'une formule peut être guidé par la qualité des paramètres nécessaires. Par exemple il faut renoncer aux formules utilisant la pente du cône fluvial lorsque ce dernier est peu ou pas marqué.
- Deux paramètres paraissent pertinents pour estimer le volume, soit la surface totale (récepteur du moteur du mouvement, l'eau) et la longueur (disponibilité des matériaux). Il semble qu'il faille un bon équilibre entre ces deux paramètres. Par exemple pour un bassin versant ayant un torrent de faible longueur par rapport à sa surface (pour donner un ordre de grandeur, lorsque la densité de drainage est inférieure à $0,7 \text{ km/km}^2$), le volume sera surestimé par les formules n'utilisant pas la longueur comme paramètre.
- Il faut faire attention à la définition des couvertures quaternaires. En effet de leur type (dépôts récents et anciens, type de moraine, couverture végétale, etc.) dépendra leur susceptibilité à fournir des matériaux pour les phénomènes torrentiels. Par exemple, pour la formule de d'Agostino (cf. § 4.6.3.2), l'indice géologique maximum attribué aux formations quaternaires doit être nuancé. Un dépôt ancien d'une moraine latérale sans végétation peut produire des événements plus importants qu'une zone de plaquage morainique recouverte de pâturages.
- L'utilisation de la formule de Franzi et le développement qui en a été fait montre une influence trop forte des bassins versants à fortes prédispositions, non comparable avec des bassins versants à prédispositions moyennes (cf. § 4.6.5.1). Il faut donc pouvoir juger des prédispositions avant d'estimer le volume événementiel maximum.
- Les résultats de toutes ces formules ne sont pas rattachés à une probabilité d'occurrence. Cependant, au vu des données utilisées pour les établir, on peut considérer que les volumes ainsi déterminés sont relatifs à des événements exceptionnels.

Ces formules ne doivent pas être utilisées sans vérifications (tout du moins de l'ordre de grandeur du volume obtenu). Une première vérification doit être faite en comparant les résultats obtenus avec les événements déjà observés dans le torrent ou en faisant une analogie avec d'autres torrents similaires. Une seconde vérification peut être faite au moyen de la formule d'estimation grossière du GHO (cf. § 4.6.2.1). Une autre vérification peut être faite en essayant de répartir le volume obtenu sur la surface de dépôts potentiels et ainsi de calculer l'épaisseur du dépôt obtenu. Il convient ensuite de comparer cette épaisseur avec des observations sur le terrain ou à défaut, avec l'expérience globale du praticien.

7.2.2.4. Estimation du débit et de la vitesse

A ce stade de l'étude, seule l'estimation du débit se basant sur le volume total et l'apparence (granulaire ou boueuse) probable de la lave torrentielle peut être utilisée (cf. annexe 12 et Rickenmann 197b). Comme il est très difficile de prédire à ce stade l'apparence de la lave torrentielle, on calculera les deux valeurs possibles (i.e. pour une apparence granulaire et boueuse) :

$$\text{pour une lave torrentielle d'apparence granulaire} \Rightarrow Q = 0.135 V^{0,78} \quad (7.1)$$

$$\text{pour une lave torrentielle d'apparence boueuse} \Rightarrow Q = 0.0225 V^{0,78} \quad (7.2)$$

où Q est le débit [m^3/s], et V le volume [m^3].

Une autre possibilité est d'approximer le **lavogramme** par un triangle rectangle (cf. figure 6-3) et d'analyser quelques scénarios en fonction du temps d'écoulement (10-15 minutes pour des bassins versants sans prédispositions particulières, mais pouvant atteindre l'heure pour des bassins versants aux prédispositions exceptionnelles) et sur la répartition du volume total en un certain nombre de bouffées. Estimant ainsi le volume (surface du triangle) et la durée d'écoulement (largeur du triangle), on peut en déduire le débit de pointe (hauteur du triangle). Cette méthode permet de se positionner entre les deux valeurs déterminées précédemment.

Une estimation de la vitesse peut être faite à partir des valeurs de débits et la pente du lieu, par la formule (Rickenmann 1999) :

$$\Rightarrow U = 2,1 Q^{1/3} J^{1/3} \quad (7.3)$$

où U est la vitesse moyenne de la lave [m/s], et J la pente du lieu [%]. Ceci permet de calculer les sections nécessaires à l'écoulement d'une lave torrentielle aux points critiques.

7.2.2.5. Première estimation des points critiques

Sur la base des informations disponibles à partir de la carte topographique et des données morphométriques, il est possible de déterminer toute une série de points critiques à visiter lors de la 1^{ère} campagne de terrain, soit :

- les cassures de pentes du lit (convexes et concaves).
- la partie du lit sur le cône.
- les points d'étranglement naturels ou artificiels (seuils).
- les ouvrages de franchissement sur le torrent (il faudra relever les sections libres).

- les parties proches des habitations.

Ces points seront comparés aux estimations de débits et surtout aux sections nécessaires à l'écoulement (cf. § 7.2.2.4).

7.2.3. Première campagne de terrain

Le terrain représente la source d'informations objectives principale. Cependant il n'est pas possible d'y rester durant toute l'étude. Il convient donc de bien préparer les campagnes de terrain, afin qu'elles puissent être aussi efficaces que possible.

7.2.3.1. Planification

La planification d'une campagne de terrain se fait tout d'abord en établissant clairement son but. Ici elle sert à confronter les informations de base avec la réalité afin de pouvoir produire une première représentation du bassin versant au niveau de ses formes et de son fonctionnement. Cette première campagne permettra aussi de commencer à fixer des points de comparaison (photographies des points critiques).

Le but ainsi défini, les outils nécessaires à emporter, les documents à préparer apparaissent d'eux même. Quelques livres traitent du levé de terrain dans le domaine de la géologie et de l'hydrologie, le lecteur pourra y trouver des renseignements sur les outils et les moyens simples à mettre en œuvre lors de ces reconnaissances.

A partir de là, il faut planifier le cheminement à faire lors de la toute première tournée, afin d'optimiser le recueil d'information.

Si les personnes réalisant le diagnostic préliminaire conduisent l'étude jusqu'à l'obtention du diagnostic du danger, certaines observations planifiées lors de la deuxième campagne de terrain peuvent être faites avantageusement lors des premières tournées (cf. remarque § 7.3.3.1).

7.2.3.2. Levé de terrain

Cette première tournée de terrain doit permettre de vérifier les données de base (le cas échéant d'indiquer les compléments nécessaires). Les observations qui doivent être faites concernent :

- la pertinence des paramètres utilisés dans les formules d'estimation du volume (pentes, couverture géologique, prédispositions).
- la pertinence des points critiques et l'identification de ceux non détectables sur les documents de base (plage de dépôts, zone de roche friable)
- la section en travers des différentes parties du torrent avec une attention particulière pour les points critiques précités.
- la photographie des points critiques et de l'allure générale du bassin versant. Ces images doivent être géoréférencées et intégrées à base de donnée géoréférencée.
- le report sur le SIG des traces encore visibles d'événements du passé.

7.2.4. Rapport de diagnostic préliminaire

Ce rapport doit permettre à toute personne n'ayant pas visité le bassin versant en question de s'en faire une image, d'en estimer le danger potentiel dû aux laves torrentielles et d'en reconnaître les points critiques. Ce rapport doit comporter :

- une liste de données morphométriques (confirmées par le terrain).
- les notes de calculs des diverses caractéristiques estimées (volume, débits, etc.).
- une chronique des événements connus avec leur intensité.
- une ébauche de la base de donnée géoréférencée, avec entre autres les points critiques.
- un dossier photographique dûment référencé intégré au SIG.
- l'avis personnel de l'auteur quant à l'intensité et la probabilité d'occurrence des laves torrentielles.
- une liste des documents disponibles aussi exhaustive que possible, ainsi que leur emplacement.

7.3. Analyse spatiale

L'analyse spatiale consiste à établir la répartition de l'eau, des fines et des grains rocheux, ainsi que les interactions possibles entre ces trois composantes, ceci en vue d'obtenir une carte des zones d'où pourraient se déclencher les laves torrentielles. Il est nécessaire de préparer une partie de ces documents avant la seconde campagne de terrain afin de connaître exactement les lacunes dans les informations existantes. De cette façon lors de cette campagne il ne restera plus qu'à remplir les cases vides.

7.3.1. Complément d'information

7.3.1.1. Géologie

En Suisse la couverture est bientôt complète; cependant il reste encore quelques parties du territoire dont les feuilles d'atlas (1:25'000) n'ont pas encore paru. Dans ce cas un levé complémentaire devra être effectué. Les cartes tectoniques existantes de la Suisse au 1:100'000 peuvent être un outil précieux pour dégrossir le levé.

Dans le cas de zones couvertes par les feuilles de l'atlas, un complément est souvent nécessaire au niveau du levé des failles tectoniques, paramètre important de la qualité du massif rocheux (cf. § 4.7.4). Cette information doit être traitée par une personne spécialisée.

7.3.1.2. Hydrogéologie

La couverture cartographique hydrogéologique est encore faible. Dans le cas de bassin versants simples, ces cartes au 1:100'000 peuvent suffire. Cette information peut aussi être obtenue auprès du MO qui connaît les études précédentes ayant trait à l'hydrogéologie (zones de protection des sources, concession pour l'eau de boisson ou l'eau thermale).

Dans le cas d'un bassin versant hydrogéologiquement compliqué (i.e. karstique), et si aucune étude précise n'existe, un complément doit être apporté. Un tel complément peut nécessiter un essai de traçage (Brassington 1998). Si les caractéristiques hydrogéologiques influencent fortement le déclenchement des laves torrentielles, une campagne de forage peut s'avérer nécessaire.

Géologie

- e₆₋₇**: Flysch
- e₆**: Calcaires et Schistes nummulitiques
- e₆₋₉**: Turonien, Gault, Aptien
- e₄₋₆**: Urgonien
- e₃**: Hauterivien
- e₂**: Valanginien (autochtone)
- e₂₀**: Valanginien, Calcaires supérieurs (n. Morcles)
- E**: Complexe souvent mylonitisé de Cristallin, de Trias, de Nummulitique

Géomorphologie

-  falaise (2 mm = 10 m), ici en flysch
-  glacier
-  voile d'éboulis (ici flysch, et des calcaires)
-  source

Quaternaire

-  éboulis sec
- q_l**: glacière local
- q_r**: glacière actuel et récent

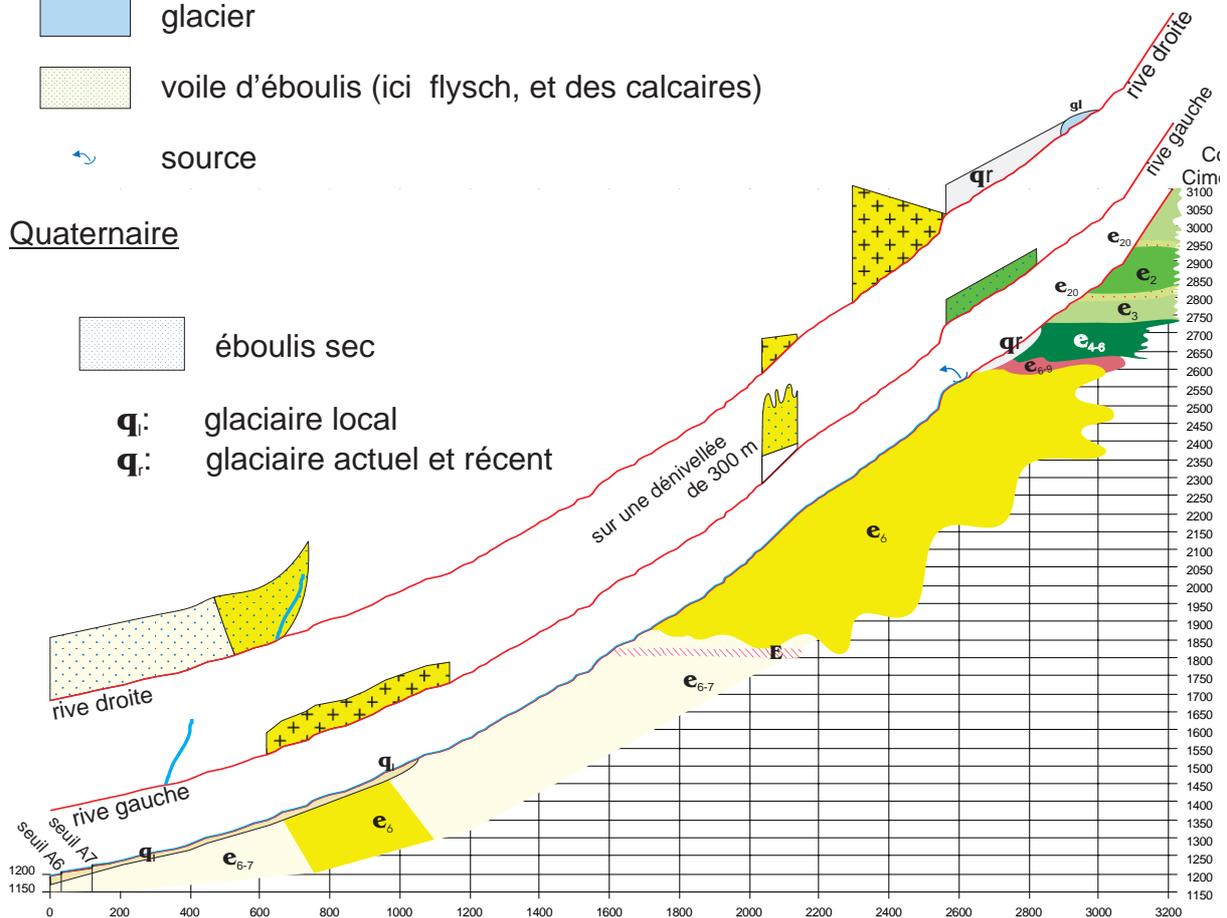


Figure 7-3: Exemple de profil en long sur la partie supérieure du St-Barthélémy

7.3.1.3. Géomorphologie

En Suisse, il n'y a pas de carte géomorphologique publiées par les instances officielles. Cependant les cartes géologiques les plus récentes comportent déjà bien des informations sur les formes géomorphologiques (glaciers rocheux, glissements de terrain, cône fluviate, etc.). L'analyse des photoaériennes peut aussi apporter une bonne partie de l'information. Si un levé détaillé est nécessaire, il faut d'abord se renseigner auprès des instituts de géographie des différentes universités pour savoir si des minutes de la zone étudiée existent déjà. C'est sur la base de ces informations géomorphologiques, augmentée au besoin d'analyse géophysique, qu'il sera possible de faire une bonne estimation des volumes mobilisables.

7.3.1.4. Profil en long

A partir du fond topographique au 1:10'000, il est possible de tirer un profil en long du bassin versant. Dans le cas où des zones relativement plates existeraient, un levé complémentaire de précision sera peut être nécessaire.

Une fois le profil en long établi, on lui adjoint les informations géologiques et géomorphologiques (cf. figure 7-3). Ce profil doit être représenté avec les pentes vraies (pas d'exagération selon l'axe vertical) afin de pouvoir représenter le pendage des couches géologiques. Les notices explicatives des cartes géologiques comportent déjà des coupes qui aident ainsi à la confection des coupes dans l'axe du torrent. Il est important de pouvoir faire figurer sur ces coupes les informations avérées de façon différente de celles supposées (à représenter en pointillé ou en ondulé). Le mode de représentation développé durant ce travail consiste en un profil du soubassement et de deux profils des rives représentant les indicateurs géomorphologiques pertinents. Les zones où du matériel remobilisable (fin, grossier ou mixte) est à proximité du torrent doivent aussi être indiquées (cf. rive droite en zone inférieure de la figure 7-3).

7.3.1.5. Ouvrages

Tous les ouvrages en lien avec le torrent étudié doivent être répertoriés. Pour les ouvrages de franchissement du torrent, il faut indiquer la section disponible pour l'écoulement. Pour les ouvrages de protection déjà existants, il faut connaître leur état de fonctionnement et remplir une fiche PROTECTME.

Dans le cas des constructions présentes dans la zone d'atteinte potentiel des laves torrentielles, il devra être indiqué quelles sont leurs résistances.

7.3.1.6. Divers

Suivant les cas il peut être important de savoir s'il y a des zones en pergélisol sur le bassin versant. Si c'est potentiellement le cas, une carte de ces zones doit être dressée. Cette information doit être traitée par une personne spécialisée.

Des données concernant l'altération pourront dans le futur être importantes pour qualifier les produits d'altération (au niveau quantitatif et qualitatif). Cette information devra être combinée aux observations géologiques (lithologie et tectonique) et géomorphologiques (histoire holocène) pour définir la qualité des massifs rocheux (cf. § 4.7.4).

7.3.2. Identification des zones de déclenchement potentiel

La carte des zones de déclenchement potentiel est, avec la base de donnée géoréférencée, un document sur lequel s'appuyera le praticien tout au long du diagnostic du danger (cf. figure 7-2). Cette carte sera augmentée d'informations sur la quantité de matériel mobilisable et la probabilité de déclenchement au fur et à mesure que l'étude progressera. Elle sera l'une des bases de la modélisation du danger (point de départ).

7.3.2.1. Détermination grossière des zones de déclenchement

A l'aide des outils SIG, il faut faire une première estimation des zones de déclenchement. Les sites où des laves torrentielles peuvent se déclencher sont déterminés en croisant les informations sur la pente et la disposition géomorphologique du lieu (pleine pente, pied d'une falaise, talweg ou couloir, cf. tableau 5-1).

7.3.2.2. Détermination plus fine des zones de déclenchement

Dans un deuxième temps, il faut affiner la caractérisation des zones faite au point précédent. L'observation du type de matériel mobilisable (quantité de fines, de granulats, qualité des argiles) et la connexion possible avec l'eau (talweg), ainsi que la présence d'indicateurs géomorphologiques (comme des glissements de terrain) permettent d'affiner la première zonation.

7.3.3. Deuxième campagne de terrain

Le premier volet de cette deuxième campagne de terrain est de compléter l'information au niveau du substratum, des différents indicateurs géomorphologiques et du levé précis les ouvrages. Le second volet est de reconnaître les sites de déclenchement potentiel.

7.3.3.1. Planification

Pour planifier cette seconde campagne, il faut faire l'inventaire des données manquantes et préparer les supports nécessaires au levé de ces informations (fond topographique, profil, orthophotos).

Si cette campagne de terrain n'est pas traitée par les mêmes personnes que celles qui ont établi le diagnostic préliminaire, il peut être intéressant de planifier une reconnaissance des accès à certaines parties du bassin versant ou à certains points de vue intéressants pour le problème traité.

7.3.3.2. Levé de terrain

Les détails des levés complémentaires constituent des branches spécifiques qui sont hors sujet. Le lecteur pourra se reporter entre autre à M^c Clay (1997). Les tâches principales à effectuer lors de cette campagne sont :

- une visite de toutes les zones de déclenchement (avec prise de photographies intégrées à la base de donnée géoréférencée).
- une descente du cours du torrent avec un levé géomorphologique de détail qui sera reporté sur le profil en long (cf § 7.3.1.4).

Pendant ces relevés, une attention particulière sera donnée aux traces permettant de mesurer des vitesses (méthode de surélévation dans la courbe, mesure à effectuer immédiatement, cf par exemple Meunier 1991) et aux formes de dépôt permettant une estimation des

caractéristiques rhéologiques (bourelets, mesures à effectuer peu après). Ces éléments seront géoréférencés afin de pouvoir être utilisés lors de l'analyse fonctionnelle (cf. § 7.4) et par la modélisation (calage du modèle).

7.3.4. Rapport de diagnostic intermédiaire

Ce rapport intermédiaire sert à planifier l'étape suivante du diagnostic et permettre au MO de donner son accord sur les besoins nécessaires pour l'analyse fonctionnelle. Il doit donc déjà contenir les éléments bruts disponibles nécessaires à cette analyse.

7.3.4.1. Carte des zones de déclenchement

Les sites potentiels de déclenchement doivent être répertoriés et mis en regard des divers indicateurs géomorphologiques. Ces cartes doivent déjà laisser apparaître quels sont les mécanismes de déclenchement possibles sur le bassin versant et donc donner une idée des scénarios possibles.

7.3.4.2. Profil en long

Cet outil est particulièrement important et doit être réalisé avec soin. L'information qu'il contient doit, entre autres, permettre l'estimation du volume par les méthodes géomorphologiques. Un exemple est donné à la figure 7-3.

7.3.4.3. Points critiques

Une liste des points critiques (point de débordement, zone de dépôt, point de retenue, section critique, objet de danger ponctuel, tel que les lacs pro-glaciaires etc.) doit être disponible et les points en question doivent être géoréférencés. Les notes de calculs et/ou les observations les ayant répertoriés comme tels y être liées. De cette façon certains points pourront être vérifiés lors de la modélisation (plages de dépôt, obstruction de la section, etc.).

De cette liste, le praticien tâchera de ressortir quelques points caractéristiques qui seront photographiés à intervalles réguliers et pourront servir de points de comparaison pour le suivi à long terme du torrent et la gestion des risques résiduels.

7.3.4.4. Liste des besoins

Le report des traces dans le SIG permet de définir le nombre d'échantillons et les sites de prélèvement, ce qui permettra de planifier la troisième tournée de terrain. Les lacunes dans les informations disponibles doivent apparaître clairement, afin de donner au MO le moyen de planifier la prochaine étape dans le temps et au niveau financier, car l'estimation des besoins peut faire apparaître la nécessité d'installations provisoires, comme des pluviomètres ou des témoins de passage de laves torrentielles. De tels moyens peuvent parfois être coordonnés avec d'autres réseaux de mesure.

7.4. Analyse fonctionnelle

A partir des données sur les sites de déclenchement potentiel, l'analyse fonctionnelle vise à clarifier le fonctionnement d'un bassin versant vis à vis des laves torrentielles (mécanisme de déclenchement, comportement rhéologique, intensité). Le responsable de cette étape doit avoir une bonne connaissance des modèles d'écoulement, même si ceux-ci ne font pas partie intégrante du diagnostic. En effet, c'est lors de l'analyse fonctionnelle que les paramètres nécessaires aux modèles seront estimés.

7.4.1. Troisième campagne de terrain

7.4.1.1. Planification

Une fois le type de modélisation choisi, tous les éléments pour planifier cette troisième campagne de terrain peuvent être obtenus dans le rapport de diagnostic intermédiaire.

L'hypothèse est faite dans ce travail que les modèles utilisés seront du type de ceux développés par Coussot (1996) pour les laves torrentielles viscoplastiques et ceux développés par Ancey (1997), car ils permettent de mesurer certains paramètres sur le terrain. D'autres modèles sont possibles, ils nécessitent alors d'autres mesures sur le terrain.

7.4.1.2. Terrain

Trois analyses sont à effectuer sur le terrain :

- l'analyse morphologique des traces
- la prise d'échantillons de la matrice des laves torrentielles (pas toujours nécessaire si les traces sont suffisamment nettes),
- l'estimation de la section érodable (pour une estimation du volume par une méthode géomorphologique).
- l'estimation des zones de dépôt potentielles (obstructions) dans le lit et la disposition géomorphologique de l'endroit (débordement possible ou non)

L'analyse morphologique des bourrelets se fait en deux étapes. Premièrement il faut déterminer quel est le comportement rhéologique qui a produit ces traces (cf. tableau 6-1). Ensuite, dans le cas d'un bourrelet (ou d'un lobe) d'une lave torrentielle viscoplastique, il faut appliquer la méthode décrite au paragraphe 6.4.1 et à l'annexe 9 pour déterminer le seuil de contrainte. Dans le cas d'un bourrelet frictionnel-colisionnel il faut mesurer l'angle du talus qui est supposé être proche de l'angle de frottement interne ϕ (Ancey 1999). Il est possible alors d'exprimer le seuil d'écoulement par une loi de type Mohr-Coulomb (cf. § 6.3.1).

S'il n'y a pas de trace, ou si celles-ci sont ténues ou anciennes, il faut aller prélever des échantillons dans les zones de déclenchement potentiel. Dans l'absolu, il faudrait pouvoir comparer un échantillon d'une zone source avec celle d'un dépôt (prélevé de façon à assurer qu'un minimum de matière fine soit perdu). Si cela n'est pas possible, il faut prélever dans les zones sources, dans les zones où il y a du matériel remobilisable et s'il y a lieu dans les dépôts anciens (cf. figure 4.5.1.2) qui bordent le torrent, car la composition de la matrice peut évoluer le long du cours.

Sur tout le cours du torrent, une estimation des sections érodables doit être faite de manière à différencier les différents biefs. Cette analyse demande une certaine expérience. L'habillage du profil en long (le cas échéant complété par des mesures géophysiques) per-

met d'identifier les zones à fort potentiel d'érosion de celles à faible potentiel. Une formule pour estimer la profondeur d'érosion existe, mais n'a pas été testée dans ce travail (§ 4.6.6, équ. 4.21).

Les zones de dépôt potentielles peuvent être estimée à l'aide de la pente et du type rhéologique (cf. tableau 6-1).

Durant cette campagne, les prises de vues à partir des points caractéristiques déterminés au sous-paragraphe 7.3.4.3 permettront une première comparaison de l'état et de l'évolution du lit au cours du temps.

7.4.2. Analyse des échantillons

En première approche, il est possible d'analyser la courbe granulométrique écrêtée à 20 mm pour définir le comportement rhéologique (par exemple, en cas de doute sur la morphologie d'une trace). Cette analyse se fait sur la base des fuseaux granulométriques types obtenus dans cette étude (cf. § 6.6.2.1).

S'il y a doute (d'autant plus qu'il n'y a pas de traces visibles), les échantillons seront tamisés jusqu'à séparer la fraction inférieure à 0,4 mm du reste. Cette fraction est ensuite analysée dans un rhéomètre selon le protocole défini à l'annexe 9. Si le comportement décrit est viscoplastique, les résultats peuvent être traités selon la procédure décrite au paragraphe 6.4.1. Si c'est un autre comportement qui est décrit, il n'existe actuellement pas de liens possibles entre ces résultats et les modèles, si ce n'est la connaissance du comportement lui-même.

7.4.3. Analyse du phénomène lave torrentielle

La mise au net des résultats obtenus lors de cette campagne de terrain représente le coeur du diagnostic. C'est à ce niveau que les moyens techniques mis en oeuvre et l'expérience du praticien doivent être intégrés en un tout. De la qualité de cette analyse dépendra la qualité du résultats des modèles.

7.4.3.1. Processus sédimentaire

En premier lieu, le volume potentiellement mis en mouvement sera calculé avec une formule géomorphologique (cf. § 4.6.6). Le résultat obtenu sera comparé avec les volumes déposés déjà obtenus au sous-paragraphe 7.2.2.3. Les différences devront être expliquées (matériaux fortement remobilisables en quantité, transit dans l'effluent, etc.). Ces explications permettent de mettre en évidence certaines solutions (stabilisation des masses instables) ou certains problèmes (exhaussement du lit de l'effluent).

7.4.3.2. Estimation des paramètres de l'écoulement

A partir du comportement rhéologique, il est possible de se faire une idée de la résistance à l'écoulement du fluide mis en cause. De façon qualitative, il est possible de dire que :

- un comportement collisionnel-frictionnel aura une pseudo-viscosité et un seuil d'écoulement élevés, entraînant une dissipation plus intense de l'énergie et donc une pente d'arrêt plus grande ($\alpha > 11^\circ$).
- un comportement viscoplastique a lui une viscosité moins forte (de plus, elle est mesurable); la lubrification des contacts induit une dissipation moins intense de l'énergie et donc des pentes d'arrêt plus faibles ($2^\circ < \alpha < 11^\circ$).

- un comportement frictionnel-visqueux présente une pseudo-viscosité encore plus faible et voit son seuil d'écoulement disparaître une fois mis en mouvement, ce qui fait passer les valeurs des pentes d'arrêt en dessous de 1°.

Les implications pour l'écoulement sont multiples. Pour les comportements collisionnel-frictionnel et frictionnel-visqueux, l'utilisation de modèles globaux (Voellmy-Perla, cf. annexe 12) peut se faire en prenant des valeurs plus élevées, respectivement plus faible pour le paramètre lié à la résistance à l'écoulement (Genolet 2002).

Dans le cas du comportement viscoplastique, et seulement dans ce cas là, les formules données par Coussot (1996) sont applicables. Il est ainsi possible d'estimer le débit ou la vitesse en un point donné. Ces formules demandent toutefois une analyse de sensibilité. Je tiens à souligner ici que les débits estimés selon cette méthode ne peuvent pas être comparés aux débits estimés par les formules 7.1 et 7.2. En effet une lave torrentielle au comportement viscoplastique (nommé boueux dans le langage courant) peut ne pas avoir une apparence boueuse, mais plutôt une apparence granulaire.

Dans les cas où il y a peu de donnée, il est possible d'estimer le débit par la méthode décrite par Meunier (1991) en se basant sur une augmentation du débit liquide.

$$Q = \chi^{1,41} Q_{\text{eau}} \quad (7.4)$$

où Q_{eau} est le débit d'eau claire déterminé par ailleurs, et χ un coefficient compris entre 2 et 4, traduisant l'augmentation du volume total par l'apparition de sédiment.

7.4.3.3. Analyse hydrologique

L'analyse hydrologique doit non seulement être faite pour avoir une idée du débit d'eau claire (cf. ci-dessus), mais aussi pour apprécier la susceptibilité du bassin versant à produire des débits important et concentré dans le temps (ce qui rend un déclenchement de lave torrentielle plus probable). En effet les processus sédimentaire torrentiel sont fortement liés au débit liquide (Koulinski 1994). Seule cette analyse permet de qualifier la vigueur des réactions hydrologiques sur le bassin versant et, partant sa propension à générer des événements de transport solide. Les méthode les mieux adaptées en milieux alpin sont Kölla (1984) ou celle développée par le Groupe CRUEX (1996).

Dans l'analyse hydrologique est incluse la détermination des averses types. Cette information sera utilisée plus loin dans l'analyse fréquentielle (cf. § 7.5.2), tout en nécessitant la récolte préalable des informations (pluies, température) nécessaires (cf. § 7.5.1.3).

7.4.3.4. Susceptibilité des zones de déclenchement

A l'heure actuelle, il n'existe aucun moyen objectif d'évaluer la susceptibilité d'une zone de déclenchement sur le terrain. Toutefois, dans le cas d'un déclenchement superficiel, le déclenchement sera facilité si :

- la zone est peu perméable (de façon intrinsèque ou par influence hydrogéologique).
- les fines sont peu ou mal agrégées (influence de la quantité et du type de fines).
- la granulométrie est continue (i.e. que toute les classes y sont représentées en proportions similaires).
- d'autres type de mouvement sont déjà présents (fluage, glissement, solifluction, etc.).

Dans le cas d'un déclenchement par glissement de terrain (cf. § 5.2.1), l'analyse doit se faire comme pour un glissement de terrain, voir par exemple Vulliet (2001).

7.4.3.5. Liens entre les zones de déclenchement et le torrent

Là aussi il n'existe pas pour le moment de méthode objective pour estimer jusqu'à quelle distance une zone de déclenchement peut être connectée au torrent ou à un talweg. Un traitement au cas par cas est nécessaire. Dans une première approche et par facilité, plus que par observations scientifiques, une zone tampon d'une cinquantaine de mètres de part et d'autre du torrent (ou du talweg) paraît être une bonne valeur de référence. Cependant elle ne tient pas compte des masses dans le versant qui ont des mouvements d'une ampleur plus grande, comme un glissement qui s'accélèreraient ou une coulée de boue (cf. § 2.1.1).

La susceptibilité des zones de déclenchement et leurs liens avec le torrent permettent de mieux définir ces zones. Il est donc possible d'ajouter sur la carte des zones de déclenchement une gradation relative de leur activité.

7.4.3.6. Etablissement de scénarios

La carte des zones de déclenchement croisée avec la carte géomorphologique et les points critiques permet d'établir une liste de scénarios possibles. Pour établir cette liste une bonne connaissance des deux mécanismes de déclenchement, l'érosion et la fluidification (cf. § 5.2.1 et § 5.2.2) et leurs différentes modalités (cf. § 5.2.3), est nécessaire.

L'étude des déclenchements précédents sur le bassin versant (ou le cas échéant sur des bassins aux dispositions similaires) obtenus lors de la recherche dans les archives (cf. § 7.2.1.3 et § 7.5.1.1) est un complément nécessaire pour l'élaboration des différents scénarios.

7.4.4. Rapport sur les caractéristiques du phénomène

L'ensemble des observations et des valeurs obtenues dans l'analyse fonctionnelle permet de définir l'ordre de grandeur de l'intensité du phénomène, ainsi que la susceptibilité des différentes zones de déclenchement. En fait, les éléments de ce rapport doivent déjà permettre d'entamer la modélisation; seule la probabilité d'apparition des événements n'est pas encore connue en détail.

7.5. Analyse fréquentielle

Le but de cette section est double. Il vise à donner quelques pistes pour approcher la probabilité d'occurrence, mais aussi à fournir des éléments de réflexion nécessaires à la gestion en temps réel du bassin versant.

Pour pouvoir réaliser une carte des dangers, il faut non seulement connaître l'intensité du phénomène, mais aussi sa probabilité d'occurrence. Cette dernière information est difficile à donner, en partie à cause de la rareté du phénomène en un point donné et du peu de mesures qui en découlent.

7.5.1. Récolte d'information

Une partie de l'information nécessaire à l'analyse temporelle est déjà existante et identifiée (cf. § 7.2.1.3). Cependant, expérience faite, il est quasiment impossible, dans la durée raisonnable pouvant être impartie au diagnostic préliminaire, d'obtenir tous les documents existants. Dans le cas d'un torrent ayant une histoire chargée, l'aide d'un historien pour décrypter les archives peut s'avérer utile.

7.5.1.1. Archives

L'analyse des documents officiels conservés, comme les pièces comptables, les annonces de décès par les paroisses, les rapports forestiers, les anciennes cartes, les coupures de journaux, les rapports de fouilles archéologiques, d'ancien rapports techniques, etc. sont autant d'informations qu'il faut valoriser.

7.5.1.2. Cadastre des événements

Déjà ébauché lors du diagnostic préliminaire, le cadastre des événements doit être complété avec les informations tirées des archives. Il faut signaler, qu'en Suisse, il existe depuis 1989 une chronique des événements ayant une portée nationale. Ce sont les articles de Röthlisberger (1989 - 1999) qui sont repris maintenant par Hegg (2000). Une synthèse portant sur la période 1972-1996 (Röthlisberger 1998) et une chronique des événements plus anciens sont aussi disponible (Röthlisberger 1991).

La valorisation des informations tirées des archives et leur croisement avec le cadastre des événements permettent d'estimer le niveau des prédispositions composant le système lave torrentielle (cf. § 2.3.2). Sur la base de la figure 2-8, il faut essayer de reconstruire un système lave torrentielle permettant d'apprécier sa dynamique. L'exemple de la figure 7-4 montre plusieurs types de système (non exhaustif), dont l'analyse permet par la suite une estimation de la probabilité d'occurrence (cf. § 7.5.2.1)

7.5.1.3. Données météo-climatiques

Afin de pouvoir recalculer certains événements et faire l'analyse hydrologique, il est nécessaire d'aller rechercher les données relatives au climat et à la météorologie (MétéoSuisse). L'acquisition de ces données doit être aussi complète que possible, afin de permettre une analyse événement / non-événement (Marquis 2000).

7.5.2. Estimation de la fréquence du phénomène

L'analyse fréquentielle des laves torrentielles est rendue difficile par la nécessité d'une conjonction de plusieurs phénomènes pour qu'il y ait déclenchement. Les mécanismes de déclenchement, ainsi que leurs modalités peuvent alterner sur un même bassin versant, chaque combinaison ayant une probabilité d'occurrence différente. De même l'origine de l'eau peut changer d'un déclenchement à l'autre, donnant ainsi plusieurs sous-populations statistiques différentes (Bardou et al. 2002). Ces considérations sont à prendre en compte s'il est envisagé de faire une analyse fréquentielle classique.

Dans une optique opérationnelle et si l'homogénéité des données tirées du cadastre des événements est assurée, il est possible de faire une analyse fréquentielle. Cependant il faut être conscient que le nombre de données et l'absence de gradation dans l'intensité rend cette analyse délicate. De plus une mise en garde est nécessaire sur la tentation de remonter loin dans le temps pour accroître la taille de l'échantillon. En effet, dans les Alpes, le Petit

Age Glaciaire (fin vers 1850) a eu une grande influence sur la dynamique sédimentaire (Fournier 2000). Cette influence peut être positive ou négative suivant les dispositions des sites étudiés. Il faut aussi être conscient que certaines laves torrentielles ayant une intensité d'un ordre de grandeur similaire aux événements catastrophiques, mais n'ayant pas causés de dégâts notables ne sont pas répertoriées. L'échantillon se trouve ainsi biaisé (cf. § 3.4.2).

7.5.2.1. Moyens opérationnels de détermination de la fréquence

Il n'existe, à l'heure actuelle, aucun moyen objectif de donner la probabilité d'occurrence d'une lave torrentielle d'une intensité donnée et sur un bassin versant donné. Les quelques remarques suivantes peuvent aider à approcher cette donnée :

- Lorsque plusieurs bassins versants peuvent être considérés comme similaires (au niveau de leur lithologie, des couvertures quaternaires, et du climat) on peut supposer que le déclenchement est équiprobable dans tous les bassins versants. Il est possible alors de faire une analyse statistique sur un échantillon regroupant tous les événements sur la zone. Une telle approche est dérivée de celle utilisée pour les chutes de blocs décrite par Hantz et al. (2001).
- Lorsqu'un événement d'une intensité exceptionnelle ayant provoqué une érosion du lit importante (i.e. qui a atteint le soubassement rocheux) a eu lieu, les prédispositions diminuent. Il y aura par la suite plus d'événements (probabilité d'occurrence plus élevée), mais avec des intensités plus faibles.
- Une bonne analyse des prédispositions est nécessaire. Dans le cas où le réservoir sédimentaire est quasi-infini (i.e. qu'il y a toujours des matériaux disponibles), la mise en mouvement de particules est directement lié à l'intensité du ruissellement superficiel (cf. § 5.4.3). Il existe alors une relation entre la probabilité d'occurrence des laves torrentielles et celle du débit (Stiny 1929). L'étude hydrologique est alors un point essentiel de l'étude.
- Pour un torrent aux prédispositions et au potentiel¹ moyens et en l'absence de bassins versants comparables, la probabilité d'occurrence ne doit être définie que de manière qualitative, soit événement possible, probable, etc.

L'analyse de la probabilité d'occurrence doit être évaluée pour chacun des scénarios définis plus haut. La combinaison de l'analyse fréquentielle et de l'analyse fonctionnelle permet ainsi de définir des événements de référence. Ce sont ces événements qui doivent être modélisés pour obtenir la carte des dangers.

7.5.2.2. Reconstruction d'événement

En plus de l'intérêt pour l'analyse hydrologique (cf. § 7.4.3.3), la reconstruction d'événements (au niveau des conditions générales existant lors de leur gestation) permet d'établir en partie quelles ont été les processus déterminants. Cette analyse facilite par la suite l'estimation de la probabilité d'occurrence.

Ces éléments sont aussi d'une importance primordiale pour l'analyse en temps réel du danger lave torrentielle sur un bassin versant. La construction du système lave torrentielle conceptuel (tel que défini au paragraphe 2.3.2) permet en effet de mettre en évidence certains paramètres (cf. figure 7-4).

1. Le potentiel désigne ici la quantité de matériaux érodables entre le lit actuel et le soubassement rocheux, qui peuvent éventuellement être mis en mouvement lors d'un événement exceptionnel.

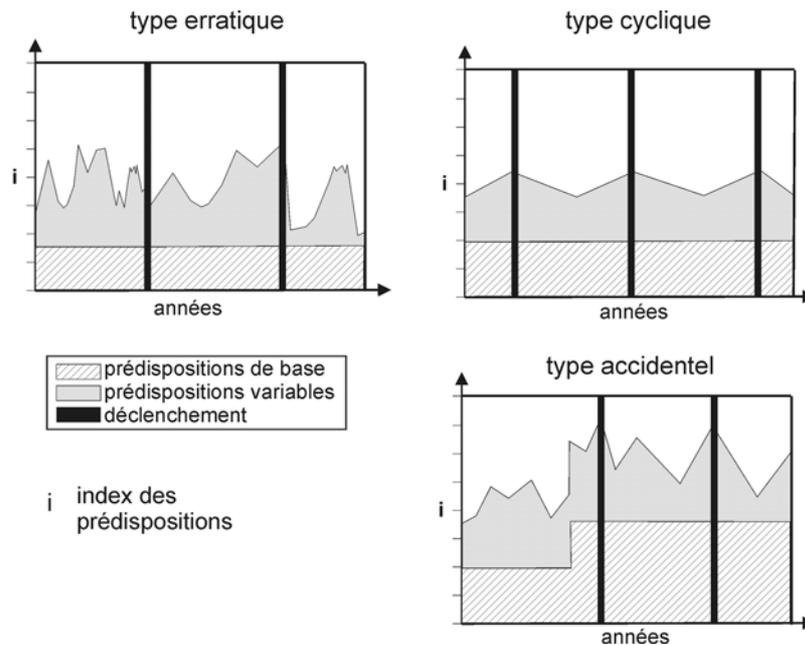


Figure 7-4: Dynamique du bassin versant traduite en terme de prédispositions. Si un bassin versant comporte beaucoup de dépôts jeunes il aura tendance à avoir un type cyclique. Si un éboulement se produit, il peut y avoir changement de la topographie (prédisposition de base), c'est le type accidentel. Des combinaisons de ces différents types sont possibles.

7.6. Diagnostic du danger

Le rapport du diagnostic de danger représente la synthèse de toutes les étapes énoncées ci-dessus et dont la récapitulation se trouve à la figure 7-5. Il doit comporter :

- Le cadastre final des événements
- La description des différentes intensités possibles (la séparation des classes se faisant en fonction de la différenciation des effets (non débordement, presque débordement, débordement important, etc.))
- La description des conditions générales qui sont à la base des événements de référence.
- Les caractéristiques intrinsèques des laves torrentielles qui sont liées aux événements de référence.
- Une listes des observations (nécessaires, mais pas suffisantes) et des calculs pouvant servir à la gestion en temps réel du bassin versant (gestion intégrée et gestion des risques résiduels).
- Une analyse prospective sur les phénomènes (éboulement, pergélisol, lac pro-glaciaire) pouvant changer les prédispositions du bassin versant à moyen et long terme (études complémentaires).
- Divers, particularités du bassin versant, etc.

Les tâches présentées représentent le cas d'une étude faite par une équipe optimale. Il se peut que dans des bassins versants simples, une équipe réduite puisse suffire. Dans le cas d'une équipe bien rodée, il est possible d'optimiser les tâches présentées à la figure 7-5.

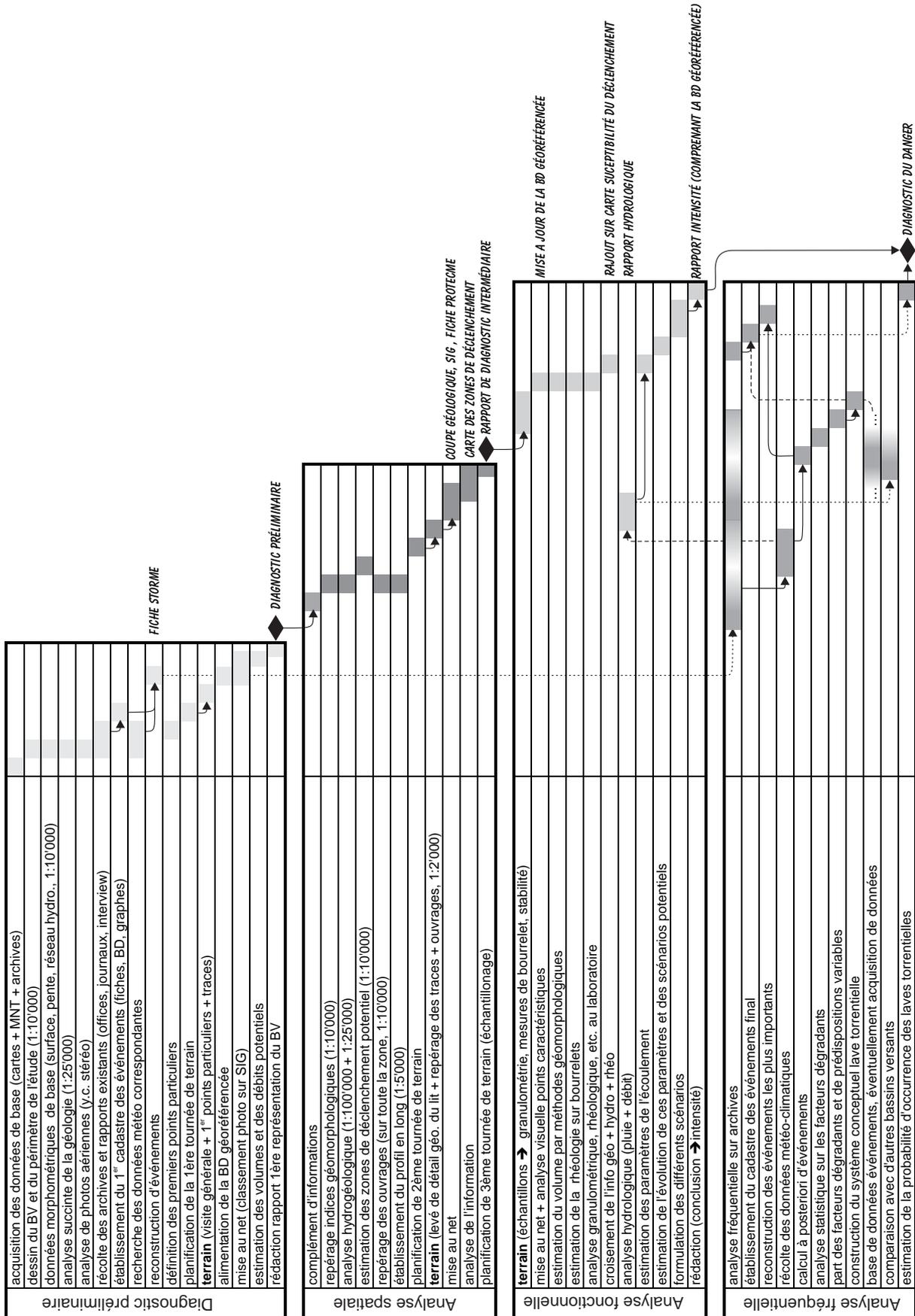


Figure 7-5: Méthodologie de diagnostic d'un bassin versant à laves torrentielles

7.7. Conclusion

En suivant les étapes définies dans ce chapitre (cf. figure 7-5), le praticien peut donner les informations nécessaires au responsable de la modélisation. La méthodologie établie assure la qualité de ces informations par rapport aux connaissances actuelles. Les divers documents (à droite et en gras sur la figure 7.4) permettent aussi une communication avec le MO tout au long de l'étude.

Cette méthodologie a été imaginée de façon dynamique et ce, en fonction de deux optiques. La première considère le système bassin versant comme étant en perpétuel changement (adaptation aux facteurs extérieurs, climat, géologie, processus sédimentaires, effets anthropiques, etc.). Des changements dans les prédispositions peuvent donc avoir lieu. L'établissement de points caractéristiques (cf. 7.3.4.3) et l'analyse prospective des phénomènes potentiels (cf. 7.6), le tout lié à un SIG, offrent la possibilité de gérer le bassin versant à long terme.

La seconde optique considère l'état de la connaissance actuelle qui va s'améliorer dans le futur. Lorsque de nouveaux outils apparaîtront, ils pourront être intégrés dans la méthodologie telle qu'elle est définie à la figure 7-2. Ceci implique une volonté permanente du praticien de suivre l'évolution des techniques concernées.

"La pratique sans la théorie est aveugle.
La théorie sans la pratique est impuissante"

E. Kant

Chapitre 8.

Conclusions

La partie introductive de ce travail a permis d'apporter une définition synthétique aux laves torrentielles. Les lacunes des définitions plus anciennes et les ambiguïtés provenant de la traduction du terme anglo-saxon ont ainsi pu être levées. Ainsi, les laves torrentielles apparaissent comme un mélange d'eau et de grains rocheux en mouvement dans le domaine subaérien. Elles peuvent s'écouler sur de grandes distances grâce à diverses formes de lubrification des contacts entre les grains les plus gros. L'apparence du mouvement à l'échelle macroscopique est cinématiquement monophasique.

Pour fixer les idées, les ordres de grandeur caractéristiques s'établissent : pour la masse volumique de ces mélanges autour de 2200 kg/m^3 (soit à des concentrations solides de plus de 70 % volume); et pour les vitesses d'écoulement à un maximum d'environ 20 m/s. La connaissance de ces valeurs est importante pour pouvoir distinguer les laves torrentielles d'autres phénomènes.

Des trois composantes des laves torrentielles (eau-fines-granulats), l'eau est sans doute la plus difficile à estimer de par sa dynamique transitoire, qui souvent ne permet de l'analyser que par des mesures indirectes. Le chapitre qui est consacré au lien entre l'eau et les laves torrentielles a permis de faire un inventaire des différentes sources d'eau possibles, soit : les précipitations; la fonte; l'eau souterraine.

Dans l'optique d'un diagnostic du bassin versant, seule l'apparition de l'eau sous forme de pluie a été prise en compte dans l'analyse de modèles de déclenchement. L'amélioration des données (précipitations et chroniques des laves torrentielles) est ici un préalable nécessaire à l'amélioration des outils de gestion et de prédiction du déclenchement. L'utilisation d'images radar est une piste prometteuse.

Les éléments en place du bassin versant offrent la possibilité d'établir un lien avec les laves torrentielles par des mesures plus directes. L'analyse de divers caractéristiques a permis d'élargir la panoplie d'outils disponibles pour le praticien.

Mais avant cela, la détermination de la surface moyenne des bassins versants sujets aux laves torrentielles, environ 1 km^2 , est un résultat important à prendre en compte. En effet, c'est à cette échelle que les données permettant de discriminer les zones de déclenchement potentielles devront être acquises.

Un des outils mis au point dans ce travail est l'indice d'érodibilité global du bassin versant. Il permet une mesure approximative, mais objective du degré de dangerosité d'un bassin versant.

Toujours dans le but d'établir des relations entre les éléments en place et les laves torrentielles, deux aspects ont été traités.

Tout d'abord un test des différentes formules d'estimation du volume probable a été fait. Ce test a permis de séparer ces formules en deux familles, celles des formules applicables dès le diagnostic préliminaire et celles nécessitant d'importants relevés de terrain qui ne peuvent être appliquées que dans le cadre du diagnostic final du danger. Une critique de l'emploi de ces formules a été faite. Cette critique facilitera le choix de l'une ou de l'autre formule pour le praticien.

Enfin l'analyse des divers paramètres géologiques du bassin versant n'a pas permis d'établir de relation avec les laves torrentielles. Les essais menés dans ce domaine ont toutefois permis de dégager un axe de recherche novateur dans la prise en compte de la géologie. Les développements futurs devraient aboutir à une analyse multicritère. Les critères à retenir devraient être la lithologie, la tectonique, l'altération et l'histoire holocène.

Suite à l'influence des diverses composantes des laves torrentielles sur le déclenchement, c'est leurs caractéristiques intrinsèques qui ont été investiguées. Une analyse bibliographique sur le déclenchement a permis de hiérarchiser les descriptions d'événements. Deux mécanismes de formation de laves torrentielles existent, la formation par érosion et la formation par liquéfaction d'une masse glissée. Ces deux mécanismes peuvent survenir selon diverses modalités et se combiner. Des expériences rudimentaires conduites dans le terrain ont permis de déclencher des laves torrentielles artificiellement. Ces essais ont permis de compléter certains autres travaux effectués dans ce domaine, principalement sur la partie initiale du mécanisme. Ils ont aussi permis d'affiner la détection des zones de déclenchement.

Afin de pouvoir donner un diagnostic complet, l'estimation des paramètres de l'écoulement a ensuite été abordée. Le diagnostic permettra d'identifier qu'elle est le meilleur modèle pour le problème posé. Cependant les éléments à fournir dans le diagnostic seront orientés par le choix du modèle qui sera finalement utilisés pour calculer la propagation des laves torrentielles. Dans ce travail une classification rhéophysique des écoulements a été choisie. Cette classification présente une bonne adéquation entre les observations de terrain et les possibilités des modèles (principalement dans le domaine viscoplastique). Une approche simplifiée a été mise au point, qui permet d'estimer le type de comportement rhéologique à partir de la courbe granulométrique.

Les travaux menés dans ce domaine ont permis plusieurs observations importantes concernant la rhéologie des pâtes minérales. Tout d'abord lors de la mise sur pied du plan d'expérience il est apparu qu'il fallait clairement distinguer les observations microstructurales (amélioration de nos connaissances de la rhéologie) des observations macroscopiques (utiles pour l'amélioration des capacités de l'ingénierie). Très vite, il est aussi apparu que le protocole de mélange devrait être standardisé et amélioré afin de permettre le test des matériaux à des teneurs en eau proches de leur limite de liquidité. Ce point est important car il permettrait une meilleure estimation des paramètres (limitation de l'extrapolation). Enfin, une analyse des effets d'échelle, par exemple par la voie des fractales, devrait être faite afin d'avoir une meilleure correspondance entre les essais en laboratoire et les déterminations sur le terrain.

L'utilisation des outils développés et testés aux points précédents a permis de rédiger la méthodologie de diagnostic présentée au chapitre 7. La mise en commun de ces outils et leur ordonnancement permet de répondre à la question : "comment prédire les caractéristiques d'une lave torrentielle à partir d'un minimum d'informations ?" Cependant, il ressort de cette méthodologie que le diagnostic ne peut être fait par une seule personne. Plusieurs spécialités sont requises pour assurer sa qualité : géologie, géomatique, géomorphologie, histoire, hydraulique, hydrogéologie, hydrologie, ingénierie, etc. Cet aspect interdisciplinaire a guidé la réalisation de cette thèse et la phrase mise en exergue de ce chapitre prend ici tout son sens.

9. Bibliographie

- Agostoni, S., Laffi, R.; Sciesa, E., 1997. Centri Abitati Instabili della Provincia di Sondrio, Università di Milano, Milano.
- Ahnert F., 1998. Introduction to Geomorphology. Arnold, London.
- Altinakar M., 2001. Communication personnelle
- Ancey C., Charlier C., 1996. Quelques réflexions autour d'une classification des avalanches. *Revue de géographie alpine*, 84 (1): 9-21.
- Ancey C., 1997. Rhéologie des écoulements granulaires en cisaillement simple; Application aux laves torrentielles granulaires, Mécanique, Ecole Centrale, Paris.
- Ancey C., 1999a. Note de synthèse sur la rhéologie des laves torrentielles, CEMAGREF.
- Ancey C., 1999b. Rhéologie des laves torentielles, rapport scientifique final PNRN 1998-99, CEMAGREF, Grenoble.
- Ancey C., 2001. Role of lubricated contacts in concentrated polydisperse suspensions. *Journal of Rheology* 45 (6): 1421-1439.
- Ancey C., Jorrot H., 2000. Yield stress for bimodal suspensions of beads witin a clay dispersion. accepté par *Journal of Fluid Mechanics*
- Ancey C., Richard D., Meunier M., 2001. Eléments d'hydraulique torrentielle pour l'ingénieur. In: *Géomécanique environnementale, risques naturels et patrimoine*. Sous la direction de P. Delage et B. Schrefler. Hermès Science Publication, Paris.
- Anson R.W.W., Hawkins A.B., 1998. The effect of calcium ions in pore water on the residual shear strength of kaolinite and sodium montmorillonite. *Géotechnique*, 48 (6): 787-800.
- Antoine P., Fabre D., 1980. *Géologie appliquée au génie civil*. Masson, Paris.
- Arattano M., Grattoni P., 2000. Using a fixed video camera to measure debris flow surface velocity. In: G.F. Wieczorek and N.D. Naeser (Editors), *2nd International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment*. Balkema, Taipei. pp.273-281
- Arattano M., Marchi L., 2000. Video-derived velocity distribution along a debris flow surge. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans, Atmosphere*, 25 (9): 781-784.
- Aviolat P., 2000. Communication personnelle
- Badoux H. et al., 1971. Atlas géologique de la Suisse, 1:25000, feuille 1305 D^t de Morcles. SHGN, Bern.

- Bagnold R.A., 1954. Experiment on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear, *Proceeding Royal Society. Proceedings of the Royal Society, Serie A*, 225: 49-63.
- Baize D., Girard M.C., Boulaine J., Cheverry C., Ruellan A., , 1995. Le référentiel pédologique français, Pourquoi un référentiel pédologique, CNRS.
- Bak P., 1997. *How Nature works*. Oxford University Press, Oxford.
- Banfill P.F.G., 1994. Rheological method for assessing the flow properties of mortar and related materials. *Constr. Build. Mat.*, 8: 43-50.
- Bardou E., 1995. Etat de la recherche sur les laves torrentielles en 1995. Séminaire de génie rural, inédit, EPFL, Lausanne.
- Bardou E., 1996. L'érosion au Viêt Nam. Travail de diplôme, inédit, EPFL, Lausanne
- Bardou E., 1999. Cartographie des laves torrentielles. Travail de diplôme postgrade, inédit, EPFL, Lausanne.
- Bardou E., Marquis F.-X., Niggli M.; Musy A., 2002. The role of snow in the generation of flood and solid transport in small alpine watershed, *International Conference on Flood Estimation*. Federal Office for Water and Geology and Hydrology Group of Berne University, Bern.
- Barnes H.A., 1999. The yield stress - a review - everything flows ? *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 84: 133-178.
- Barry R.G., 1992. *Mountain, weather and climate*. Routledge, Londres.
- Baumgartner M., Apfl G., 1994. Toward an integrated geographic analysis system with remote sensing, GIS, and consecutive modelling for snow cover monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 15 (n°7): 1507-1518.
- Beniawski Z.T., 1989. *Engineering rock mass classifications*. Jhon Wiley & Sons, New York.
- Bergeron T., 1960. Problem and methods of rainfall investigation. In: A.G. Union (Editor), *The physics of precipitation*, Washington.
- Bérod D., 1994. Contribution à l'estimation des crues rares à l'aide de méthode déterministes, Apport de la description géomorphique pour la simulation des processus d'écoulement. Thèse n°1319, EPFL, Lausanne.
- Besson L., 1996. *Les risques naturels en montagne, traitement, prévention, surveillance*. Artès-Publiaip, Grenoble.
- Beyer Portner, N.; Boillat, J.-L., 1999. Erosion in alpine watershed, Graz conference, IAHR, Graz.

- Bland W., Rolls D., 1998. Weathering. Arnold, Londres.
- Bianchetti G., Fracheboud S., 2001. Rainfall triggered landslide and debris flow, the Peilletes landslide, Switzerland, XXVI General Assembly of European Geophysical Society, Nice.
- Biancotti, A.; Motta, M., 2000. Response of Italian glaciers to climatic variations. In: A. Provenzale (Editor), 8th Grand Combin Summer School, Geomorphological fluid mechanics, S^t Oyen.
- Blijenberg H., 1998. Rolling Stone. Utrecht University, Utrecht.
- Bodin S., 1983. Very short-range forecasting - Observations, methods and systems. Planning Report n°38, WMO, Genève.
- Bonnard Ch., 2001. Communication personnelle
- Bonnard Ch., Noverraz F., 2001. Influence of climate change on large landslides : assessment of long term movements and trends. In: M. Kühne et al. (Editors), International Conference on Landslides, Causes, Impacts and Countermeasures. Verlag Glückauf Essen, Davos, pp. 121-138.
- Bonnet-Staub I., 1998. Mécanismes d'initiation des laves torrentielles dans les Alpes françaises, contribution à la maîtrise du risque. Thèse de l'École des Mines, Paris.
- Bonnet-Staub I., 2001. Une méthodologie d'analyse et de cartographie de l'aléa "initiation de laves torrentielles" - applications au torrent du Bragousse (France). Bulletin de Géologie Appliquée, 59: pp. 319-327.
- Bovier R., 2001. Communication personnelle
- Brassington, R., 1998. Field Hydrogeology. John Wiley, Chichester.
- Bravard J.-P., Petit F., 2000. Les cours d'eau. Géographie. Armand Colin, Paris.
- Browning K.A., Hill F.F., 1981. Orographic rain. Weather, 36: 326-329.
- Brunsdén D., 1979. Mass movement. In: C.E.J. Thornes (Editor), Process in geomorphology. Arnold, London. pp. 150-186.
- Burri M., Marro C., 1993. Atlas géologique de la Suisse, 1:25000, feuille 1345 Orsières. SHGN, Bern.
- Burrough, P.A.; McDonnell, R.A., 1998. Principles of geographical Information systems. Oxford University Press, Oxford.
- Caillère, S.; Hénin, S., 1963. Minéralogie des argiles. Masson, Paris.
- Caine N., 1980. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. Geografiska Annaler, 62A(1-2): 23-27.

- Cannon S.H., 2000. Debris-flow response of southern California watersheds burned by wildfire. In: G.F. Wiczeorek and N.D. Naeser (Editors), 2nd International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment. Balkema, Taipei. pp. 45-52.
- Capart H., 1999. Pli de l'onde de rupture de barrage sur lit de sédiment, Unité de génie civil, Université Catholique de Louvain, Louvain.
- Carey S.K., Woo M.-K., 2000. The role of soil pipes as a slope runoff mechanism, Subarctic Yukon, Canada. *Journal of Hydrology*, 233: 206-222.
- Carter C.E., Greer J.D., Braud H.J., Floyd J.M., 1974. Raindrop characteristics in south central United States. *Transactions of the ASAE*, 17: 1033-1037.
- Casson N., 1959. A flow equation for pigmented oil suspension of the printing ink type. In: Mill C.C. (Editor) *Rheology of dispersed systems*. Pergamon Press, New York pp. 84-104.
- Catalot-Martinent V., 1997. Etude de suspensions de ciment alumineux-eau; corrélations rhéologie-granularité-compacité, Ecole des Mines, Alès.
- Chen, C., 1987. Comprehensive review of debris flow modeling concept in Japan. Debris flow & avalanche : process recognition and mitigation, *Reviews in engineering geology*, VII: 13-27.
- Consuegra D., Niggli M., Musy A., 1998. Concepts méthodologiques pour le calcul des crues, Application au bassin versant supérieur du Rhône. *Wasser, Energie, Luft - eau, énergie, air*, 90(9/10): 223-231.
- Coussot P., 1993. Rhéologie des boues et laves torrentielles, Etude de dispersion et suspensions concentrées. série Etude n°5. CEMAGREF, Grenoble.
- Coussot P., 1996. Les laves torrentielles, Connaissance à l'usage du praticien. Cemagref, Grenoble.
- Coussot P., Ancy, C., 1999. Rhéophysique des pâtes et des suspensions. EDP Sciences, Les Ulis.
- Coussot P., 2000. Communication personnelle
- Coussot P., Raynaud J.S., Ancy C., 2002. Combined MRI-Rheometry determination of the behavior of mud suspensions. Soumis à *Journal of Geophysical Research*.
- Cruden D.M., Varnes D.J., 1996. Landslide types and processes. In: A.K. Turner & R.L. Schuster (Editor), *Landslides : investigation and mitigation*, special report 247. Transportation Research Board, Washington.
- D'Agostino V., 1996. Analisi quantitativa e qualitativa del trasporto solida torrentizio nei bacini montani del Trentino Orientale, I problemi dei grandi comprensori irrigui. Associazione Italiana di Ingegneria Agraria, Novara, pp. 111-123.

D'Agostino V., 2001. Communication personnelle

Davies T.R., 1988. Debris flow surge, a laboratory investigation. mitt. Nr 96 Thesis ETHZ, Zürich.

Delaloye, R., 2001. Communication personnelle

Delarze, R., Gonseth, Y.; Galland, P., 1999. Guides des milieux naturels de la Suisse. Delachaux & Niestlé, Lausanne.

Delannoy J.-J., Rovéra G., 1996. L'érosion dans les Alpes occidentales : contribution à un bilan des mesures et des méthodes. *Revue de géographie alpine*, 84(2): 87-101.

DHA, 1992. Glossaire international multilingue agréé de termes relatifs à la gestion des catastrophes. Département des affaires humanitaires, ONU, Genève.

Egli T., 1999. Richtlinie Objektschutz gegen Naturgefahren. Gebäudeversicherungsanstalt des Kantons St.Gallen, St Gallen.

Fleming R.W. et al., 1989. Transformation of dilative and contractive landslide debris into debris flows, an example from Marin county, California. *Engineering Geology*, 27: 201-223.

Fournier F., 2001. Dépôt de laves torrentielles dans le cône de l'Illgraben (VS). travail de diplôme UNIL, Lausanne.

Fowler A., 2000. A theory of drumlin formation. In: A. Provenzale (Editor), 8th Grand Combin Summer School, Geomorphological fluid mechanics, St Oyen.

Fracheboud S., 2000. Peillettes. diplôme postgrade en hydrogéologie Université de Neuchâtel.

Franzi L., 2001. Methodology to predict the debris volume associated to debris flow. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans, Atmosphere*, soumis.

Genevois R., Berti M., Ghirotti M., Simoni A.; Tecca P.R., 1999. Debris flow monitoring and analysis in the dolomitic region (Upper Boite valley, Italian Alps), UPD, Dip. di Geologia, Università di Padova, Padova.

Genevois R., Tecca P.R., Berti M. Simoni A., 2000. Pore pressure distribution in the initiation area of a granular debris flow. In: E. Bromehead et al. (Editors), *Landslides in research, theory and practice*. Thomas Telford, Cardiff, pp. 615-620.

Genolet F., 2002. Utilisation de la rhéologie pour mieux estimer les paramètres de l'équation de Voellmy-Perla. Application au cas des laves torrentielles, travail de diplôme postgrade, Laboratoire de recherche hydraulique, EPFL, Lausanne.

GHO 1982. Glossaire des termes hydrologiques avec définitions, Groupe de travail pour l'hydrologie appliquée, SHGN.

- GHO 1996. Empfehlung zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen, Teil I. SHGN, Berne.
- Giani G.P., 1992. Rock slope stability analysis. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Gilvear D.J., Bravard J.-P., 1993. Dynamique fluviale. In: C. Amoros and G.E. Petts (Editors), Hydrosystème fluviaux. Collection d'écologie. Masson.
- Gontscharov E.P., 1962. Sjels in Tadjikistan, 5th symposium on Sjels, Bakou, pp. 109-114.
- Goulpié P., Hertig J.A., 2000. Extreme precipitation over complex topography with a modified Navier Stokes solver. Implementation of a 3 phases microphysics parameterization. International Symposium on Flood Defense, Kassel reports of hydraulic Engineering N09, Kassel, pp.c79-c88
- Gravelius H., 1914. Flusskunde. G.J. Göschen'sche Verlagshandlung, Leipzig.
- Grebner D., 1994. Meteorologische Analyse des Umweters von Brig and Saas Almagell von 24 septembre 1993. Wasser, Energie, Luft - eau, énergie, air, 86 (1/2): 41-44.
- Grebner D., Aschwanden H., Steinegger U., Zimmermann M., 2000. Charakteristik des Hochwassers vom 9. bis 16. Oktober 2000. Wasser, Energie, Luft - eau, énergie, air, 92 (11/12): 369-377.
- Griffiths R.W., 2000. The Dynamics of Lava Flows. Annual Review of Fluid Mechanics, 2000: 477-518.
- Groupe CRUEX, 1997. Estimation des crues extrêmes en zone montagneuse, IATE/HYDRAM, EPFL, Lausanne.
- Groupe Français de Rhéologie, 1988. Dictionnaire de rhéologie. Institut de mécanique des fluide, Toulouse.
- Guzzetti F., Ceriani M., 1992. Debris flows triggered by the July 17-19 storm in the Valtellina area (Northern Italy). International Symposium Interpraevent, Bern, pp. 193-204.
- Haeberli W., 1975. Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass und Piz Grialetsch (Graubünden). mitt. Nr 17, VAW, Zürich.
- Haeberli W., Rickenmann D., Zimmermann M., 1991. Ursacheanalyse der Hochwasser 1987. Ergebnisse der Untersuchung. Mitt. Nr. 14, SHGN, Bern.
- Haeberli, W., Rickenmann D., Rössli U., Zimmermann M., 1992. Murgänge 1987, Dokumentation und Analyse. 97.6, VAW, Zürich.
- Hall A.J., Hall K., 1991. Thermal gradients and rock weathering at low temperatures : some simulation data. Permafrost and Periglacial Processes, 2: 103-112.

- Hampel R., 1980. Geschieberechnung für Gefahrenzonenpläne in Wildbachgebieten. International Symposium Interpraevent, Bad Ischl, pp. 83-91.
- Hantz, D., Vengeon, J.-M.; Dussauge, C., 2001. Approche historique, géomécanique et probabiliste de l'aléas éboulement rocheux, XV^{ème} Congrès Français de Mécanique, Nancy, pp. 1-6.
- Hartlieb A.; Bezzola G.R., 2000. Ein Überblick zur Schwemmh Holzproblematik. Wasser, Energie, Luft - eau, énergie, air, 92(1/2): 1-5.
- Hay A.E., 1987. Turbidity currents and submarine channel formation in Rupert inlet, British Columbia. The role of continuous and surge type flow. Journal of Geophysical Research, 92: 2883-2900.
- Hegg Ch., 1992. Mobilisierungsrates und Lieferunsfaktor. In: H.W. Kienholz H. (Editor), Geographische Informationssysteme in der Geomorphologie. Geographica Bernensia, Bern.
- Hegg C., Badoux A., Graf Ch.; Röthlisberger G., 2000. Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1999. Wasser, Energie, Luft - eau, énergie, air, 92(1/2): 59-68.
- Hoek E., Bray J.W., 1981. Rock slope engineering. E&FN Spon, revised third edition, London.
- Huang P.Y., Feng J., Hu H.H., Joseph D.D., 1997. Direct simulation of the motion of solid particles in Couette and Poiseuille flows of viscoelastic fluids. Journal of Fluid Mechanics, 343: 73-94.
- Hudson N.W., 1965. The influence of rainfall mechanics on soil erosion, thèse Cape Town University.
- Hudson N.W., 1993. Field measurement of soil erosion and runoff; FAO soil bulletin 68. FAO, Ampthill.
- Hudson N.W., 1995. Soil Conservation. Batsford, 3rd ed, London.
- Hugon F., 2000. Conception et élaboration d'un SIRS "gestion des dangers naturels". Application au cas des laves torrentielles de l'Illgraben (Valais). travail de diplôme, Institut de géomatique, EPFL, Lausanne.
- Hungr O., Morgan G.C., Kellerhals R., 1984. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. Canadian Geotechnical Journal, 21: 663-677.
- Hungr, O., Morgan G.C., Van Dine D.F., 1987. Debris flow defenses in british Columbia. Debris flow & avalanche : process recognition and mitigation, Reviews in engineering geology, VII: 201-221.
- Hungr O., 1995. A model for runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. Canadian Geotechnical Journal, 32: 610-623.

Innes J.L., 1987. Debris flows. *Progress in Physical Geography*, 7: 469-501.

Jaquet, J.-M., Schoeneich, P., Collet, C., Spicher, M.; Lateltin, O., 2000. Analyse semi-automatisée de l'imagerie aérienne et de détection des glissements de terrain : possibilités et limites, OFEG, Bern.

Jan C.D., Wang Y.Y., Han W.L., 2000. Resistance reduction of debris flow due to air entrainment. In: G.F. Wieczorek and N.D. Naeser (Editors), 2nd International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment. Balkema, Taipei.

Jaton J.-F., Musy A., Regamey P., 1978. Méthode de prédétermination des débits de ruissellement basée sur l'état de saturation antérieur du bassin, Communication à l'OCDE, Publication IGR No 142, Lausanne.

Jeanneret F., 1999. Alpes d'Europe et de Nouvelle-Zélande - une géographies comparatives des paysages, Université de Berne, Bern.

Johnson A.M., Rodine J.D., 1984. Debris flow. In: D. Brundsen and D.B. Prior (Editors), *Slope Instability*. Wiley, New York.

Johnson K.A.; Sitar N., 1990. Hydrologic conditions leading to debris flow initiation. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(6): 789-801.

Johnson P.A., McCuen R.H., 1996. Mud and debris flows. In: V.P. Singh (Editor), *Hydrology of disaster*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, pp. 161-181.

Julien P.Y., 1998. *Erosion and sedimentation*. Cambridge University Press, Cambridge.

Kawabe T., 1999. communication personnelle

Khegai A.Y., Popov N.V., Plekhanov P.A., Keremkulov V.A. 1999. Experiments at Chelgan Debris flow testing ground, Kazakhstan. In: K. Sassa (Editor), *Landslides of the worlds*. Japan Landslides Society, Kyoto, pp. 277-279.

Kienholz H., Keller H.M., Ammann W., Weingartner R., Germann P.F., Hegg C., Mani P., Rickenmann D., 1998. Zur Sensitivität von Wildbachsystemen. vdf ETH, Zurich.

Kienholz H., Krummenacher B., 1995. Légende modulable pour la cartographie des phénomènes, OFEE.

Klubertanz G., 1999. Zur Hydromechanischen Kopplung in Dreiphasigen Porösen Medien, thèse EPFL, Lausanne.

Klubertanz G., Laloui L.; Vulliet L., 2000. Parameters governing debris flow initiation. In: G.F. Wieczorek and N.D. Naeser (Editors), 2nd International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment. Balkema, Taipei.

Kohler P., 1998. *Prévoir le temps*. Minerva, Genève.

- Kölla E., 1986. Zur Abschätzung von Hochwassern in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessungen. mitt. Nr. 87 Thesis, ETHZ, Zürich.
- Körner C., 1999. Alpine plant life. Springer, Berlin.
- Koulinski V., 1993. Etude de la formation d'un lit torrentiel par confrontation d'essais sur modèle réduit et d'observation de terrain; série Etude n°15. CEMAGREF, Grenoble.
- Koulinski V., 2001. Le Cristillan à Ceillac. In: Université européenne d'été, session risques torrentiels. Pôle Grenoblois d'Etudes et de Recherche sur la Prévention des Risques Naturels, Briançon.
- Kravogel A., 1988. Vorläufige Analyse der Hochwasserereignisse des Jahres 1987. Österreicher Wasserwirtschaft, 40(5/6): 152-156.
- Kronfellner-Kraus G., 1984. Extreme Festofffrachten und Grabenbildungen von Wildbächen, INTERPRAEVENT. VHB, Villach, pp. 109-118.
- Lang H.-J., Schädler B.; Davidson G., 1977. Hydroglaciological investigations on the Ewigschneefeld glacier. Zeitschrift für Gletscherkd. Glazialgeologie, 12: 109-124.
- Latulippe C., Peiry J.-L., 1996. Essai de hiérarchisation des zones de production de matière en suspension dans le bassin-versant d'un grand cours d'eau : l'Isère en amont de Grenoble. Revue de géographie alpine, 84(2): 29-44.
- Lateltin O., Beer C., Raetzo H., Caron C., 1998. Instabilités de pente en terrain de flysch et changements climatiques. Changement climatique et catastrophes naturelles (PNR 31). VDF, Zürich.
- Lechallas, 1884. Hydraulique torrentielle, Paris.
- Lehmann Ch., 1993. Zur Abschätzung der Festofffracht in Wildbächen. Geographica Bernensia, Berne.
- Lemaitre J., 2000. Powders in practice. In: P. Bowen (Editor), Powder characterisation. LTP, Lausanne.
- Lin, C.W., Wu M.C., Shieh C.L., Shieh Y.C., 2000. Influence of geology on debris flows : examples from Hsin-Yi, Nantou county, Taiwan. In: G.F. Wiczorek and N.D. Naeser (Editors), 2nd International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment. Balkema, Taipei. pp. 169-176
- 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.
- Loat R., Petraschek A., 1997. Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire, OFEE, OFAT, OFEFP.
- McBride M.B., 1994. Environmental Chemistry of Soils. Oxford University Press, Oxford.

- Mc Clay K., 1997. The Mapping of geological structure. John Wiley, Chichester.
- Major J.J.; Pierson T.C., 1992. Debris flow rheology : experimental analysis of fine-grained slurries. *Water Resources Res.*, 28(3): 841-857.
- Mani P., 2000. Schneeschmelz- und Abflussprognose für das Berner Oberland im Frühling 1999. *Wasser, Energie, Luft - eau, énergie, air*, 92(1/2): 69-72.
- Månson J.-A., Luciani A., Servais C., 1999. Rhéologie, support de cours, LTC-EPFL, Lausanne
- Mansoutre S., 2000. Des suspensions concentrées aux milieux granulaires lubrifiés. Etude des pâte de silicate tricalcique., Centre de recherche sur la matière divisée, Orléans, Orléans.
- Marchi L., Tecca P.R., 1996. Magnitudo delle colate detritiche nelle Alpi Orientale Italiane. *Geingegneria Ambientale e Mineraria*, 33(2-3): 79-86.
- Marchi L., Brochot S., 2000. Les cônes de déjection torrentiels dans les Alpes françaises; morphométrie et procesus de tranbsport solide torrentiel. *Revue de géographie alpine*, 88(3): 23-38.
- Marquis F.-X., 2001. Essai de détermination des conditions météorologiques et géologiques prépondérantes dans le déclenchement des laves torrentielles sur le versant droit du val Ferret. Diplôme postgrade en hydrologie, EPFL, Lausanne.
- Marquis F.-X., Tissières P., 2001. Torrents de la commune de Fully : carte de danger. rapport provisoire n°6.70, Bureau d'ingénieur Pascal Tissière, Martigny.
- Martinec J., 1975. Snowmelt Runoff Model for stream flow forecasts. *Nordic Hydrology*, 6(3): 145-154.
- Mayoraz R., 2000. Communication personnelle
- Melton M.A., 1965. The geomorphic and paleoclimatic signifiante of alluvial deposits in southern Arizona. *Journal of Geology*, 73: 1-38.
- Meunier M., 1991. Eléments d'Hydraulique torrentielle. CEMAGREF, Grenoble.
- Meylan P., AIC S.A., 1996. Etude hydrologique de la Combe du Pissot, Service des eaux et de la protection de l'environnement, Lausanne.
- Middelton G.V., Hampton M.A., 1976. Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity flows. In: D.J. Stanley and J.P. Swift (Editors), *Marine sediment transport and environmental management*. Wiley, New York.
- Montandon F., 1926. Les coulées du Saint-Barthélémy (Suisse). *Le Globe, organe de la Société de Géographie de Genève*, tome LXV: 265-271.
- Moore R., 1991. The chemical and mineralogical controls upon the residual strength of pure and natural clays. *Géotechnique*, 41(1): 35-47.

- Morgan R.P.C., 1996. Soil erosion & conservation. 2nd ed., Longman, Harlow.
- Mougin P.-L., 1914. Les torrents de Savoie. Imprimerie Générale, Grenoble.
- Munter W., 1998. 3 x 3 und Reduktionsmethode. Deutsche Alpen Verein.
- Musy A., 1993. Hydrologie générale. EPFL, Lausanne.
- Musy A., Higy, C., 1999. Hydrologie appliquée. EPFL, Lausanne.
- Nguyen Q.D., Boger D.V., 1992. Measuring the flow properties of yield stress fluids. Annual Review of Fluid Mechanics, 24: 47-88.
- Noverraz, F., 1999. Identification des phénomènes et cartographie. Mouvement de terrain et carte de danger, cours du Schwarzsee, SHGN.
- Noverraz F., Bonnard Ch., 1999. Large landslide movements and climate change: A long-term hazard assessment of possible disasters in Switzerland, IDNDR Symposium on Mitigation of Water- related disasters, Nagoya, pp. 143-155.
- Oberlin G., Hubert P., 1998. Refondation du concept de régime hydrologique, CEMAGREF, Lyon.
- OFF-ENA, 1984. Directives pour la prise en considération du danger d'avalanches lors de l'exercice d'activités touchant l'organisation du territoire. OCFIM, Bern.
- Pardé M., 1933. Fleuves et rivières. Colin, Paris.
- Parker G., 2000. River morphodynamics, Summer School on Geomorphological Fluid Mechanics.
- Perrin J.-L., Fourcade B., Poulenard J., Richard D., Sierra A., 2000. Quito face à un risque d'origine naturelle : les laves torrentielles. Revue de géographie alpine(2): 53-68.
- Petraschek A., 2000. communication personnelle
- Pierson T.C., Costa J.E., 1987. A Rheologic classification of subaerial debris sediments-water flow. In: G.F. Wieczorek and J.E. Costa (Editors), Debris flow & avalanche : process recognition and mitigation, Reviews in engineering geology. Geological Society of America, Boulder, pp. 1-12.
- PLANAT, 2000. Recommandations relatives à l'assurance-qualité dans l'évaluation des dangers. Série PLANAT n°2, Bern.
- Remaître A., 2000. Détermination des zones d'initiation et de contribution des laves torrentielles dans les bassins marneux : applications au bassin de Barcelonnette. Mémoire de DEA : Systèmes spatiaux et environnement Thesis, Louis Pasteur, Strasbourg.

- Reid M.E., LaHusen R.G.; Iverson R.M., 1997. Debris flow initiation experiments using diverse hydrologic triggers. In: C.-I. Chen (Editor), 1st International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment. ASCE, San Francisco, pp. 44-53.
- Renard K.G., 1993. RUSLE user's guide version 1.03. Soil and water conservation society, Ankeny, Iowa.
- Rickenmann D., 1997a. Schwemmh Holz und Hochwasser. Wasser, Energie, Luft - eau, énergie, air, 89(5/6) pp. 115-119.
- Rickenmann D., 1997b. Méthodes empiriques pour l'estimation des laves torrentielles. In: Université Européenne d'Eté, session risques torrentielles, Pôle Grenoblois d'Etudes et de Recherche sur la Prévention des Risques Naturels, St-Niklaus.
- Rickenmann D., Koch T., 1997. Comparaison of debris flow modelling approaches. In: C.-I. Chen (Editor), 1st International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment. ASCE, San Francisco. pp 576-585
- Rickenmann D., 2001a. Murgänge in den Alpen und Methoden zur Gefahrenbeurteilung, Internationale Wasserbau-Symposium, Aachen.
- Rickenmann D., Hürlimann M., Graf Ch., Näf D., Weber D., 2001b. Murgang-Beobachtungsstationen in der Schweiz. Wasser, Energie, Luft - eau, énergie, air. 93 (1/2) pp. 1-8.
- Röthlisberger G., 1989. Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1988. Wasser, Energie, Luft - eau, énergie, air, 81 (1/2/3): 17-24.
- Röthlisberger G., 1991. Chronik der Unwetterschäden in der Schweiz. Rapport WSL n° 330, Birmensdorf
- Röthlisberger G., 1998. Unwetterschäden in der Schweiz. Rapport WSL n° 346, Birmensdorf.
- Röthlisberger G., 1999. Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1998. Wasser, Energie, Luft - eau, énergie, air, 91(1/2): 17-23.
- Sartori M., 2001. Communication personnelle
- Sassa K., 1999. Geotechnical classification of landslides. In: K. Sassa (Editor), Landslides of the worlds. Japan Landslides Society, Kyoto, pp. 277-279.
- Schroeter H.O., Whiteley H.R., 1987. Application of a snow accumulation - ablation model for areal distribution of shallow ephemeral snow packs, 44th Annual Meeting of Eastern Snow Conference, Fredericton, New Brunswick, pp. 129-143.
- Schumm S.A., 1956. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. Bulletin of the Geological Society of America, 67: 597-646.

- Schumm S.A., 1977. Geomorphic concept and Drainage bassin area; The Fluvial system, John Wiley.
- Salles C., Poesen J., 2000. Rain properties controlling soil splash detachment. *Hydrological Processes*, 14: 271-282.
- Selby M.J., 1993. Hillslope materials and processes. Oxford University Press, Oxford.
- Sevruk B., 1985. Schneeanteil am Monatsniederschlag. In: B. Sevruk (Editor), *Beitrage zur Geologie der Schweiz - Hydrologie n°31*. Kümmerly & Frey, Bern, pp. 127-137.
- Skempton A.W.; Hutchinson J.N., 1969. Stability of natural slopes and embankement foundations, International conference on soil mechanics and foundation engineering. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Mexico.
- SIA, 1999. Norme SIA V104/2-5 Aide à l'établissement des soumissions et des appels d'offre dans le domaine de la forêt et des dangers naturels.
- Singh P., Kumar N.; Arora M., 2000. Degree-day factors for snow and ice for Dokriani Glacier, Garhwal Himalyas. *Journal of Hydrology*, 235: 1-11.
- Singh V.P., 1995. Computer Models of Watershed Hydrology. Water resources Publications, Highlands Ranch.
- Sitar N., 1994. Initiation of rainfall-induced debris flows. In: Sociedad Ecuatoriana de mecanica de suelos y rocas (Editor), *First Panamerican symposium on landslides*, Gayaquil, pp. 23-35.
- Smart G.M.; Jäggi M., 1983. Sedimenttransport in steilen Gerinnen. *Sediment Transport on steep slope*. Mitt. Nr. 64, VAW, Zürich.
- Spreafico M., Lehmann Ch., Naef O., 1996. Empfehlung zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wilbächen. Mitt. Nr. 4, GHO, Bern.
- Starkel L., 1976. The role of extreme (catastrophic) meteorological events in contemporary evolution of slopes. In: Derbyshire E. (Editor), *Geomorphology & climate*. John Wiley, London, pp. 203-245.
- Steck A., Bigioggero, B., Dal Piaz G.V., Escher A., Martinotti G., Masson H., 1999. Carte tectonique des Alpes de Suisse occidentales et des régions avoisinantes, échelle 1 : 100'000, SHGN.
- Steffe J.F., 1996. Rheological methods in food process engineering. Freeman Press, East Lansing, Michigan.
- Stiny J., 1929. Technische Gesteinkunde. 2 ed., Wien.
- Strunk H., 1995. Dendromorphologische Methoden zur Ermittlung der Murfrequenz und Beispiele ihrer Anwendung. S. Roderer, Regensburg.

- Suthren R.J., 1999. *Volcano Hazards*, Oxford Brookes University.
- Takahashi T., 1981. Estimation of potential debris flows and their hazardous zones; soft countermeasures for a disaster. *Journal of Natural disaster Science*, 3(1): 57-89.
- Takahashi T., 1991. *Debris Flow*, IAHR monograph serie. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Takei A., 1984. Interdependance of sediment budget between individual torrents and river-stream, INTERPRAEVENT. VHB, Villach, pp. 35-48.
- Teysseire P., Springmann S., 2000. Water retention in a steep moraine slope during periods of heavy rain. In: T. Rahardjo, Leong (Editor), *Unsaturated soils for Asia*. Balkema, Rotterdam, pp. 831-836.
- Tognacca C., 1998. *Murgang Entstehung*. mitt. Nr. 164 Thesis, VAW, ETHZ, Zürich.
- Tonanzi P., Troisi C., 1996. *Gli eventi alluvionali del settembre-ottobre 1993 in Piemonte*. Regione Piemonte, Torino.
- US Army Corps of Engineer, 1998. *Runoff from Snowmelt*, USACE, Washington.
- Van Dine D.F., 1985. Debris flow and debris torrents in the Southern Canadian Cordillera. *Canadian Geotechnical Journal*, 22: pp. 44-66.
- Van Steijn H., 1996. Debris flow magnitude-frequency relationships for mountainous regions of Central and Northwest Europe. *Geomorphology*(15): pp. 259-273.
- Varnes D.J., 1978. Slope movement types and processes. In: R.L.S.R.J. Krizek (Editor), *Landslides : analysis and control*, special report 29. Transportation Research Board, Washington.
- Vulliet L., 1986, *Modélisation des pentes naturelles en mouvement*. Thèse EPFL, Lausanne
- Vullet L., 1999, *Modelling creeping slope*, *Rivista italiana di Geotechnica*, (33): pp. 71-76
- Vulliet L., 2001. *Instabilité des massifs de sol*. In: P. Delage & B. Schrefler (ed.), *Géomécanique environnementale, risques naturels et patrimoine*. Hermès Science Publication, Paris.
- Wang L.; Shao S., 2000. Prediction methode of debris flows. In: F. Zollinger and G. Fiebiger (Editors), INTERPRAEVENT, Villach, pp. 335-343.
- Watanabe M., 1996. *Mudflows*. Departement des affaires humanitaires, ONU, Genève.
- Wischmeier W.H., 1976. *Use and misuse of USLE*. Soil and water conservation society, Ankeny, Iowa.
- Yoshino M.M., 1975. *Climate in a small area : an introduction to local meteorology*. University of Tokyo Press, Tokyo.

- Zanchi C., Torri D., 1980. Evaluation of rainfall energy in central Italy. In: M. De Boodt and D. Gabriels (Editors), Assessment of erosion. Wiley, Toronto.
- Zeller J., 1985. Feststoffmessung in kleinen Gebirgseinzugsgebieten. Wasser, Energie, Luft - eau, énergie, air, 77(7/8): 246-251.
- Zimmermann M., 1989. Geschiebeaufkommen und Geschiebemanagement. Grundlagen zur Abschätzung des Geschiebehaushaltes im Emmental, Thèse Universität Bern, Bern.
- Zimmermann M., Mani P., 1990. Zum Geschiebehaushalt im Mattertal, Grundlagen für die Geschiebemanagement und für das Erkennen von Problemstellen. GEO 7, Bern.
- Zimmermann M., Mani P., Gamma P., 1997. Murganggefahr und Klimaänderung - ein GIS-basiert Ansatz. vdf, Hochschulverlag AG, Zürich.
- Zimmermann M., Lehmann Ch., 1999. Geschiebefracht in Wildbächen: Grundlagen und Schätzverfahren. Wasser, Energie, Luft - eau, énergie, air, 91(7/8): 189-194.
- Zimmermann M., 2000. Geomorphologische Analyse des Illgraben, GEO 7, Bern.

