

Christophe Ancey

Une introduction à la Dynamique des Avalanches
et des Écoulements Torrentiels



École Polytechnique Fédérale de Lausanne

Lausanne (Faculté Environnement Naturel, Architectural, et Construit)

Prof. C. ANCEY,
EPFL, ENAC/ICARE/LHE,
Ecublens, CH-1015 Lausanne, Suisse
christophe.ancey@epfl.ch, lhe.epfl.ch

Première de couverture : crédit photographique Schnee- und Lawinenforschung, Davos

Une introduction à la dynamique des avalanches et des écoulements torrentiels / C. Ancey

Ce travail est soumis aux droits d'auteurs. Tous les droits sont réservés ; toute copie, partielle ou complète, doit faire l'objet d'une autorisation de l'auteur.

La gestion typographique du français a été réalisée à l'aide du package *french.sty* de Bernard GAULLE.

Table des matières

1	Un tour d’horizon	1
1.1	Objectif du cours	1
1.2	L’importance de la période de retour	1
1.2.1	La relation intensité/fréquence	1
1.2.2	Le risque accepté	2
1.2.3	Prévision et prédiction	2
1.3	Risques naturels : un risque quotidien ?	4
1.4	Aléa, vulnérabilité, et risque	5
1.5	Cartographie des phénomènes et fond topographique	8
1.6	Modélisation physique des écoulements à forte pente	9
2	Dynamique des avalanches	11
2.1	Pourquoi étudier les avalanches ?	11
2.1.1	Dommages causés par les avalanches	11
2.1.2	Acteurs et actions de l’ingénierie paravalanche	19
2.1.3	Le génie paravalanche aujourd’hui	21
2.1.4	Les missions	21
2.2	Typologie des avalanches	22
2.3	Les données utilisables dans les études	28
2.4	Codes et outils de calcul	30
2.4.1	Méthodes statistiques	32
2.4.2	Méthodes déterministes	33
3	Hydraulique torrentielle	35
3.1	Les spécificités de l’hydraulique torrentielle	35
3.2	Problèmes posés en hydraulique torrentielle	37
3.2.1	Problématique de la protection torrentielle	37
3.2.2	Les stratégies de protection	37
3.3	Typologie des écoulements torrentiels	41
3.3.1	Le système torrentiel	41
3.4	Les laves torrentielles	44
3.4.1	Classification des phénomènes	44
3.4.2	Étude au laboratoire	52
3.5	Le transport solide par charriage	54
3.5.1	Mise en mouvement	54
3.5.2	Tri granulométrique, structure du lit, et pavage	55

3.5.3	Calcul hydraulique	56
3.5.4	Simulation sur modèles réduits	57
	Bibliographie	59

Chapitre 1

Un tour d'horizon

1.1 Objectif du cours

L'objectif de cet ouvrage est de présenter une introduction à la dynamique des phénomènes gravitaires tels que les avalanches et les écoulements torrentiels. L'accent est mis sur :

- l'identification des phénomènes ;
- la recherche de la relation intensité/fréquence ;
- l'établissement d'un zonage.

1.2 L'importance de la période de retour

1.2.1 La relation intensité/fréquence

Caractériser un phénomène qui montre une très grande variabilité de ses propriétés reste une tâche très difficile. Scientifiquement, cela nécessite de passer par une détermination de la relation entre intensité et fréquence du phénomène. Plus un phénomène est extrême dans ses caractéristiques, plus il est rare. C'est ce constat de bon sens que l'on cherche à traduire mathématiquement. Pour cela on introduit la notion très importante de *période de retour* d'un phénomène : pour un phénomène caractérisé par une intensité donnée, la période de retour T est la durée *moyenne* entre deux événements similaires. Dit autrement, un événement de période de retour T a en moyenne une probabilité $1/T$ de se produire chaque année. Ainsi l'avalanche centennale¹ sur un couloir donné est :

- une avalanche qui se produit en moyenne tous les cent ans ;
- il y a en moyenne chaque année une probabilité de 1 % qu'une avalanche centennale ou plus rare se produise.

La notion de période de retour est encore mal comprise. L'avalanche ou la lave torrentielle apparaît très souvent comme un tout, sans véritable gradation dans son intensité. Cette vision très monolithique de l'aléa en montagne a des répercussions importantes, parfois fâcheuses. Elle peut ainsi être un raccourci dangereux à la question de savoir si un secteur donné est soumis à un risque. Puisque le phénomène serait un tout, la réponse donnée obéit le plus souvent à une logique du tout ou rien : oui tel endroit est soumis au risque ou non il ne l'est pas [6]. Il est donc essentiel de bien traduire cette notion de relation intensité/fréquence dès lors que l'on s'intéresse au calcul des risques associés aux avalanches et crues torrentielles.

1. L'adjectif numéraire traduisant une idée de fréquence se termine toujours en al/-ale. Un phénomène centenaire est un phénomène dont l'âge est de 100 ans, alors qu'un phénomène centennal est un phénomène qui se produit tous les cent ans en moyenne.

Tableau 1.1 *Risque accepté selon la nature de l'enjeu.*

Nature de l'enjeu	Risque accepté R	Période de retour T
Remontée mécanique	$< 3 \%$	$T \leq 30$ ans
Habitation permanente	$< 1 - 3 \%$	$T \leq 30 - 100$ ans
Grandes retenues ^a	$< 0,1 - 0,01 \%$	$T \leq 1000 - 10^4$ ans

^aSelon la jurisprudence actuelle, il s'agit des barrages intéressant la sécurité publique.

Cette nécessité amène à se poser deux questions :

1. Comment fait-on en pratique pour calculer une relation intensité/ fréquence? Techniquement cela implique que l'on soit en mesure de calculer, d'une part, la probabilité qu'un événement se produise et, d'autre part, les caractéristiques physiques de cet événement. Statistique, calcul des probabilités, et physique sont donc des domaines scientifiques qui sont nécessaires pour répondre à cette question.
2. Qu'est-ce qu'en pratique cela implique pour les aménagements? Pour un aménagement (tel qu'une habitation, une route, ou une remontée mécanique) construit dans une zone à risque, la question est de savoir quel degré de risque le maître d'ouvrage ou la société est prêt à accepter. Par exemple :
 - Si plusieurs fois par décennie, une remontée mécanique est touchée par des avalanches, avec des dommages sur les pylônes, le maître d'ouvrage peut légitimement se poser la question de continuer à exploiter cette remontée ; pour une remontée mécanique stratégique, par exemple desservant le front de neige d'une station de ski, les maîtres d'ouvrage souhaitent le plus souvent disposer d'une sécurité maximale, c'est-à-dire qu'en pratique ils ne veulent pas qu'une avalanche puisse endommager un pylône pendant la durée de vie de l'appareil.
 - Pour des habitations permanentes, la réglementation suisse exige qu'une zone soit constructible ou habitable sous la condition que les risques soient peu fréquents (période de retour supérieure à 30–100 ans) et peu intenses (l'habitation doit pouvoir résister).

1.2.2 Le risque accepté

Le tableau 1.1 donne quelques repères sur les valeurs de risque accepté en Suisse (et plus généralement en Europe) actuellement. Le risque accepté R est l'expression du taux moyen annuel d'un dommage ; on peut lui associer une période de retour de référence $T = 1/R$ qui est la période de retour minimale du phénomène auquel l'aménagement doit pouvoir résister.

1.2.3 Prévision et prédiction

Dès l'introduction de l'objectif du cours nous avons vu que le calcul des probabilités est nécessaire à formaliser mathématiquement un certain nombre de notions qui sont utiles en ingénierie des risques naturels. Les notions de *risque accepté* ou de *période de retour* nécessitent d'être explicitées clairement pour qu'elles soient réellement utilisables.

Cela peut donner lieu à une série de petits problèmes amusants, mais ils sont essentiels à comprendre car certains résultats peuvent sembler paradoxaux et donc générer une mauvaise compréhension. Par exemple, si l'on considère que la durée de vie typique d'une remontée mécanique est de 30 ans, quelle est la probabilité que l'exploitant puisse utiliser cette remontée sans jamais être confronté à un problème d'avalanche? L'exploitant souhaiterait qu'il n'y ait pas d'impact d'avalanche sur la durée de vie de l'appareil ; cela veut dire qu'en moyenne, la durée de retour d'une avalanche au niveau de la remontée mécanique doit dépasser 30 ans ou, dit autrement, il y a chaque année un risque égal à $1/30$ que la remontée soit touchée. Et au bout de trente ans? Le problème est en fait analogue au problème de Bernoulli ou du tirage d'urne : on possède une urne contenant majoritairement des boules blanches et une tout petite fraction p de boules noires. La loi binômiale nous enseigne que la probabilité P de

trouver k boules noires quand on a effectué n tirages est : $P(k) = C_n^k p^k (1-p)^{n-k}$. On a ici $p = 1/30$; en admettant pour simplifier qu'il n'y a qu'une avalanche par an, on en déduit que la probabilité qu'il n'y ait pas d'impact est de $P(0) = 36,2 \%$, un seul impact $P(1) = 37,4 \%$, deux impacts $P(2) = 18,7 \%$, etc. On le voit ici, la période de retour peut générer deux fausses convictions :

- si on positionne la remontée mécanique pour échapper à une avalanche trentennale (ou plus rare), celle-ci est totalement protégée pendant sa durée de vie ;
- le phénomène trentennal ne se produit qu'une fois tous les trente ans.

La première assertion est fautive dans l'absolu ; le calcul des probabilités nous dit que pour un tel positionnement, il n'y a qu'environ 36 % de chances que cela soit effectivement le cas. La seconde affirmation est également inexacte dans la mesure où il faudrait rajouter « en moyenne tous les trente ans ». On peut alors se demander, de manière inverse, quelle doit être la période de retour de l'avalanche pour que l'exploitant soit sûr à 99 % que la remontée mécanique soit hors de portée des avalanches pendant toute son existence. Le calcul donne une estimation de $T \approx 3000$ ans ! Comme on le voit sur cet exemple, le qualificatif « en moyenne » a toute son importance dans la caractérisation de la période de retour.

Le calcul des probabilités nous offre d'autres perspectives. Nous nous intéresserons aux problèmes de la prédiction du futur sur la base de ce que l'on connaît du passé. Par exemple, si l'on connaît les chutes de neige qui sont tombées sur une région donnée durant les dernières années, on peut chercher à prédéterminer les chutes de neige dans le futur. Il ne s'agit ici pas d'une prévision au sens météorologique puisque l'on ne vise pas à caractériser les conditions météorologiques dans le très court terme. Au contraire on cherche à établir un tableau de ce qui peut se passer, dégager des tendances moyennes et évaluer le risque de phénomènes extrêmes.

1.3 Risques naturels : un risque quotidien ?

Quel est le risque au quotidien représenté par les risques naturels tels qu'avalanche et crue torrentielle? Examinons quelques statistiques (voir tableaux 1.2–1.4).

Risque mineur en termes de dommages à l'échelle d'un pays, les avalanches et les crues torrentielles représentent une contrainte certaine pour les vallées alpines dès lors qu'on souhaite assurer [21] :

- la sécurité des personnes dans les habitations ;
- la mobilité des personnes et des biens par la route et le rail ;
- le développement des activités touristiques.

Sur l'ensemble de l'arc alpin ce sont quelque onze millions de personnes qui vivent de manière permanente. Durant la saison hivernale, ce nombre est plus que doublé. Le trafic automobile ne cesse d'y croître : 150 millions de personnes franchissent chaque année les Alpes. Pour garantir la plus grande sécurité possible, les autorités publiques ont largement promu des politiques de prévention du risque. L'un des piliers de cette politique est la cartographie : carte informative (cadastre des avalanches, CLPA), carte d'aléa, carte de risque.

Tableau 1.2 *Comparaison entre le taux de mortalité par avalanche et les taux de mortalité liés à d'autres risques naturels (a), à des accidents de la vie quotidienne (b), et à une pratique d'une activité sportive (c) : nombre de victimes en moyenne par an pour 1 million d'habitants (a, b) ou de pratiquants (c). Valeurs pour les pays occidentaux sur la période 1980–2000. Sources diverses (dont [24]).*

<i>Nature</i>	<i>Taux</i>
<i>(a) risque naturel :</i>	
– foudre	0,2
– crue	0,5
– avalanche	0,5 – 4
<i>(b) risque domestique :</i>	
– noyade	10–16
– overdose (drogue)	50–60
– suicide	100
– accident de la circulation	130–150
– accident domestique	110–330
– grippe	300–400
– tabac	3 000–5 000
<i>(c) risque sportif :</i>	
– football	60
– ski	410
– alpinisme	600
– plongée	1 260
– nautisme	8 000

Tableau 1.3 Sommes remboursées par les assurances cantonales suisses pour la décennie 1993–2002 en millions d'euros. Source : Vereinigung der kantonalen Feuerversicherungen (www.vkf.ch).

Nature	Montant total (M€)	Part relative (%)
tempête	588	41,5
grêle	362	25,6
inondation	373	26,4
avalanche	65	4,6
chute de pierre	28	2,0

Tableau 1.4 Nombre de communes concernées par des arrêtés de catastrophes naturelles promulgués en France de 1982 à 1999. Source : Caisse Centrale de Réassurance.

Nature	Nombre de communes
effondrement	330
inondation	23 381
avalanche	52
mouvement de terrain	1 262

1.4 Aléa, vulnérabilité, et risque

Le zonage de risque fait appel à un certain nombre de notions qu'il est utile de rappeler [24, 25]. Ces notions sont reconnues sur l'ensemble des pays occidentaux puisque la plupart de ces pays ont adopté la démarche mise en pratique par les Suisses au cours des années 1960 [13].

Risque. – Le risque représente la probabilité de dommages matériels, de blessures, et/ou de décès liée à l'occurrence d'un aléa naturel. En zonage d'avalanche comme pour les autres aléas d'origine hydrologique, le risque se caractérise par trois composantes :

- la *fréquence d'occurrence* du phénomène naturel en un lieu donné ;
- l'*intensité* du phénomène en termes d'effets potentiels sur des hommes, des animaux, ou tout autre enjeu ;
- le degré d'exposition, c'est-à-dire la proportion de temps durant lequel l'enjeu est exposé².

Le risque estimé est souvent mis en relation avec le *risque accepté* (voir tableau 1.1). Pour quantifier le risque, on écrit souvent la relation :

$$\text{risque} = \text{probabilité d'occurrence} \times \text{intensité}.$$

Dans un contexte socio-économique, on peut étendre cette notion en prenant en compte d'autres paramètres comme la vulnérabilité ou le degré d'exposition : $\text{risque} = \text{probabilité d'occurrence} \times \text{intensité} \times \text{exposition} \times \text{vulnérabilité}$.

Fréquence d'occurrence. – La fréquence d'occurrence est souvent introduite à travers la notion de *période de retour*. La période de retour est le temps moyen entre deux événements dont l'intensité est supérieure ou égale à un certain seuil³ ; elle est généralement exprimée en années. La *fréquence* est le nombre d'événements d'intensité donnée (ou supérieure à un certain seuil) par unité de temps. Ainsi une avalanche centennale est une avalanche dont la période de retour est $T = 100$ ans, c'est-à-dire dont la fréquence moyenne d'occurrence est de $1/T = 0,01$ chaque année (voir § 1.2.3).

Intensité. – L'intensité d'une avalanche est caractérisée à travers un ou deux paramètres qui permettent de quantifier la capacité de dommage. En zonage, ce sont surtout la distance d'arrêt (ou plus

2. Le degré d'exposition d'une maison dans une zone d'avalanche est 1 ; le degré d'exposition d'une route est la proportion de temps durant lequel il y a au moins un véhicule sur un tronçon menacé.

3. Cette notion peut être définie rigoureusement sur le plan mathématique, mais son emploi pratique est souvent difficile.

Tableau 1.5 *Échelle de magnitude des avalanches*. M : masse de l'avalanche, L longueur parcourue par l'avalanche depuis la zone de départ, et P ordre de grandeur de la pression d'impact. D'après [2].

Magnitude	Capacité de dommage	M (t)	L (m)	P (kPa)
1	généralement inoffensive	< 10	10	1
2	peut ensevelir, tuer ou blesser une personne	10^2	100	10
3	peut ensevelir une voiture, détruire un petit bâtiment ^a , ou casser des arbres	10^3	1000	100
4	peut détruire un wagon, un grand camion, plusieurs bâtiments, ou jusqu'à 4 ha de forêt	10^4	2000	500
5	plus grandes avalanches connues, peut détruire un village, raser une forêt de 40 ha	10^5	3000	1000

^a par exemple, un chalet en bois.

généralement l'extension) de l'avalanche et la pression d'impact qui servent à spécifier l'intensité d'une avalanche et ses conséquences potentielles. On admet qu'il existe une relation entre intensité I et période de retour T d'une avalanche : plus une avalanche est rare (T grande), plus son intensité $I(T)$ est potentiellement grande. Pour les crues torrentielles, c'est principalement le débit de pointe – parfois le volume – de la crue comme en hydraulique classique.

Vulnérabilité. – La vulnérabilité représente le degré de dommage d'un enjeu soumis à une avalanche/crue d'intensité donnée. Pour traduire cette notion, on peut introduire un nombre v compris entre 0 et 1. Une vulnérabilité $v = 1$ pour une avalanche d'intensité I signifie la ruine de l'aménagement ou la mort des personnes concernées si une avalanche/crue d'intensité égale ou supérieure à I se produisait. La vulnérabilité est donc étroitement liée à l'intensité du phénomène : $v = v(I)$.

Aléa. – L'aléa d'avalanche représente le phénomène physique indépendamment de ses effets potentiels sur l'environnement et les activités humaines. On associe à l'aléa une probabilité d'occurrence (par le biais de la période de retour).

Avalanche/crue maximale. – C'est l'avalanche/crue avec le plus grand potentiel de dommages possibles pour un site donné. On considère en effet que la relation intensité/fréquence ne peut pas croître indéfiniment quand la période de retour devient très grande ; il doit exister des limitations d'ordre physique qui contraignent l'intensité à tendre vers une valeur limite. Le guide PPR avalanche a introduit la notion d'*avalanche maximale vraisemblable* [7].

Avalanche/crue de référence. – L'*avalanche/crue de référence* (appelée encore avalanche/crue de projet) est l'avalanche retenue pour le dimensionnement d'un ouvrage, le plus souvent un ouvrage paravalanche. L'ouvrage doit pouvoir résister à toutes les avalanches dont l'intensité est inférieure ou égale à celle de l'avalanche de référence. Pour des avalanches d'intensité supérieure, on tolère des dommages partiels ou complets (ruine de l'ouvrage).

Magnitude. – Comme pour les tremblements de terre ou les ouragans, on peut qualifier les effets destructeurs d'une avalanche et certaines caractéristiques physique à l'aide d'une échelle de *magnitude*. McClung et Schaerer ont en proposé une, reproduite au tableau 1.5. Récemment, le ministère de l'Écologie et du Développement Durable a proposé une échelle plus complète [26].

Cartes d'aléa et de risque. – Dans les études modernes du risque d'avalanche ou de crue sur un

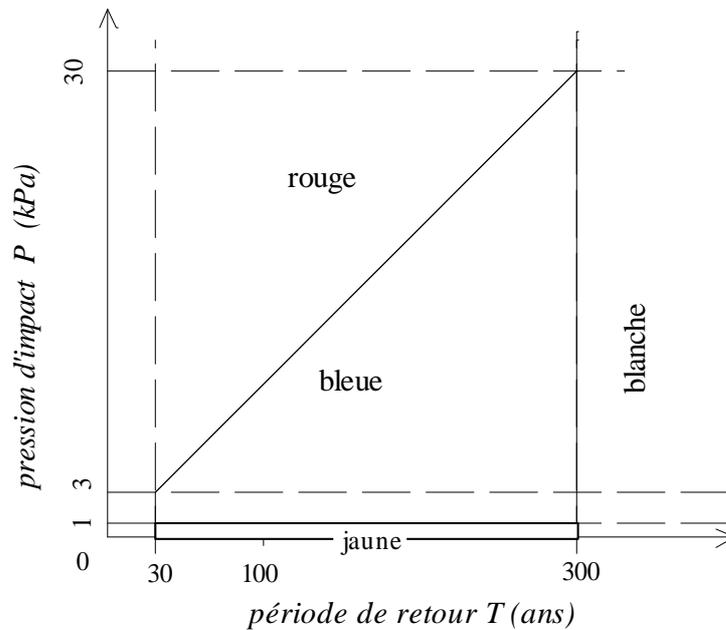


Figure 1.1 Définition des zones de risque en fonction de la pression d'impact et de la période de retour. Adapté de [14].

secteur donné, on procède de la façon suivante :

1. calcul/estimation de l'aléa, c'est-à-dire recherche des caractéristiques des avalanches générées sur le site en fonction de la période de retour⁴ ;
2. détermination des effets potentiels de l'avalanche, dommages possibles sur des aménagements existants ou pouvant exister ;
3. prescription des règles d'urbanisme s'il s'agit d'un dossier d'urbanisme.

Chacune de ces étapes peut être traduite sous forme de cartes.

- Pour l'étape (1), on produit des *cartes d'aléa* (appelées encore cartes d'intensité) où sont reportées les emprises des avalanches et la distribution du paramètre d'intensité, en général la pression de référence développée par une avalanche⁵. La figure 2.8(a) fournit un exemple de carte d'aléa ; les codes de couleur renseignent sur la pression au sein de l'avalanche. On peut également synthétiser l'information en fournissant un zonage de l'aléa, où l'on se contente d'un découpage en quelques zones (par exemple aléa négligeable/nul, faible, moyen, fort dans le cas d'un PPR avalanche).
- Pour l'étape (2), on produit une carte de risque, où les enveloppes des zones de risque sont schématisées à l'aide d'un code de couleur. La figure 2.8(b) fournit un exemple de carte de risque, où le découpage en zones fait appel à quatre codes de couleur selon l'effet des avalanches (pression, hauteur de sollicitation, type d'effort, etc.) sur le bâti et la fréquence des avalanches. L'usage international est d'utiliser un code de trois ou quatre couleurs : zones blanche, jaune, bleue, et rouge. La figure 2.1 propose une définition des zones de risque en usage dans la plupart des pays occidentaux.
- L'étape (3) concerne uniquement les cartes établies à des fins réglementaires (zonage PPR par exemple). Le document final doit inclure une cartographie synthétique du risque selon le code de couleur blanc/jaune/bleu/rouge et un règlement fixant les prescriptions d'occupation du sol⁶.

Zone blanche. – Dans les cartes de risque, la zone blanche regroupe les lieux pour lequel le risque est nul ou très faible, c'est-à-dire la période de retour d'éventuels phénomènes est très grande (100–300

4. En général, on ne considère que quelques périodes de retour dans les calculs. Typiquement, 10, 30, et 100 ans pour des remontées mécaniques ; 30, 100, et 300 ans pour des habitations permanentes.

5. À ne pas confondre avec la pression de l'avalanche de référence ou la pression d'impact

6. Le PPR est annexé au Plan Local d'Urbanisme

ans, voire plus, selon les pays) et/ou le niveau d'intensité très faible. Il n'y a pas de contre-indication à la construction de bâtiments liée au risque d'avalanche ou de crue.

Zone jaune. – Il s'agit d'une zone à risque résiduel (effet de souffle par exemple) ou bien potentiellement atteinte par des avalanches/crués exceptionnelles (avalanche maximale vraisemblable du guide PPR en France). Le risque y est faible, mais des mesures de consignation/évacuation peuvent concerner de telles zones en cas de situations nivo-météorologiques critiques. Ces mesures d'ordre temporaire ne sont en général pas doublées de mesures permanentes comme des prescriptions architecturales.

Zone bleue. – Il s'agit d'une zone à risque moyen. La construction de nouveau bâtiment (accueil permanent ou temporaire de personnes) y est réglementée (renforcement du bâti, ouvrage paravalanche, etc.); des mesures temporaires (plan de secours, d'évacuation, de consignation) sont généralement prévues.

Zone rouge. – La zone rouge est l'enveloppe des secteurs à fort risque. La zone rouge est généralement inconstructible.

1.5 Cartographie des phénomènes et fond topographique

Le fond topographique est un des éléments-clés d'une étude de risque puisqu'il sert à :

- analyser le fonctionnement d'un site avalanche ou d'un bassin-versant torrentiel ;
- calculer les caractéristiques des avalanches ou des crués ;
- reporter le résultat des calculs sous une forme compréhensible ;
- réaliser des plans de zonage et de risque.

Quoique la carte soit un outil commun, on constate toujours chez les professionnels des lacunes graves. Ainsi, beaucoup confondent l'échelle de réalisation d'une carte (et donc sa précision) avec le facteur d'agrandissement de la carte ; il n'est ainsi pas rare d'entendre qu'il suffit d'agrandir 5 fois une carte au 1 : 25 000 pour obtenir un plan au 1 : 5 000 !

Par défaut, il existe en France le fond topographique de l'IGN à l'échelle du 1 : 25 000, avec généralement une courbe de niveau tous les 10 mètres. Ce fond est disponible sur des cartes (série TOP25) ou bien sur des fichiers numériques scannés (scan 25, EDR 25). D'autres sources de données topographiques sont proposées par l'IGN. Parmi les plus utiles, il faut citer :

- Ortho-photographies : il s'agit de vues aériennes corrigées par ordinateur pour redresser les perspectives. La photographie est alors semblable à un plan. Ce type de support est intéressant quand les données topographiques vectorielles ou scannées sont de qualité insuffisante car il permet de faire un report propre d'emprise d'avalanche. Le coût d'une dalle de photographies couvrant un département est de 4500 € H.T.
- BD TOPO : il s'agit de la version vectorielle des cartes TOP25. On y retrouve donc les mêmes couches d'information que sur les TOP25 : limites administratives, voirie, habitations, courbes de niveau, cours d'eau, etc. Il y a aussi la possibilité d'adjoindre un modèle numérique de terrain (MNT) sous la forme d'un fichier x, y, z , fournissant un maillage rectangulaire du terrain naturel avec un pas de 25 m. La résolution est le 1 : 25 000 ; la précision sur les altitudes est de 1 m. Peu de communes des Alpes et des Pyrénées sont couvertes par la BD TOPO. Le coût est de l'ordre de 60 €/km².

Parmi les autres produits de l'IGN, la BD ALTI est à proscrire compte tenu de sa faible précision.

Tous ces documents sont géoréférencés, c'est-à-dire qu'on peut associer tout point à des coordonnées dans un système de référencement, en général du Lambert II étendu ou Lambert III.

La résolution de ces documents est souvent insuffisante pour des calculs d'avalanche précis. Il faut alors utiliser des résolutions plus fines. Un certain nombre de techniques (levé direct, restitution photogrammétrique, etc.) permettent de réaliser des plans à l'échelle désirée. En général, l'échelle appropriée pour le calcul d'avalanche est le 1 : 5 000, mais on peut prendre des résolutions plus basses ou plus élevées selon le contexte. Le coût de réalisation d'un fond topographique par restitution des courbes de

niveau comprend en général :

- l’acquisition des contre-types⁷ (négatifs) et le géoréférencement de ces clichés soit à l’aide d’un levé de points au GPS, soit relativement à un fond topographique existant ;
- la restitution photogrammétrique⁸ des courbes de niveau, lignes de niveau, planimétrie, etc. ;
- la mise en forme du document dans un format approprié (en général au format Autocad DWG).

La précision réelle du document est dépendante de la qualité des photographies (attention notamment aux zones d’ombre portée, à la végétation, aux zones d’éboulis raides, etc.), au calage GPS ou relatif (le calage GPS est une option onéreuse⁹ rarement choisie par les clients, mais qui seule permet un géoréférencement précis), etc. Il vaut mieux s’adresser à des sociétés spécialisées dans la réalisation de fond topographique en zone montagneuse comme Sintégra ou Orodia, toutes deux à Meylan.

Il existe toute une palette de logiciels permettant de faire de la cartographie d’avalanche, notamment d’importer le résultat de calculs d’avalanche :

- ArcView équipé du module Spatial Analyst est l’un des produits les plus répandus malgré son coût. Il est développé par ESRI et permet de traiter des SIG vectoriels (format d’échange d’AutoCad DXF ou bien format interne dit ShapeFile shp). ArcView est un logiciel simplifié par rapport au système ArcInfo. ESRI a également un logiciel ArcGIS intermédiaire entre ArcInfo et ArcView.
- IDRISI, MapInfo, GéoConcept sont des produits commerciaux similaires.
- Spring, TNTLite sont des logiciels libres disponibles par téléchargement ; leurs prestations sont assez voisines de celles d’ArcView.
- GRASS est une plate-forme développée par plusieurs universitaires américaines et européennes en collaboration avec des sociétés privées et des agences fédérales américaines au début des années 80 ; à la fin des années 90, Markus Neteler en a repris le développement d’abord à l’université de Hanovre (Allemagne), puis à Trento (Italie). Le programme possède son propre langage de programmation et offre des prestations avancées. Il est librement téléchargeable :

<http://grass.itc.it/>

<http://www.geog.uni-hannover.de/grass/>

Essentiellement développé pour des systèmes Linux ou Unix, GRASS est décliné dans une version pour Windows moyennant l’incorporation de certains éléments.

Un comparatif de ces différents produits est disponible à la page :

http://www.ai-geostats.org/geostats_faq/FAQ_GIS_geostats.htm

1.6 Modélisation physique des écoulements à forte pente

L’étude des risques naturels diffère d’autres sciences comme la physique ou la biologie parce qu’elle implique des phénomènes difficilement reproductibles en laboratoire ou *in situ* et pour lesquels nous n’avons qu’une information fragmentaire. Il est difficile de provoquer une avalanche en aérosol et, lorsqu’on y arrive, la mesure des caractéristiques dynamiques et la connaissance des conditions initiales restent extrêmement délicates. Contrairement à la physique ou à la biologie, la nivologie ne peut pas s’appuyer sur une étude expérimentale poussée.

Toutefois, le tableau n’est pas si noir car en comparaison avec d’autres sciences du milieu naturel comme l’astrophysique ou bien la géotectonique, les matériaux et les processus impliqués dans les avalanches permettent de faire de la mesure et de l’observation, aussi lacunaires soient elles. Les échelles de

7. En général, il est possible de trouver une mission IGN offrant des couples de clichés pour la zone d’étude quel que soit le secteur en France. Les clichés IGN sont en général d’une excellente qualité. Le coût d’acquisition est de l’ordre de 100 € H.T. par hectare. En l’absence de clichés IGN, il faut aller commander un survol de la zone étudiée et des prises de vue stéréoscopiques, dont le coût peut être assez élevé.

8. Il faut compter de l’ordre de 5 € H.T. par hectare.

9. Il faut compter de l’ordre de 5–10 € par hectare.

temps et d'espace sont à l'échelle humaine : ni trop grandes, ni trop petites, ce qui permet d'appréhender le fonctionnement des avalanches de manière intuitive. Cela ouvre aussi clairement la possibilité d'une modélisation physique, c'est-à-dire avec les outils classiques de la physique (les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, et de l'énergie) [10].

Les modèles d'avalanche ou les modèles hydrauliques sont tantôt décriés, tantôt vus comme une panacée [11, 13]. Ils sont indispensables dans les études modernes d'avalanche car ils permettent de traduire correctement la physique des phénomènes ; à l'opposé, l'évaluation à « dire d'expert » est généralement capable de brosser un portrait de la dynamique des phénomènes (types de phénomène, trajectoire, ordre de grandeur des volumes et des pressions), mais elle est incapable d'arriver à une description fine du comportement dynamique. Si les premières générations de modèles reposaient sur des représentations spéculatives de la dynamique des avalanches ou des laves torrentielles, la nouvelle génération résulte d'un plus gros travail de vérification à l'échelle du laboratoire et du terrain naturel ; les chercheurs tentent en outre d'appliquer des règles plus strictes dans la formulation des équations, dans la détermination des paramètres, etc. [10]. Les méthodes numériques de résolution sont également plus fiables qu'auparavant. Les modèles d'avalanche s'améliorent donc doucement, mais sûrement. Cependant, on ne peut que mettre en garde contre une utilisation aveugle des modèles :

- Un modèle numérique est un plus, mais il ne peut remplacer un expert ou pallier les insuffisances de celui-ci. Malheureusement, trop souvent, on voit des praticiens fonder leur avis principalement sur des résultats de simulation numérique. Le modèle est là pour aider l'expert, non le suppléer.
- Il convient ainsi d'être particulièrement attentif au choix des paramètres du code de calcul puisqu'à ce jour aucune directive n'existe pour fixer ces valeurs. Choisir des valeurs par défaut – par exemple celles indiquées dans le modèle SBG – peut conduire à une dangereuse sur-évaluation ou sous-évaluation des caractéristiques dynamiques de l'avalanche. Ainsi, les paramètres donnés pour le modèle SBG ne sont valables que pour cette méthode et dans le cadre des hypothèses de cette méthode (régime permanent, approximation en tronçon homogène, etc.) ; on ne peut pas utiliser ces paramètres pour un autre modèle – même si ce dernier repose sur une loi rhéologique à la Voellmy – si ce cadre d'hypothèses n'est pas vérifié (voir par exemple l'analyse en retour menée dans [12]).
- De même, il faut rester très critique dans l'interprétation des résultats en ce qui concerne les trajectoires et les étalements, deux points qui restent encore très sujets à erreur dans la plupart des modélisations.
- Tout comme dans la gamme des véhicules à quatre roues, il existe des tracteurs et des voitures de course, il y a une multitude de modèles qui répondent le plus souvent à des besoins et à des logiques différents. Il convient d'être particulièrement vigilant à choisir un modèle adapté au cas étudié.
- Utiliser un modèle de calcul puissant sur un modèle numérique de terrain avec une résolution insuffisante peut conduire à de grosses erreurs. On devra adapter le choix d'un modèle et ses paramètres à la résolution de la topographie. Pour les études fines (zonage pour des secteurs urbanisés, conception de protection paravalanche d'aménagement, etc.), la résolution doit être suffisamment fine : un plan au 1 : 5000 ou 1 : 10 000 est généralement utilisé ; la figure 2.8 montre un exemple de calcul d'avalanche (pression de référence au sein d'une avalanche centennale) reporté sur un modèle numérique de terrain. Dans certains cas, lorsque la topographie est complexe (variation brutale de la topographie sur quelques mètres), il faut augmenter la résolution et opter pour des échelles 1 : 2000, mais cela reste exceptionnel compte tenu du coût de réalisation des fonds topographiques numériques. Pour des études générales (plan de zonage, dossier UTN, etc.) un fond topographique avec une résolution plus basse (échelle de l'ordre du 1 : 25 000) suffit en général.
- La nivologie reste une science relativement jeune en comparaison d'autres domaines techniques comme le calcul des structures ou l'hydraulique ; de plus, le domaine d'étude est le milieu naturel, bien plus difficile à étudier que des matériaux tels que le béton ou l'acier. Il ne faut pas s'attendre à avoir la même précision de calcul avec un code d'avalanche qu'avec des codes de simulation mécanique utilisés dans l'industrie.

Chapitre 2

Dynamique des avalanches

2.1 Pourquoi étudier les avalanches ?

2.1.1 Dommages causés par les avalanches

Les avalanches sont emblématiques pour le grand public de l'Alpe homicide. La menace représentée par les avalanches en quelques chiffres :

- Historiquement en France et en Suisse, comme pour les autres pays alpins, les avalanches ont constitué l'une des principales menaces naturelles pour les hommes et les activités humaines comme le montre l'énumération des catastrophes depuis le XV^e siècle des tableaux 2.1 et 2.2. Elles ont profondément marqué la vie et l'architecture des villages alpins [4, 20].
- Chaque année, en moyenne, 30 personnes en France¹ et 28 en Suisse périssent par avalanche, mais le plus souvent lors d'une pratique de loisir (en moyenne, il y a 1 mort par an dans une habitation au cours des 20 dernières années). Dans les pays alpins, elles constituent le plus souvent l'un des risques naturels les plus dangereux avec les crues et les inondations (voir tableau 1.2).
- Les assurances cantonales suisses² ont remboursé 65 millions d'euros (voir tableau 1.3) pour les dommages au bâti consécutifs à des avalanches sur la décennie 1993–2002. L'année 1999 reste l'année noire pour les assureurs, avec 50 millions d'euros de remboursements. Le coût total des dommages sur la Suisse a été estimé à 390 millions d'euros, dont 120 de pertes indirectes (annulation de réservation, baisse de fréquentation touristique, etc.). Pour fixer un ordre de grandeur, les assurances versent sur l'ensemble de la planète en moyenne environ 11 milliards d'euros par an de dommages à la suite de catastrophes naturelles.
- En France, il existe 400 communes soumises à un risque d'avalanche³ 52 communes en France ont bénéficié depuis 1982 d'un arrêté de catastrophe naturelle⁴. En Suisse, 312 communes sont concernées par les avalanches.

1. Voir le site de l'ANENA (www.arena.org).

2. En Suisse, les assurances cantonales contre le feu ont le monopole des assurances dommage pour les biens immobiliers.

3. 23 500 communes sont menacées par un risque naturel en France.

4. Cet arrêté permet le remboursement par l'État de dommages subis sur des biens lorsque de vastes zones du territoire national ont été soumises à une calamité naturelle.

Tableau 2.1. Principales avalanches catastrophiques en France et en Andorre ayant touché des routes et des habitations (les accidents survenus lors d'activités de loisirs ne sont pas pris en compte).
Sources : [4, 22], enquêtes dde terrain Toraval.

<i>Année</i>	<i>Département</i>	<i>Commune</i>	<i>Descriptif</i>
1408	Hautes-Alpes	Ristolas	Deux avalanches consécutives causent la mort de 18 personnes et l'ensevelissement de 20 maisons.
1418	Isère	Clavans	Le village est sévèrement touché par des avalanches, puis de nouveau en 1428.
1449	Isère	Rivier-d'Omon	Le hameau de la Poutuire est détruit par une avalanche. On dénombre 14 ou 15 morts.
1450	Isère	Venos	Une avalanche détruit 26 maisons, tue 5 personnes.
1601	Hautes-Pyrénées	Saint-Martin	Les villages de Chèze et Saint-Martin sont détruits (107 morts.)
1634	Haute-Savoie	Chamonix	Le village du Tour dans la vallée de Chamonix est touché par une avalanche (11 morts).
1646	Haute-Savoie	Chamonix	6 personnes sont ensevelies par une avalanche à Tré-le-Champ.
1681	Haute-Savoie		Abrès, Molines et l'Echalp dans le Queyras (Hautes-Alpes) sont fortement touchés par des avalanches (15 morts.)
1699	Isère	Allemont	Le hameau du Mollard est détruit. L'avalanche a tué 3 personnes et tout le bétail.
1706	Hautes-Alpes		Toutes les Hautes-Alpes sont sinistrées : le village de la Chenal est détruit (43 maisons et 21 morts), le Serre est partiellement enseveli (14 morts, 7 maisons) ainsi que Fouillouse (18 morts) et Costeroux (11 maisons).
1728	Hautes-Alpes	Molines	8 maisons sont encore touchées par des avalanches à Costeroux.
1749	Isère	Huez-en-Oisans	Le village passe sous une avalanche (38 morts).
1757	Hautes-Alpes	Villard-de-Vallouise	Le village est rasé par un gros aérosol (54 maisons, 27 morts).
1788	Hautes-Alpes	Molines	Les hameaux de Costeroux et de La Chanal sont encore la proie des avalanches (21 morts, 54 maisons) ; à Ceillac dans le Queyras (Hautes-Alpes), 30 maisons sont détruites.
1793 ⁵	Savoie	Celliers	Une avalanche cause la mort de 7 personnes.
1792	Isère	Saint-Bernard-du-Touvet	Une avalanche part dans le massif de la Chartreuse et touche le village de (6 maisons détruites, 2 morts).

5. puis encore en 1810, 1825, 1870, 1881, 1907, 1908, 1945, 1952, 1978, 1981, 1988

Tableau 2.1. Principales avalanches catastrophiques en France et en Andorre ayant touché des routes et des habitations (les accidents survenus lors d'activités de loisirs ne sont pas pris en compte). Sources : [4, 22], enquêtes dde terrain Toraval.

<i>Année</i>	<i>Département</i>	<i>Commune</i>	<i>Descriptif</i>
1795	Hautes-Alpes	Chapelle-en-Valgaudemar	6 personnes sont emportées par une avalanche.
1803 ⁶	Hautes-Pyrénées	Barèges	Le village est touché (11 morts).
1805	Alpes-de-Haute-Provence	Allos	Le hameau de Champ-Richard est détruit (14 morts).
1806	Pyrénées-Orientales	Ayguatèbia	Le village de Talau ⁷ subit une avalanche meurtrière (64 morts)
1806	Hautes-Alpes	Guillaume-Peyrouse	Les cinq hameaux sont ensevelis mais la plupart des villageois sont retrouvés vivants (22 maisons détruites, 1 mort). L'avalanche retomba sur cette commune en 1816 causant la mort de 2 personnes.
1810	Pyrénées-Atlantiques	Fontpedrouse	Le village est sévèrement atteint (27 morts), puis en 1822 (8 morts).
1817	Haute-Savoie	les Houches	Deux avalanches s'abattent en 3 jours causant la mort de 7 personnes en tout.
1819	Hautes-Alpes	La Chapelle-en-Valgaudemar	Une avalanche fait deux morts et détruit entièrement 5 maisons aux Andrieux ; tout le bétail a péri.
1837	Alpes-de-Haute-Provence	Chavaille	Le hameau de Celle de la commune de est détruit par une avalanche causant la mort de 7 personnes.
1843	Alpes du Nord		On compte 8 morts à la Giettaz, 5 morts aux Houches, 2 morts à Vallorcine (Haute-Savoie), 10 morts à Valsenestre dans l'Oisans (Isère).
1847	Haute-Savoie	Chamonix	On dénombre 7 morts dans la vallée de Chamonix (les Pèlerins et la Flégère). Plusieurs hameaux sont touchés (Vers le Nant, les Vorgeats, etc.).
1874	Alpes-de-Haute-Provence	Blégiers	6 personnes sont emportées par une avalanche. Les sauveteurs sont surpris à leur tour par une avalanche. On dénombre en tout 7 morts.
1881	Savoie	Tignes	Les Brévières est touché une première fois par l'avalanche (14 morts), puis en 1950 (6 morts).
1889	Hautes-Alpes	Ristolas	À la suite de grosses chutes de neige, le hameau de la Monta est touché. On dénombre 7 morts. À la Chalp, 12 maisons sont touchées mais sans victime.

6. puis en 1811, 1842, 1855 (12 morts), 1856, 1860, 1879, 1882, 1886, 1889, 1895, 1897, 1902, 1907, 1939.

7. Il sera de nouveau touché en 1906.

Tableau 2.1. Principales avalanches catastrophiques en France et en Andorre ayant touché des routes et des habitations (les accidents survenus lors d'activités de loisirs ne sont pas pris en compte). Sources : [4, 22], enquêtes dde terrain Toraval.

<i>Année</i>	<i>Département</i>	<i>Commune</i>	<i>Descriptif</i>
1895	Ariège		On compte 20 morts à Orlu et Ax-les-Thermes.
1914	Haute-Savoie	Chamonix	Crue avalancheuse : les hameaux de Chosalets et de la Rosière sont atteints, l'hôtel du col des Montets est détruit. Plusieurs bâtiments sont détruits à l'Argentière.
1923	Savoie	Bourg-Saint-Maurice	En décembre, le hameau des Lanches dans le Beaufortain est touché (10 morts).
1923	Alpes du Nord		Activité avalancheuse très importante sur toutes les Alpes du Nord du Mont-Blanc à l'Oisans avec de très nombreuses voies de communication coupées. Au printemps suivant, l'activité avalancheuse très importante cause également de nombreux dégâts, notamment aux Pélérins (Haute-Savoie).
1943	Savoie	Saint-Colomban-les-Villards	Le village est atteint une première fois (7 morts), puis en 1981 (2 morts).
1950	Isère	Huez	À la mine d'Huez, c'est le drame pour les mineurs (10 morts).
1970	Savoie	Val-d'Isère	Le chalet de l'UCPA est touché. C'est la plus grosse catastrophe en France (39 morts). De nombreuses autres avalanches meurtrières se produisent (Tignes, Lans-levillard).
1978	Haute-Savoie	Chamonix	Plusieurs avalanches dans la vallée de Chamonix touchent des routes et des habitations (10 morts).
1981	Alpes du Nord		Plusieurs villages (centenaires) de Savoie et du Dauphiné sévèrement touchés : Saint-Collomban-les-villards, Saint-Étienne-de-Cuines, Valloire (Savoie), Clavans, La Morle, etc. (Isère). En tout on dénombre 4 morts.
1986	Pyrénées-Orientales	Porte-Puymorens	Une avalanche touche un chalet (2 morts).
1988	Haute-Savoie	Chamonix	Avalanche de Taconnaz (Hautes-Savoie). Plusieurs maisons détruites (pas de victimes).

Tableau 2.1. Principales avalanches catastrophiques en France et en Andorre ayant touché des routes et des habitations (les accidents survenus lors d'activités de loisirs ne sont pas pris en compte). Sources : [4, 22], enquêtes dde terrain Toraval.

<i>Année</i>	<i>Département</i>	<i>Commune</i>	<i>Descriptif</i>
1990	Alpes du Nord		En février, tempête d'une semaine. La station de Tignes (Savoie) est bloquée et touchée par des avalanches à plusieurs reprises. Nouvelle avalanche à Tacconnaz (sans dégât).
1993	Haute-Savoie	les Houches	Avalanche du Bourgeat (dégâts matériels).
1995	Savoie	Peisey-Nancroix	Avalanche touchant le hameau des Lanches : plusieurs chalets détruits (pas de victime).
1996	Andorre		Avalanche exceptionnelle d'Arinsal (Andorre). Dégâts matériels.
1999	Haute-Savoie	Chamonix	Activité avalancheuse de grande ampleur. Une avalanche détruit 20 chalets et tue 12 personnes à Montroc.

Tableau 2.2. Principales avalanches catastrophiques en Suisse.
Sources : [23].

<i>Année</i>	<i>Canton</i>	<i>Commune</i>	<i>Descriptif</i>
1440	Grisons	Davos	Une avalanche cause la mort de 11 personnes.
1459	Grisons	Dinsentis	Une avalanche cause la mort de 16 personnes, détruit plusieurs bâtiments dont une église vieille de plusieurs siècles. Le lendemain, une avalanche cause la mort de 9 personnes et détruit 7 maisons à Trun.
1518	Valais	Loèche Bains	les Une avalanche cause la mort de 61 personnes et détruit plusieurs maisons.
1569	Grisons	Davos	Une avalanche cause la mort de 7 personnes.
1598	Grisons		Une série d'avalanches provoque la mort d'au moins 50 personnes et emporte plusieurs troupes. Vers l'actuelle frontière avec l'Italie, 68 personnes sont tuées à Livigno.
1601	Uri	Andermatt	Une avalanche cause la mort de 7 personnes.
1602	Grisons	Davos	Une avalanche tue 13 personnes et détruit 70 bâtiments.
1609	Grisons	Davos	Environ 20 personnes sont emportées par une avalanche et décèdent.
1636	Randa	Valais	Une avalanche cause la mort de 36 habitants.
1661	Grisons	Davos	8 personnes sont tuées par une avalanche.
1667	Tessin	Anzonico	La majeure partie du village est détruit, avec 88 morts. Le village de Fusio-Mogno est également sévèrement touché (33 morts).
1675	Grisons	Ftan	16 personnes sont tuées par une avalanche.
1687	Uri	Meiental	13 personnes sont tuées par une avalanche à Meiental et 10 autres à Gurtnellen.
1689	Grisons	Saas, Davos	Deux avalanches successives tuent 59 personnes et détruisent 22 maisons à Saas ; à Saint Antoine, 13 habitants sont tués ; à Davos, on déplore 8 morts et 7 maisons détruits (dans le Vorarlberg voisin, ce sont 120 personnes qui perdent la vie et 119 chalets qui sont détruits ; dans le Tyrol, le bilan atteint 29 morts et environ 800 bâtiments endommagés).
1695	Tessin	Bosco-Gurin	Une avalanche fait 34 morts et détruit 11 maisons.
1719	Valais	Loèche Bains	les Une avalanche fait 55 morts et détruit plusieurs bâtiments (env. 50), dont les thermes et une chapelle.
1720	Grisons	Davos	Une crue avalancheuse fait plusieurs victimes à Ftan (35 morts), Saint Antoine (4 morts) et cause de gros dégâts sur Davos.

Tableau 2.2. Principales avalanches catastrophiques en Suisse.
Sources : [23].

<i>Année</i>	<i>Canton</i>	<i>Commune</i>	<i>Descriptif</i>
1720	Valais	Obergesteln	Une avalanche cause la mort d'environ 50 à 90 personnes. À Brigue, 40 personnes sont emportées ; à Randa, on dénombre 12 victimes et 23 au Grand Saint Bernard.
1730	Uri	Realp	Une avalanche cause la mort de 17 personnes.
1731	Grisons	Saint Antoine	6 personnes sont tuées.
1737	Valais	Randa	Plusieurs dizaines de personnes sont tuées à Randa.
1738	Glarus	Engi	Une avalanche cause la mort de 10 personnes.
1739	Berne	Saint Stéphane	7 personnes sont tuées.
1730	Valais	Saas	Une avalanche cause la mort de 18 personnes.
1749	Grisons, Tessin		Une grosse activité avalancheuse sur 2 jours cause la mort de 5 personnes à Disentis, 64 à Rueras, 6 à Zarcuns, 13 à Ossasco, 41 à Bosco.
1756	Uri	Gurtellen	Une avalanche cause la mort de 10 personnes.
1794, 1802	Grisons	Davos	Des avalanches font de gros dégâts, mais pas de victimes.
1807	Grisons	Unterschächen	Des avalanches tuent 8 personnes à Unterschächen et une autre à Saint Antoine.
1808	Berne	Obermad	Une bonne partie du village d'Obermad (Gadmen) est détruit (23 morts) ; on dénombre 4 morts à Nesselthal et 9 à Schärmatte.
1808	Grisons	Selva	Le bourg de Selva est en grande partie détruit (26 morts, 11 bâtiments détruits).
1817	Berne	Anderegg	Au moins 15 personnes sont tuées par une avalanche.
1827	Valais	Biel, Selkingen	Des avalanches tuent 51 personnes et causent de nombreux dégâts.
1844	Uri	Göschenental	Des avalanches tuent 5 personnes.
1849	Valais	Saas Grund	La mort de 19 personnes et de nombreux dégâts sont causés par une avalanche (30 bâtiments détruits).
1851	Tessin	Ghirone-Cozzera	23 personnes sont tuées.
1853	Tessin	Bedretto	29 personnes sont tuées.
1888	Tessin, sud Valais		Une grosse crue avalancheuse cause la mort de 49 personnes et la destruction de 1325 ha de forêt. Sur trois périodes critiques entre février et mars, 1094 avalanches de grande ampleur sont observées dans les Grisons et le Tessin.
1916	Grisons		Grosse activité avalancheuse causant de gros dégâts à la forêt.

Tableau 2.2. Principales avalanches catastrophiques en Suisse.
Sources : [23].

<i>Année</i>	<i>Canton</i>	<i>Commune</i>	<i>Descriptif</i>
1923	Oberland, Valais		Après un fort redoux, très grosse activité avalancheuse.
1935	haut Valais, basse Engadine, région du Gotthard		Grosse activité avalancheuse.
1951	Tessin, Grisons, Oberland		Fortes chutes de neige (3 m en 10 jours) provoquent des avalanches très meurtrières : 98 morts (dont 75 à Airolo), 1527 bâtiments détruits, 800 têtes de bétail tuées, 2000 ha de forêt renversés.
1954	Oberland, nord des Grisons		Grosse activité avalancheuse (258 dommages d'avalanches enregistrés) causant la mort de 20 personnes (125 en Autriche dans le Vorarlberg).
1968	Grisons	région de Davos	Une crue avalancheuse emporte 296 maisons, détruit 46 ha de forêt, et cause la mort de 24 personnes.
1975	Sud de l'arc alpin suisse		Grosse activité avalancheuse entraînant la destruction de 600 ha de forêt et la mort de 14 personnes.
1984	tout l'arc alpin Suisse		En tout 12 personnes perdent la vie. 414 ha de forêt et 424 bâtiments sont détruits.
1999	Valais	Évolène	Grosse activité avalancheuse après de fortes chutes neiges entre la fin janvier et fin février (de 300 à 500 cm de neige sur un mois) dans les vallées de Zermatt, Goms, dans le canton de Glaris, le Lötschental, les régions d'Uri et de Zerne, les environs de Klosters et Davos. 17 personnes sont tuées, dont 12 morts à Évölène. L'ensemble des dommages au bâti et au patrimoine dépasse les 440 millions de francs suisses (environ 30 millions €).

2.1.2 Acteurs et actions de l'ingénierie paravalanche

Le génie paravalanche représente le corps de connaissances nécessaires à l'étude des avalanches et à la conception des moyens de protection spécifiques. Beaucoup aujourd'hui pensent que le génie paravalanche est récent et a été tributaire des études scientifiques sur la neige et les avalanches entreprises dans la seconde moitié du XX^e siècle. Il n'en est rien : les premières actions de défense organisée contre les avalanches remontent au XVII^e siècle en France et en Suisse ! Le développement du génie paravalanche et, de manière plus générale, de la science des avalanches n'a pas été linéaire : avant d'entrer dans l'ère moderne, il y a eu le savoir local des populations montagnardes, les premières recherches menées par les services forestiers à la fin du XIX^e s. puis les études des géographes au début du XX^e s., les développements des ingénieurs civils au milieu du XX^e s., etc. Chaque fois qu'un groupe d'individus s'est emparé du sujet, il s'est forgé ses propres concepts, sa propre terminologie, et cela sans qu'il y ait eu nécessairement de continuité avec les savoirs antérieurs. Ceci explique pourquoi il n'y a jamais eu jusqu'à l'époque récente une image cohérente de la science des avalanches⁸.

Une longue histoire

Au cours des derniers siècles, de nombreux villages ont été touchés par des avalanches (voir tableaux 2.1 et 2.2). Dans quelques cas, la seule parade consistait à abandonner le village pour un autre endroit ; le plus souvent, on déplaçait les bâtiments les plus exposés. Parfois, on construisait des ouvrages de défense, comme à Vallorcine, où une étrave fut construite pour protéger l'église et le presbytère en 1722 et renforcée en 1843 [27].



Figure 2.1 L'étrave protégeant l'église de Vallorcine. Cliché C. Ancey.

8. L'étymologie même du mot *avalanche* est complexe. En vieux français, on employait le terme « lavanche » ainsi que d'autres variantes selon les vallées. Les Alpes francophones parlant des variations de langue occitane, les termes usités semblent dériver de *lavancher/lavintsi*, issu du latin *labina*, « le lieu de passage de l'avalanche » : *lavine*, *lavange*, *lavanche*, etc. dans l'espace francophone actuel, *levina*, *lavanga* au Tessin et au Piémont occidental, *Lawine*, *Lauene* dans l'espace germanophone [28]. C'est donc le lieu plutôt que l'avalanche elle-même qui était évoqué ; d'autres termes (couloir, drayère, chalanche, etc.) ont également pu remplir cette fonction, mais avec un sens plutôt tourné sur le « ravin en forte pente qui canalise aussi bien les coulées de neige que celles de boue » [28]. En 1762, le dictionnaire de l'Académie française utilise encore « lavanche ». L'usage du mot « avalanche » semble se généraliser au XIX^e siècle.

Barèges et les balbutiements du génie paravalanche

Barèges (Hautes-Pyrénées) fut le premier site en France à bénéficier d'une défense active contre les avalanches. Barèges, village et station thermale, est bâti dans une gorge à 1250 m d'altitude. Il est fortement exposé aux avalanches qui descendent des ravins dominant le village ; les villageois eurent à souffrir des avalanches durant le XIX^e siècle à de nombreuses reprises : 1803, 1811, 1823, 1842, 1855, 1856, 1860, 1879, 1882, 1886, 1889, 1895, 1897. À ce propos, l'ingénieur Lomet note au cours d'un voyage à Barèges en 1794, que c'est le déboisement qui est à l'origine des catastrophes récentes : « Autrefois, toutes les montagnes qui dominent Barèges étaient revêtues de bois de chêne jusque vis-à-vis de la vallée d'Escoubous. Des hommes actuellement vivants en ont vu les restes et les ont achevés. Les habitants des plateaux ont tout ravagé eux-mêmes, parce que ces pentes étant les premières découvertes par leur exposition et par la chute des avalanches, ils y ont de bonne heure un pâturage pour leurs moutons, et que, le jour où ils les y conduisent, ils oublient que pendant l'hiver ils ont frémi dans leurs habitations de la peur d'être emportés avec elle par ces neiges, dont ils provoquent obstinément la chute ».

La présence d'un hôpital militaire dans une zone exposée a entraîné les premières études sur la protection contre les avalanches, la recherche et la mise en œuvre des techniques adéquates. Le capitaine du génie de Verdal soumit à l'état-major les premières propositions en 1839, puis 1843, qui restèrent lettre morte. Il fallut attendre l'avalanche catastrophique de 1860 pour que le génie consacra ses efforts à la mise en place de moyens de défense. Les travaux entrepris sur trente années furent gigantesques : séries de banquettes (sur 1,22 ha), forêt artificielle (7750 pieux enfoncés), plate-forme en maçonnerie, 33 barrages en pierre sèche, etc.

L'ère des forestiers 1860–1951

En France, en 1860, sous le Second Empire, à la suite de nombreuses calamités naturelles, une loi donna naissance aux services de Restauration des Terrains en Montagne, dépendant de l'administration des Eaux et Forêts. Leur mission principale se fixa tout d'abord sur le reboisement des zones sensibles, la correction des torrents et la lutte contre l'érosion des versants. Progressivement, les services RTM ont pris en charge, entre autres, les travaux de protection contre les avalanches, essentiellement en reboisant les versants exposés. Ainsi, les RTM se substituèrent aux sapeurs du génie militaire sur Barèges.

Certaines de ces méthodes étaient anciennes, d'autres (comme la forêt artificielle) étaient à l'état embryonnaire ; toutes allaient pouvoir être testées sur le site de Barèges sur plusieurs années. La stratégie adoptée par les concepteurs était d'empêcher le glissement du manteau neigeux en altitude, et non de freiner ou d'arrêter l'avalanche. Il s'avéra que la forêt artificielle était inefficace et fragile (elle fut arrachée en moins de dix ans) tandis que les barrières à lames jointives furent arrachées en moins de deux ans par les vents violents qui soufflent sur les crêtes. En revanche, banquettes et plates-formes eurent les effets escomptés : fixer le manteau neigeux et séparer la zone d'accumulation en panneaux indépendants de telle sorte que l'instabilité de l'un d'eux n'entraîne pas dans son glissement les autres. Parallèlement, les services RTM entreprenaient un colossal effort de reboisement (essentiellement des résineux : pins noirs d'Autriche, mélèzes et épicéas, etc.), qui était le principal remède préconisé contre les avalanches. En 1892, l'administration des Eaux et Forêts prit la relève du génie militaire sur le site de Barèges : de nouvelles banquettes furent construites dans les versants exposés qui n'en étaient pas encore pourvus (en tout 50 ha traités), les réfections des plantations (250 ha) sont poursuivies sans relâche. Le reboisement des zones sensibles allait être la priorité des services RTM pendant de nombreuses années : à Barèges, Celliers, Saint-Colomban-des-Villard, etc. des séries domaniales sont constituées.

En Suisse, la Confédération se dote dès 1874 d'un service fédéral forestier calqué sur le modèle des Grisons. En 1876, la première loi fédérale sur la police des forêts est votée. De 1878 à 1909, l'inspecteur général, le Dr Johann Coaz, accumula les statistiques sur les avalanches grâce à la mise en place d'une procédure de suivi de tous les couloirs menaçant des villages dans les différents cantons. Après la publication de son ouvrage en 1910, la procédure de suivi fut arrêtée. Alpiniste, scientifique, forestier, ardent fédéraliste, et organisateur, Johann Coaz donna naissance à l'étude scientifique de la neige et des avalanches, la nivologie. En 1881, il écrivit le premier ouvrage scientifique consacré aux avalanches [29]. En 1936 le premier laboratoire de la neige, le *Schnee- und Lawinen Forschung* (SLF) à Davos au

Weissfluhjoch, fut créé.

La faillite d'un système et la naissance du génie paravalanche moderne

En 1951, la Suisse connut une terrible crue avalancheuse (98 morts). Cette catastrophe a mis en évidence la lacune tant en matière d'aménagement du territoire (plan d'occupation des sols, urbanisation anarchique) que des insuffisances de protection. Afin d'éviter pareils drames, la Confédération s'engagea dans plusieurs voies :

- la reprise du suivi de l'activité avalancheuse sur certains couloirs sensibles (dès 1955) ;
- le développement de méthodes de calcul (les travaux de l'ingénieur civil Voellmy datant de 1955) ;
- une réflexion sur le zonage d'avalanche et les contraintes urbanistiques.

Le développement du tourisme hivernal après la seconde guerre mondiale incita à l'extension des travaux de protection (défense rapprochée : galerie, tourne). Dans les années 60–67, des groupes de travail proposèrent les premières ébauches de zonage en distinguant trois zones : zone rouge (inconstructible car fortement menacée par des avalanches), zone bleue (constructible sous réserve de protection car menacée par des avalanches exceptionnelles), et zone blanche (zone constructible, hors de portée des avalanches). Les avalanches catastrophiques de janvier 1968 rendirent encore plus pressante la nécessité de disposer de plan de zonage pour les communes exposées.

C'est à partir de cette date que la Suisse allait devenir le leader de l'ingénierie paravalanche. Il faut dire que l'enjeu était bien plus important qu'en France : à dominante montagnaise, la Suisse possède de nombreuses lignes de chemins de fer exposées, des centres de tourisme alpin parmi les plus prestigieux (Saint-Moritz, Davos, Zermatt, etc.) et, en outre, il y avait la volonté au plus haut niveau (légitimée par la politique de défense de la Confédération) de maintenir ouverts les grands axes routiers et ferroviaires ainsi que les principaux cols (Gothard, Simplon, Oberalp, Bernina, etc.).

En France, jusqu'à la seconde guerre mondiale, contrairement à la Suisse, il n'y a pas eu une volonté politique d'organiser une lutte systématique contre les avalanches, d'une part à cause du faible enjeu et du faible poids économique de la montagne française, mais également à cause du coût exorbitant des travaux de correction (réalisés à la main et à la pioche). Le reboisement était donc amplement considéré comme la meilleure politique globale de prévention.

En février 1970, la catastrophe du chalet de l'UCPA à Val-d'Isère, puis celle de Passy, émut l'opinion publique et fut le symbole de la défaillance du système français en matière de protection. Aussitôt, le gouvernement nomma une commission interministérielle d'enquête ; dès octobre 1970, cette commission Saunier proposa la création de l'association nationale pour l'études de la neige et des avalanches (ANENA), la mise en place d'une division *nivologie* au CTGREF (devenu le Cemagref) et du centre d'études de la neige (Météo-France). On entre alors en Europe dans la période moderne de la lutte contre les avalanches.

2.1.3 Le génie paravalanche aujourd'hui

2.1.4 Les missions

Les besoins d'une ingénierie paravalanche se font sentir dans de nombreuses activités :

- aménagement du territoire : plan d'occupation des sols, urbanisme (plan de zonage de type PPR), prescriptions architecturales dans les documents administratifs, permis de construire ;
- compatibilité entre un équipement et la gestion du risque d'avalanche : dossier Unité touristique nouvelle (UTN), Demande d'autorisation d'engagement des travaux (DAET), choix d'implantation de pistes, de remontées mécaniques, calcul d'impact (lac de retenue, édifice, etc.) ;
- dimensionnement d'ouvrages paravalanches (filets, digues, etc.), d'infrastructures (pylônes, murs, etc.), dossier de consultation des entreprises, mise en place de protection (gazex, catex, etc.) ;
- gestion temporelle du risque : prévision locale du risque d'avalanches (PRA) pour la gestion d'une route, d'une station de ski, d'événements et manifestations de plein air, d'activités industrielles

(construction en zone dangereuse, mines, etc.)

- contentieux judiciaire (accident d’avalanche, permis de construire, etc.).

Les acteurs

S’il y a encore quelques années, les intervenants étaient quasi-exclusivement des employés de l’État, on note aujourd’hui la situation inverse. La compétence de l’État en la matière se concentre essentiellement dans les services instructeurs de type RTM. et dans des centres de recherche et d’enseignement. À côté s’est donc développée une ingénierie paravalanche privée que l’on retrouve essentiellement :

- dans les stations de ski : gestion temporelle du risque dans les grandes stations de ski ;
- dans les bureaux généralistes : réalisation de PPR, petits ouvrages paravalanches, etc.
- chez quelques consultants spécialisés : en général, spécialisation dans un créneau particulier (gestion spatiale ou temporelle du risque).

Comme pour d’autres domaines (médecine, nouvelles technologies), une disparition complète de l’État ne paraît pas envisageable, ni souhaitable car il y a toujours besoin d’un transfert important de la recherche vers l’ingénierie et, réciproquement, une remontée des problèmes de la pratique vers la recherche.

Le génie paravalanche suit une tendance lourde de la plupart des arts et techniques, qui est la privatisation des compétences en ingénierie. Cependant la relative jeunesse et le faible nombre d’intervenants rendent assez difficile un décryptage de la communauté des praticiens gravitant autour du génie paravalanche. Pour une personne extérieure, il est assez souvent difficile de savoir qui fait quoi, à quel prix, ou s’il est même justifié de passer par un spécialiste.

2.2 Typologie des avalanches

La difficulté essentielle dans toute tentative de classification des avalanches est qu’une multitude de facteurs nivo-météorologiques et topographiques influent sur le déclenchement et la propagation d’une avalanche et, comme pour beaucoup de phénomènes naturels, toutes les combinaisons ou presque sont possibles. Il existe ainsi un très grand nombre de termes pour désigner les avalanches : avalanche de fond, de fonte, de printemps, de glacier, de poudreuse, de neige mouillée, de neige sans cohésion, de plaque, etc. Le tableau 2.3 présente les caractéristiques essentielles servant à décrire une avalanche, depuis son déclenchement jusqu’à son arrêt.

Il est possible de définir plusieurs classifications des avalanches selon l’usage que l’on veut en faire [8]. Assez étrangement pourtant, la plupart des classifications communément répandues dégagent trois ensembles (qui sont grossièrement identiques à quelques petites différences près) : avalanches de poudreuse, de plaque(s), et de fonte. Notons que les critères de désignation pour ces classes se réfèrent respectivement à l’état de la neige, au mode de départ (ou à la structure du manteau neigeux), et à une cause du départ. Ces critères ne sont pas homogènes, ce qui rend très vite invalide ce genre de classification. Entre autres arguments, il faut noter qu’un certain nombre d’avalanches⁹ vérifient simultanément deux des critères, voire les trois. Outre le problème de classification, on peut remarquer qu’un certain nombre de termes couramment usités (tels que plaque, ancrage, etc.) ont des sens variés selon les personnes qui les emploient. Ainsi, dans l’usage commun, le terme d’accumulation renvoie parfois à deux notions opposées : par exemple, chez le skieur, il est synonyme de sur-épaisseur de neige (qui peut être cause de l’avalanche) ou bien, pour le secouriste, il s’agit du culot de l’avalanche (après son arrêt).

En pratique, pour un usage en ingénierie paravalanche, on préfère utiliser une classification des avalanches fondée sur la dynamique des écoulements. Le point de vue adopté par l’ingénieur est celui

9. Ainsi l’avalanche du couloir des Favrandes (aiguille du Midi, vallée de Chamonix) le 16 mai 1983 est une avalanche partie sous forme de plaque (mobilisant de la neige humide) au moment de la fonte des neiges et qui a développé un aérosol suffisamment puissant pour faire des dommages à la forêt et a induit un écoulement massif de neige humide qui est allé jusqu’à l’entrée du tunnel du Mont-Blanc.

Tableau 2.3 Classification des avalanches : tableau synoptique des caractéristiques d'une avalanche. D'après [9].

Aire	Critères	Critères distinctifs	
<i>Aire de départ</i>	A. Mode de départ	A1. partant d'un point (départ ponctuel) A2. partant d'une ligne (départ en plaque)	A3. partant d'un point puis cassure linéaire (départ mixte) A4. partant d'une cassure en forme de crevasse
	B. Position du plan de glissement	B1. à l'intérieur du manteau neigeux B2. cassure dans la neige fraîche	B3. cassure dans la vieille neige B4. jusqu'au sol
	C. Eau liquide dans la neige	C1. absente	C2. présente
<i>Aire d'écoulement</i>	D. Tracé du parcours	D1. parcours sur une pente ouverte (avalanche de versant)	D2. parcours dans un couloir ou une gorge (avalanche de couloir)
	E. Type de mouvement	E1. nuage de neige (avalanche en aérosol) E2. coulant le long du sol (avalanche coulante)	E3. critères E1 et E2 simultanément (avalanche mixte)
	F. Position de la surface de glissement	F1. écoulement sur un manteau neige (avalanche superficielle)	F2. écoulement sur le sol (avalanche de fond)
<i>Aire d'arrêt</i>	G. Rugosité de la surface du dépôt	G1. grossière (dépôt grossier) G2. blocs anguleux	G3. boules arrondies G4. fine (dépôt fin)
	H. Eau liquide	H1. absente (dépôt sec)	H2. présente (dépôt humide)
	I. Souillure du dépôt	I1. pas d'autres matériaux visibles (dépôt propre) I2. souillure visible (dépôt souillé)	I3. rochers, cailloux, sols I4. branches, arbres I5. débris d'ouvrages

d'un homme qui voit arriver une avalanche depuis le fond de la vallée : s'il lui importe assez peu de savoir la forme de la cassure ou la consistance de la neige mobilisée par l'avalanche, il est en revanche intéressé par connaître la nature de la trajectoire et les caractéristiques dynamiques de l'avalanche.

En ingénierie paravalanche, on a considéré jusqu'à présent qu'il est suffisant de distinguer deux cas limites d'écoulement :

- **L'avalanche en aérosol** : c'est un nuage turbulent de particules de neige en suspension dans l'air qui tend à aller selon la ligne générale de la plus grande pente, en s'affranchissant souvent des variations topographiques locales. Sa vitesse maximale est élevée (50–100 m/s). Il faut que l'aérosol entraîne¹⁰ de la neige au cours de sa descente pour qu'il reste puissant (sinon il se dilue rapidement) ; cela est l'une des principales raisons pour lesquelles les avalanches en aérosol mobilisent plus fréquemment de la neige froide et sèche que de la neige humide. L'échelle de sa hauteur est la dizaine de mètres ; la masse volumique est de quelques dizaines de kg/m³ en moyenne¹¹.
- **L'avalanche coulante** : il s'agit d'un écoulement peu épais (échelle de hauteur de l'ordre de quelques mètres) et assez dense (quelques centaines de kg/m³). La trajectoire est dépendante du relief local, avec de possibles changements brutaux de direction et des variations significatives de largeur (étalement). La vitesse maximale est généralement inférieure à 30 m/s, mais certains écoulements peuvent atteindre des vitesses très élevées (de l'ordre de 50 m/s). Constituée de neige humide, elle peut ressembler à un écoulement lent de lave (vitesse de quelques m/s). Constituée de neige sèche et froide, elle peut garder une allure assez rapide (30–50 m/s).

Dans la pratique, on est souvent amené à tempérer ou à préciser le choix de tel ou tel terme utilisé pour se référer à un événement donné (en bref, on se donne un peu de souplesse après une réduction dichotomique de la richesse des écoulements avalanches). À noter que le terme d'*avalanche mixte* est à proscrire car il est confus. Il est préférable de parler des phases denses (coulantes) et en suspension d'un écoulement. Parmi les éléments pris en considération, il faut garder à l'esprit ceux-ci :

- La trajectoire d'une avalanche dépend naturellement de la topographie mais également de la vitesse et de la position du centre de gravité de l'écoulement : plus une avalanche va vite et plus son centre de gravité est haut par rapport à la surface du sol, moins elle est susceptible d'être influencée par le relief.
- La force et la dynamique d'une avalanche dépendent de son volume, non seulement celui mis en mouvement dès les premiers instants, mais également du volume de neige repris durant la phase d'écoulement. Ainsi, plus un aérosol s'alimente en neige plus il gagne en puissance. Pour une avalanche coulante on peut assister à une succession de flots déferlant les uns après les autres.

On parle ainsi d'écoulement ou de régime *inertiel* pour désigner un écoulement pour lequel l'inertie est grande (avalanche en aérosol ou avalanche coulante à grande vitesse, typiquement plus grande que 40 m/s). Au contraire on parle d'écoulement ou de régime *gravitaire* pour qualifier un écoulement à faible inertie. Cette caractérisation est essentielle notamment lorsqu'on cherche à calculer une pression d'impact ou à évaluer l'extension et la trajectoire d'une avalanche.

Les figures 2.2–2.6 montrent quelques exemples d'avalanche. La figure 2.2 montre un bel aérosol en écoulement dans le site expérimental de la Sionne, qui sert aux Suisses à faire des mesures sur des avalanches ; l'écoulement fait environ 20 m de haut. La figure 2.3 présente la tête d'un aérosol arrivant sur une zone en pente douce ; les arbres donnent un ordre de grandeur des dimensions de l'écoulement. La figure 2.4 fournit un exemple d'avalanche coulante, formant un petit nuage en suspension au passage d'une petite barre rocheuse ; au-dessus de la première avalanche, on peut également noter un autre départ en plaque provoquant la formation d'une seconde avalanche s'écoulant sous forme d'une nappe dense. La figure 2.5 montre un dépôt d'une avalanche coulante, où l'on peut apercevoir des gros blocs enchâssés dans une gangue de neige fine. La figure 2.6 reporte deux vues aériennes du dispositif paravalanche de Taconnaz, avec deux types de dépôt bien différents. Sur le cliché de gauche (avalanche du 11 février 1999), on peut voir un premier dépôt composé de plusieurs digitations qui recouvrent tout le dispositif et qui

10. On parle du phénomène de *reprise*.

11. Le qualificatif « en moyenne » est important car la masse volumique (ainsi que la vitesse) varie très significativement avec la hauteur.



Figure 2.2 *Avalanche en aérosol du 19 janvier 2004 sur le site expérimental de la Sionne (Valais, Suisse).*
© François Dufour, *Schnee und Lawinen Forschung (Davos).*

sont arrivées à franchir les digues frontale et latérale ; il s'agit typiquement d'un dépôt d'une avalanche très rapide de type aérosol (pas de culot massif, dépôt peu épais excepté à l'amont immédiat de la digue frontale). Au-dessus de ce dépôt, on peut remarquer un second dépôt, se présentant comme une langue épaisse qui résulte du dépôt de la partie dense de l'écoulement, intervenu après le passage de l'aérosol. Sur le cliché de droite, on voit un dépôt bien étalé dans la partie supérieure du dispositif paravalanche. On notera sur ces clichés les différences dans la forme des dépôts pour ces trois écoulements.



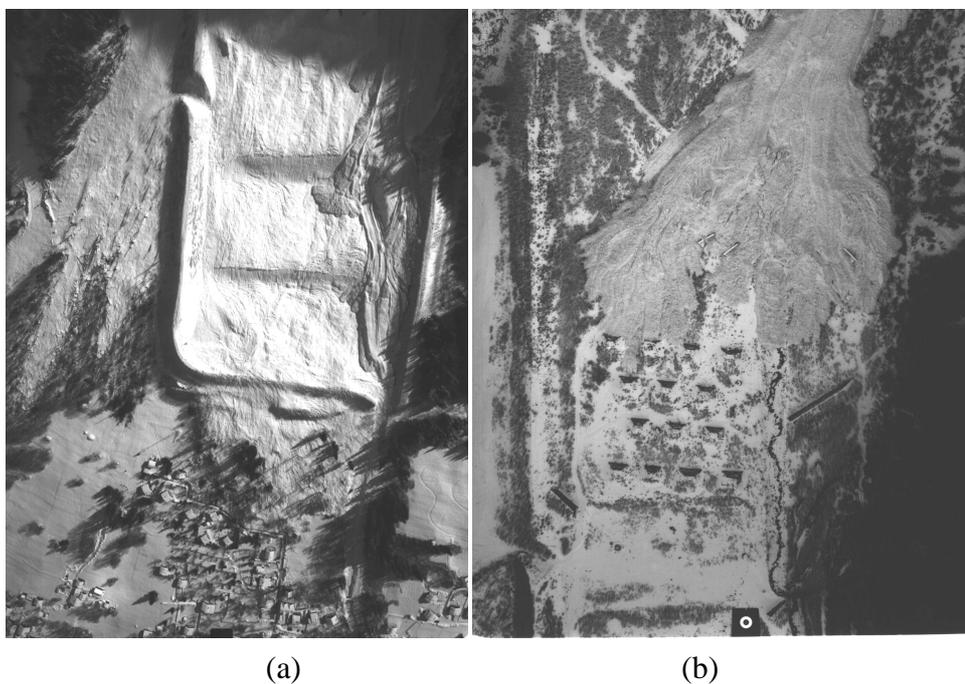
Figure 2.3 *Aérosol en phase d'arrêt sur le site expérimental du col d'Ornon (commune d'Ornon, Isère).*
© François Valla, Cemagref.



Figure 2.4 *Avalanche coulante sur le domaine hors-piste de Courchevel en mars 1992 (station de Courchevel, Savoie).* © Claude Etchelécou.



Figure 2.5 Dépôt d'avalanche coulante dans la combe du Tepey (Fond de France, Isère). © Toraval.



(a)

(b)

Figure 2.6 Dépôts de neige sur le dispositif paravalanche de Tacconnaz (commune de Chamonix-Mont-Blanc, Haute-Savoie). (a) Avalanche en aérosol du 11 février 1999. (b) Avalanche coulante de neige humide. © Sintégra.

2.3 Les données utilisables dans les études

Les études d'avalanche s'appuient sur plusieurs sources de données, chacune d'elles ayant ses spécificités. Nous les avons regroupées en plusieurs catégories :

- **Bases de données avalanches.** En Suisse, il existe un suivi de certains couloirs d'avalanches des Grisons autour de Davos qui est assuré par le SLF depuis une trentaine d'années, mais il n'existe pas de procédure générale de suivi des couloirs sur l'ensemble du territoire national. En France, on peut souvent disposer de deux types d'information regroupées dans des bases de données gérées par le Cemagref :

- *Carte de localisation des phénomènes d'avalanches*¹² (CLPA). Document à l'échelle du 1 : 25000, la CLPA reporte sur le fond topographique de l'IGN l'emprise maximale observée des avalanches ainsi qu'une analyse par photo-interprétation.
- *L'enquête permanente des avalanches.* C'est à l'ingénieur des Eaux et Forêts Paul Mougin que l'on doit la création d'un réseau d'observation des avalanches au début du XX^e siècle¹³. Le recueil de données sur le terrain est réalisé par le personnel de l'Office National des Forêts (ONF) ; les informations sont collectées dans une base de données gérée par le Cemagref à Grenoble. L'information principale est la date de l'événement observé, la cote d'arrêt, et certaines informations comme les conditions météorologiques, les dommages, etc.

L'accès à ces données est pour l'instant gratuit. La CLPA peut être consultée auprès des mairies, de certains services de l'État, et du Cemagref à Grenoble. Elle peut également être consultée sur internet à partir de l'adresse :

<http://clpa.grenoble.cemagref.fr>

et

<http://www.avalanches.fr>

- **Bases de données météorologiques.** En Suisse, il existe un réseau relativement dense de stations météorologiques en zone de montagne. Ce réseau est en fait double, avec une partie gérée par le service météorologique fédéral et une autre par le SLF. MétéoSuisse gère environ 150 postes sur le territoire national ; à cela s'ajoute un réseau de 400 pluviomètres donnant des valeurs journalières. Le prix des données dépend du type de données (fréquence d'acquisition), du nombre, et du temps de préparation. Ainsi, pour des données journalières, il faut compter en 2005 14 francs suisses (environ 9 €) pour 1000 données journalières de neige¹⁴.

En France, Météo-France gère environ 200 postes de mesures sur les Alpes et les Pyrénées. Hormis pour certains postes climatologiques comme Chamonix, les séries chronologiques sont généralement courtes (10–30 ans). À l'instar des banques de données Hydro et Pluvio pour les débits et les pluies, une banque de données centralisant les données nivométriques a été créée en 2003 à Toulouse¹⁵. Il est probable que la procédure d'accès à ce service change dans les années à venir ; en 2004, il faut payer un droit de consultation (152 € H.T.) et acheter les données souhaitées (0,35 € pour 10 données).

- **Autres données géographiques et historiques.** À côté de ces données, on peut être amené à rechercher d'autres informations :
 - Archives et témoignages : ils sont rares et souvent peu informatifs. La recherche des témoignages sur des avalanches du passé est souvent difficile et l'interprétation des données recueillies est

12. désignée jusqu'en 2002 sous le nom de « Carte de localisation probable des avalanches ».

13. Alors jeune ingénieur au service RTM de Savoie créé quelques années auparavant, Paul Mougin fit un voyage en Suisse en 1899, rencontra le Dr J. Coaz, qui peut être considéré comme le père de la nivologie. Dès son retour en France, Mougin créa des postes d'observations nivo-météorologiques et organisa le suivi de couloirs d'avalanches qui pouvaient représenter une menace pour l'homme et ses activités. D'abord limitée à la Savoie, cette expérience fut progressivement étendue à tout le territoire national.

14. Pour plus d'informations, il faut contacter MétéoSuisse, service de climatologie pour la Suisse Romande, 7bis, avenue de la Paix, CH-1211 Genève 2.

15. Adresse à contacter : Poste Météo-France DP/SERV/FDP, 42, avenue Gaspard Coriolis, 31057 Toulouse Cedex.

tout aussi ardue [19]. La consultation des archives départementales, de certains services de l'État (principalement les services départementaux du RTM), de fonds privés, etc. peut permettre de trouver des informations parfois intéressantes.

- Photographies aériennes : c'est le document de base de toute étude avalanche. L'analyse stéréoscopique de clichés permet d'analyser le fonctionnement d'un site avalancheux. Parfois, lorsqu'il y a une végétation suffisante, il est possible de trouver des indices sur des avalanches passées et d'évaluer la fréquence des phénomènes. La principale base de données en France est gérée par l'IGN. Les photographies peuvent être commandées par internet auprès de l'IGN :

<http://www.ign.fr>

Le coût d'un cliché est d'environ 12 € H.T. pour un tirage noir et blanc au format 23 × 23 et 30 € H.T. pour une émulsion couleur.

2.4 Codes et outils de calcul

Avant le développement de l'informatique individuelle, il était d'usage de fournir des méthodes de résolution approchées, qui permettaient de faire les calculs à la main ou bien à l'aide d'une feuille de calcul de type Excel. C'était le cas par exemple de la méthode dite SBG¹⁶ (Salm-Burkard-Gubler) développée en Suisse au début des années 1990 [14]. De nos jours, il est possible de résoudre directement ces équations à l'aide de méthodes numériques proposées dans des programmes mathématiques. Mathematica, MathLab, MathCad, SciLab, Octave, etc. possèdent des routines déjà implémentées qui permettent de faire la résolution numérique de ce type de système. Certaines distributions de Linux possèdent également des programmes de calcul symbolique (c'est le cas de la distribution RedHat, qui fournit un programme compatible avec Matlab). On peut également télécharger le programme Scilab¹⁷ à l'adresse :

<http://www-rocq.inria.fr/scilab/>

On pourra se reporter utilement à la présentation de ce logiciel à l'adresse internet suivante :

http://www.math-info.univ-paris5.fr/Enseignements/demarre_scilab/demarre_scilab.html

Il existe aussi des librairies de calcul disponibles librement par téléchargement. On peut citer notamment la librairie Fortran *ClawPack* (conservation law package) de l'américain Randy LeVeque, professeur à l'université de Washington (voir aussi son livre [18]), qui permet de résoudre des systèmes d'équations différentielles hyperboliques par la méthode des volumes finis :

<http://www.amath.washington.edu/~claw>

Il existe sinon des logiciels spécialisés comme Splus ou sa version libre :

<http://www.r-project.org>

La programmation des méthodes de calcul les plus avancées nécessite un sérieux bagage en mathématiques appliquées. Si on ne peut qu'encourager les praticiens à développer leurs propres outils quand ceux-ci restent relativement simples à programmer, il faut leur recommander de se tourner vers des logiciels spécialisés dès lors que la résolution des équations nécessite le recours à des algorithmes sophistiqués. Il existe un certain nombre de logiciels libres ou commerciaux permettant de faire des calculs d'avalanche. En voici une liste non exhaustive :

- AVL est un produit commercialisé par la société autrichienne AVL List GmbH, permettant de calculer à la fois des avalanches coulantes et en aérosol. AVL est à l'origine un code de calcul industriel pour des applications liées à la mécanique des fluides. Peter Sampl et ses collègues ont développé des modules spécifiques aux avalanches (calcul bidimensionnel) [15]. C'est le modèle de Savage-Hutter (modèle de type Saint-Venant avec frottement coulombien) qui sert pour les avalanches coulantes (résolution par la méthode aux éléments finis lagrangiens) ; les aérosols sont modélisés à l'aide d'un code de fluide turbulent de type $k - \varepsilon$. Pour plus d'information :

<http://www.tec.avl.com>.

- L'institut fédéral suisse *Schnee- und Lawinenforschung* à Davos a développé un modèle unidimensionnel qui peut être couplé à ArcView [17]. Le modèle est basé sur la résolution des équations de Saint-Venant avec un terme frictionnel à la Voellmy pour les avalanches coulantes ; il est également capable de calculer des avalanches en aérosol (modèle d'Issler) [16]. Le logiciel est vendu 4000 CHF (environ 2580 €).

16. appelée encore VSG (Voellmy-Salm-Gubler).

17. logiciel libre développé depuis 1990 par l'INRIA et l'ENPC.

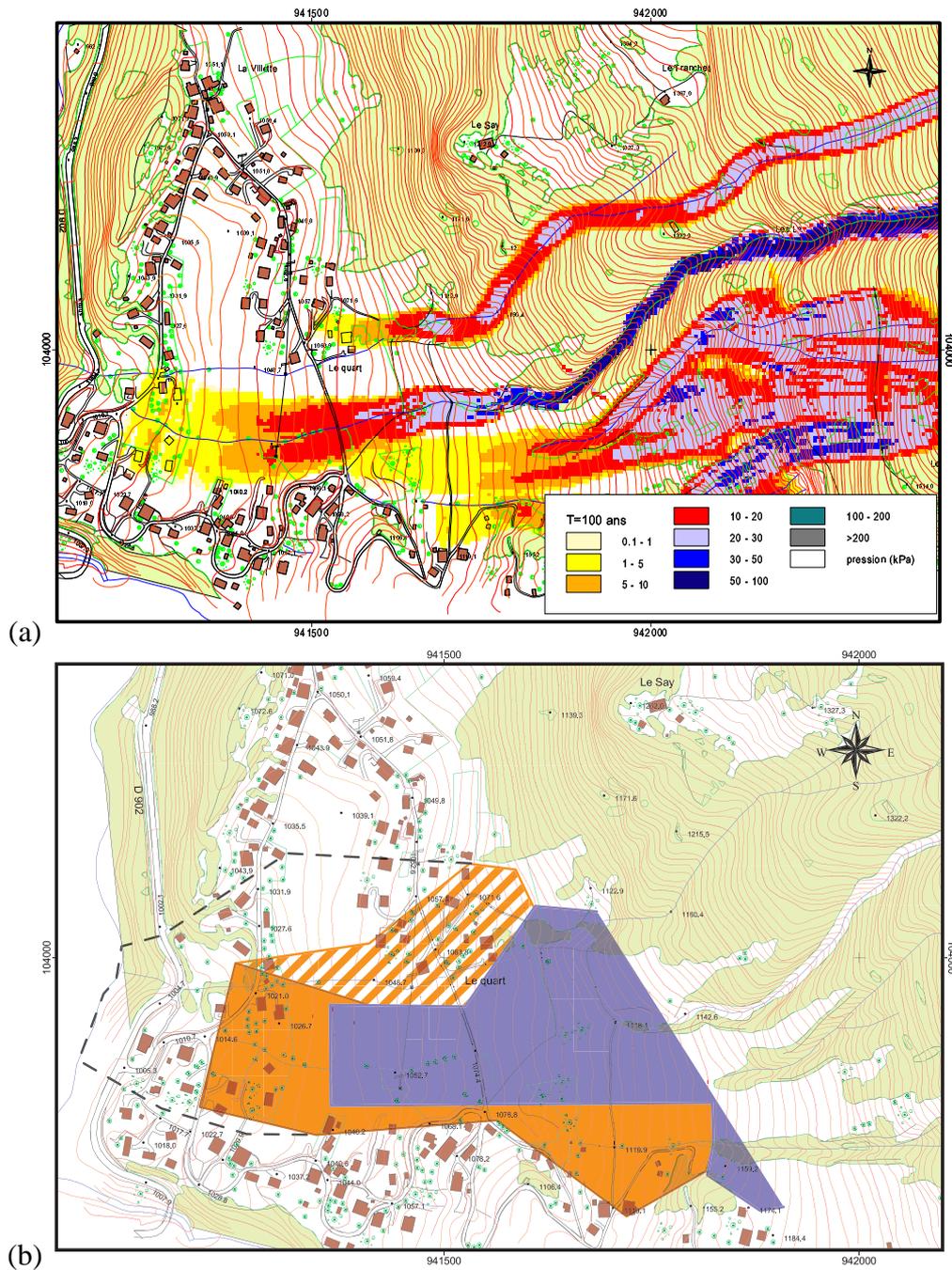


Figure 2.7 (a) Exemple de simulation d'une avalanche coulante centennale sur le couloir de la Vilette (Saint-Gervais-les-Bains, Haute-Savoie) par le modèle AVAC. (b) Carte de risques © Toraval.

2.4.1 Méthodes statistiques

Des méthodes de corrélation statistique ont été développées afin de connaître les distances extrêmes d'arrêt d'avalanche (extrême signifiant ici des avalanches de périodes de retour allant généralement de 100 à 300 ans). Ces méthodes reposent sur les corrélations existant entre des angles caractéristiques du profil de terrain. Parmi les plus communes, la méthode dite norvégienne définit un angle β entre le point de départ (préssumé) des avalanches du site et le point du terrain naturel faisant un angle de 10° par rapport à l'horizontale. Généralement, pour adoucir les irrégularités de terrain, le profil longitudinal naturel est remplacé par une courbe régulière (généralement une parabole). La position d'arrêt de l'avalanche est également référencée à l'aide d'un angle α lui aussi considéré à partir du point départ des avalanches (voir figure 1). Des formules de corrélation ont été recherchées entre α et β . Par exemple, sur la base de 113 événements exceptionnels, Lied et Toppe aboutirent à la corrélation linéaire suivante : $\alpha = 0,96\beta - 1,7^\circ$ (corrélation $r = 0,93$ et écart-type $1,4^\circ$). Des corrélations plus ou moins complexes et fines ont par la suite été calées pour diverses régions du monde, notamment en France. Malheureusement, pour l'arc alpin, les profils de terrain sont bien plus complexes que ceux sur lesquels la méthode a été originellement testée. Le confinement, les changements d'orientation, et la forte irrégularité des profils rendent difficilement applicables de telles méthodes en France. De plus, ce type de modélisation ne renseigne (pour l'instant) pas sur d'autres variables d'intérêt (comme la vitesse) que la cote d'arrêt.

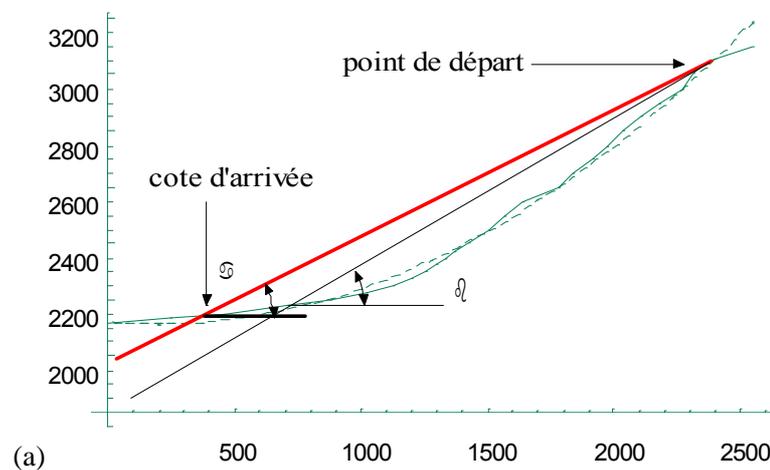


Figure 2.8 Définition des angles α et β dans la méthode norvégienne.

2.4.2 Méthodes déterministes

L'approche déterministe consiste à essayer de comprendre et quantifier les mécanismes impliqués dans les avalanches. Plusieurs échelles spatiales d'analyse sont possibles pour décrire un écoulement. La plus grande échelle, celle de l'écoulement, conduit aux modèles les plus simples, le plus souvent analytiques ou en tout cas avec une feuille de calcul d'un tableur. Les principales variables sont la position du centre de gravité et sa vitesse. Le comportement mécanique est principalement décrit à travers la force de frottement F exercé par le fond sur l'écoulement. La plus fine actuellement, proche de la taille des grains mobilisés dans l'écoulement, amène à des problèmes numériques complexes nécessitant plusieurs heures ou jours de calculs. L'écoulement est calculé en chaque point de l'espace qu'il occupe, ce qui nécessite de connaître en ce point les vitesses et les contraintes qui s'exercent. Des modèles intermédiaires existent avec pour principal avantage une complexité moindre par rapport aux modèles numériques à petite échelle de résolution et une finesse accrue par rapport aux modèles globaux. Ces modèles sont en général obtenus par intégration des équations locales du mouvement selon la hauteur, ce qui conduit à un jeu d'équations moyennées du mouvement (démarche similaire à ce qui est fait en hydraulique avec les équations de Saint Venant).

Nous nous intéresserons ici principalement aux modèles globaux. Il en existe deux catégories selon le type d'avalanche (coulante ou en aérosol). Pour les avalanches coulantes, l'un des modèles les plus populaires porte le nom de Voellmy, qui a été l'un de ses inventeurs. Ce modèle a connu depuis de nombreuses évolutions pour en améliorer les performances. L'hypothèse à la base du modèle est de considérer une avalanche coulante comme un corps rigide soumis à une force de frottement de la forme :

$$F = mg \frac{u^2}{\xi h} + \mu m g \cos \theta$$

où m représente la masse de l'avalanche, h sa hauteur, μ un coefficient de frottement traduisant en quelque sorte une viscosité de l'écoulement, ξ un terme de frottement dynamique représentant l'action du fond sur l'écoulement [14]. Ces deux paramètres ont été calés sur plusieurs séries d'événements. On retient en général que le paramètre μ ne dépend que de la taille ou de la période de retour de l'avalanche.

- Pour de grosses avalanches (plus centaines de milliers de m^3 ou des périodes de retour de l'ordre de 300 ans), il est fréquent de prendre $\mu = 0,155$.
- Pour de petites avalanches (quelques milliers de m^3 ou des périodes de retour de l'ordre de quelques années), on prend $\mu \approx 0,3 - 0,35$.

De même le coefficient ξ traduit plutôt l'influence du site. Lorsque la trajectoire de l'avalanche se fait sur de grandes pentes ouvertes, avec une rugosité importante (végétation, bloc), la valeur de ξ est choisie proche de 400 m/s^2 . Inversement, pour des trajectoires confinées dans des couloirs peu sinueux, ξ peut être pris égal à 1000 m/s^2 ou plus. En régime permanent, la vitesse se déduit facilement de l'équation de la quantité de mouvement ; on trouve :

$$u = \sqrt{\xi h \cos \theta (\tan \theta - \mu)}$$

Selon cette formule, deux régimes d'écoulement existent. Pour $\tan \theta > \mu$, une solution réelle existe pour l'équation ci-dessus et un régime permanent peut s'établir. $\tan \theta < \mu$, il n'y a pas de solution réelle : la force de frottement devient excédentaire par rapport à la force motrice apportée par la gravité. On considère alors que l'écoulement entre dans sa phase d'arrêt. Le point P du profil pour lequel $\tan \theta = \mu$ est appelé le point caractéristique ; il joue un rôle important dans la description de la dynamique en séparant zones d'écoulement et d'arrêt de l'avalanche. Notons toutefois que, dans des massifs au relief complexe comme les Alpes, il y a souvent plusieurs points caractéristiques pour un même profil. Pour l'heure, c'est encore du ressort de l'expert que de déterminer le bon point caractéristique du profil. Dans la zone d'arrêt, on tire de l'équation de quantité de mouvement que la vitesse diminue régulièrement selon l'expression :

$$\frac{1}{2} \frac{du^2}{dx} + u^2 \frac{g}{\xi h} = g \cos \theta (\tan \theta - \mu)$$

La distance d'arrêt x_a s'en déduit facilement en admettant qu'en un point $x = 0$, la vitesse de l'avalanche est u_P (notons qu'en pratique le point origine $x = 0$ est pris en P, en revanche la vitesse en P, nulle selon l'équation donnant la vitesse, est déterminée à l'aide d'une procédure spécifique non explicitée ici, voir [14]). On trouve ainsi :

$$x_a = \frac{\xi h}{2g} \ln \left(1 + \frac{u_P^2}{\xi h \cos \theta (\mu - \tan \theta)} \right)$$

Ce genre de modèle permet de calculer assez facilement la distance d'arrêt d'une avalanche, les vitesses maximales atteintes par l'avalanche en divers tronçons, et éventuellement la pression d'impact calculée selon l'expression (valable uniquement pour un obstacle de petite dimension par rapport à l'avalanche) : $p = c\rho v^2$, avec ρ la masse volumique de l'avalanche, c un facteur de forme pris entre 0,5 et 1 selon la géométrie de l'obstacle.

Chapitre 3

Hydraulique torrentielle

3.1 Les spécificités de l'hydraulique torrentielle

L'émergence de l'hydraulique torrentielle comme champ disciplinaire à part entière est assez récente en Europe. Il faut en effet attendre les années 1980 pour qu'en France et en Suisse apparaisse un corps de connaissances propres avec un objet d'étude spécifique : les torrents. Le cheminement des idées est assez similaire aux Etats-Unis et au Japon, deux autres pays très concernés par les phénomènes torrentiels. Pour en arriver là, il a fallu que plusieurs conditions soient réunies.

Tout d'abord sur le plan des applications, l'ingénierie n'a pas attendu qu'un ensemble de connaissances scientifiques soit disponible pour faire de la correction torrentielle. L'aménagement de cours d'eau en vue de se protéger de leurs excès est une pratique très vieille parmi les populations montagnardes. Dès le moyen âge, des textes de loi sont promulgués pour réglementer l'activité pastorale et l'exploitation forestière en montagne, mais il faut attendre la fin du XIX^e s. pour

- en France, un service de l'Etat, le service de restauration des terrains en montagne, voit le jour avec pour mission principale la lutte contre l'érosion (loi du 28 juillet 1860) [30]
- en Suisse, les lois sur la Forêt sont concomitantes des lois adoptées en France.

Pour lutter contre l'érosion et les crues torrentielles, les ingénieurs des Eaux et Forêts misent alors essentiellement sur le reboisement massif et la consolidation des lits torrentiels par des ouvrages de génie civil. Cette doctrine évolue peu au cours du XX^e s. si ce n'est à travers l'introduction de nouvelles techniques (gabions, ouvrages en béton armé, etc.). L'efficacité parfois limitée des protections, la multiplication des enjeux sur les cônes de déjection, une demande sécuritaire de plus en plus forte, le coût important en investissement et en entretien, sont autant de facteurs qui ont contribué à amener à un changement important de l'ingénierie de protection torrentielle et ont rendu nécessaire le développement d'outils de calcul adaptés.

Sur le plan scientifique, les écoulements torrentiels ont été étudiés par plusieurs communautés scientifiques, notamment les géologues et géomorphologues, les hydrauliciens et les mécaniciens des sols. Le plus souvent les différents spécialistes de ces domaines ont étudié les phénomènes torrentiels en utilisant leurs propres terminologie et outils. C'est ainsi que des lois aussi éloignées que celles de Manning-Strickler (utilisée en hydraulique pour le calcul des lignes d'eau et des débits) et Coulomb (utilisée en mécanique des sols pour estimer un seuil de rupture) ont été employées pour décrire les écoulements de lave torrentielle. Il faut attendre les années 1980 pour qu'il y ait une véritable prise de conscience amenant à penser que les écoulements torrentiels sont quelque part à mi-chemin entre un sol et de l'eau puisqu'il existe toute une multitude d'états et d'écoulements possibles entre l'eau et le sol [31]. La figure 3.1 schématise l'ensemble plus ou moins continu de phénomènes liés au transport de matériaux solides et d'eau. Elle fixe également le vocabulaire que l'on utilisera ici, sachant que la multiplicité des communautés scientifiques a également entraîné le foisonnement de termes descriptifs et donc une certaine confusion. Classiquement, on retient que l'hydraulique est l'étude des écoulements d'eau, écoulements qui peuvent être chargés de particules solides à des concentrations solides suffisamment faibles pour

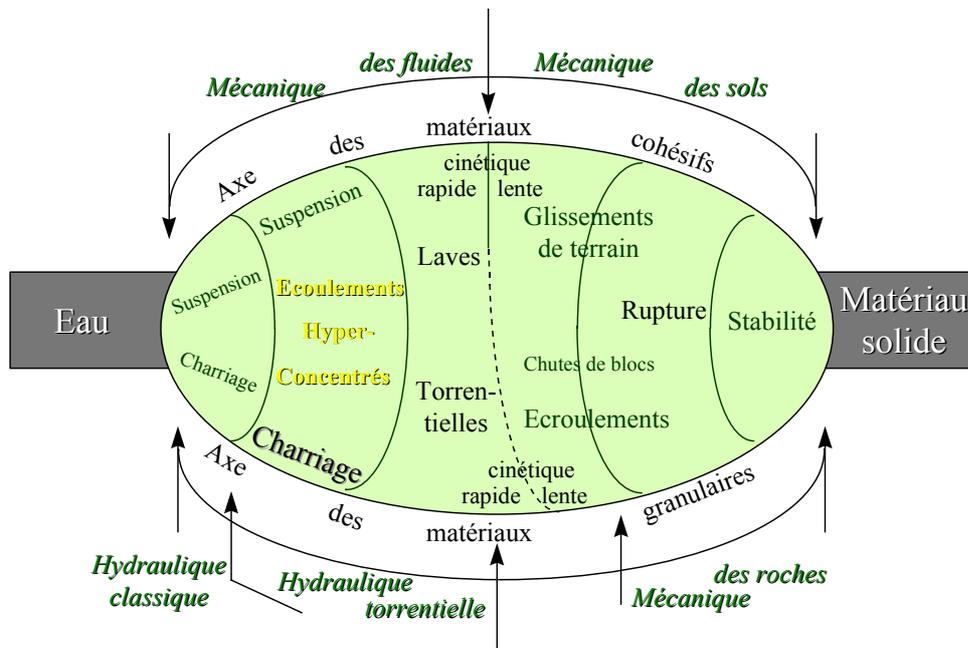


Figure 3.1 Phénomènes et disciplines d'étude. D'après [31].

que la phase solide n'ait pas de rôle dynamique notable. À l'opposé, la mécanique des sols a pour objet le comportement de sols, qui peuvent être saturés d'eau ou non. L'hydraulique torrentielle se situe à mi-chemin entre les deux disciplines. Sur la figure 3.1, nous avons volontairement placé l'hydraulique torrentielle plus proche de l'hydraulique, car toutes deux ont en commun qu'elles étudient des écoulements à très grandes déformations au contraire de la mécanique des sols qui examine le comportement des matériaux aux petites et moyennes déformations.

Nous avons fait également apparaître dans la figure 3.1 une première typologie d'écoulements étudiés par l'hydraulique torrentielle :

- les écoulements hyperconcentrés ;
- les laves torrentielles.

La première classe d'écoulement est en continuité avec le transport solide par charriage et suspension qui existe dans les cours d'eau de plaine. Mais la concentration solide (définie ici comme le rapport de volume solide sur le volume total) y est telle (jusqu'à 30 %) que la phase solide commence à jouer un rôle dynamique important et empêche l'application des outils classiquement utilisés en hydraulique d'eau claire. La seconde classe d'écoulement est spécifique au domaine torrentiel, sans équivalent dans les cours d'eau de plaine. Elle regroupe un ensemble d'écoulements en masse, fortement chargés en solide (concentration solide supérieure à 60 %) et d'aspect assez similaire à des écoulements de laves volcaniques, ce qui leur a valu leur désignation en langue française. Pour l'heure, il semble que ces deux classes d'écoulements soient distinctes et donc notamment qu'il y ait une saute de concentration très significative entre un écoulement hyperconcentré et une lave torrentielle

3.2 Problèmes posés en hydraulique torrentielle

3.2.1 Problématique de la protection torrentielle

Estimation des crues dommageables

La principale menace causée par les torrents est le risque de débordement sur les cônes de déjection, en général urbanisés dans les massifs européens. De ce fait, la plupart des études en ingénierie visent à une étude des désordres potentiels que peuvent causer les torrents sur les cônes de déjection et aux moyens de s'en protéger. La logique des études d'ingénierie suit à peu près celle pratiquée pour de l'hydraulique d'eau claire à ceci près que plusieurs formes d'écoulements sont possibles compte tenu du transport solide. La première étape à franchir dans l'étude du fonctionnement d'un torrent est donc de déterminer le type de transport solide prédominant, le plus fréquent ou le plus dommageable. Cela se fait classiquement par la recherche des événements passés ainsi que par une analyse géomorphologique et hydrologique du site. Pour chacune des classes de transport solide (charriage ou lave torrentielle), un certain nombre d'outils ont été développés pour étudier les écoulements torrentiels sur des cônes de déjection (cf. infra).

Estimation des volumes interannuels

Les torrents s'intègrent dans des systèmes hydrologiques complexes, puisqu'ils sont également des affluents de cours d'eau. La production interannuelle de sédiments (production de sédiments moyenne sur plusieurs années) est alors une donnée intéressante dans la gestion des apports en sédiments dans les grands bassins-versants. En effet, dans les problèmes liés à l'extraction de sédiments dans les lits mineurs ou bien ceux associés à l'évolution des cotes de fond (enfouissement ou bien exhaussement) après l'aménagement d'ouvrages hydrauliques, l'estimation des apports de sédiments par les différents torrents affluents est d'une grande importance. La mauvaise gestion du transport solide dans un cours d'eau peut amener à des problèmes graves tels que l'enfoncement du lit. Ce fut par exemple le cas de l'Arve au Fayet (Haute-Savoie), où l'enfoncement du lit atteint des valeurs exceptionnelles (12 m) à la suite de la construction d'un barrage à l'amont.

3.2.2 Les stratégies de protection

Comme en génie paravalanche (voir le chapitre précédent), il existe plusieurs stratégies de protection torrentielle. Les deux critères de classification sont :

- l'existence ou non d'une intervention humaine (défense permanente réalisée sans intervention et défense temporaire fondée sur une prise de décision)
- le point d'intervention (défense active dans la zone de départ et défense passive sur le cône de déjection).

On reporte dans le tableau 3.1 un récapitulatif sommaire des avantages et inconvénients de chaque stratégie. La stratégie de défense permanente met en œuvre des techniques opérationnelles sans intervention humaine. On recherche une protection par des ouvrages fixes et pérennes :

- la défense permanente passive : elle consiste à lutter contre les effets des écoulements torrentiels (en général sur le cône de déjection), sans se préoccuper des conditions de déclenchement. Il s'agit :
- soit de laisser passer l'écoulement torrentiel en l'endigant (cunette, canal), en le détournant latéralement ou en recentrant l'écoulement (digue),
- soit de freiner voire d'arrêter l'écoulement dans sa phase d'arrêt (plage de dépôt, ouvrage essoreur),
- soit de renforcer les constructions à protéger de telle sorte qu'elles résistent à l'impact des écoulements torrentiels si on ne peut ou ne veut agir directement sur l'écoulement ;

- la défense permanente active : dans ce cas, il s’agit de lutter contre les facteurs favorables à la formation des écoulements torrentiels en fixant le matériau dans la zone de départ (ou en le stockant) et d’empêcher sa mise en mouvement. On y parvient en aidant la stabilité du lit grâce à des ouvrages de soutien (seuils, barrages) et/ ou en reboisant quand cela est possible.

La stratégie de défense temporaire nécessite l’observation du torrent et implique une prise de décision (humaine ou automatique) : il s’agit en effet de prendre des mesures limitées dans le temps (tant qu’il y a risque), telle que des interdictions temporaire de circulation (feux rouges déclenchés par un détecteur de lave torrentielle par exemple), des mesures administratives d’évacuation des zones menacées, etc. Ces dernières relèvent en général d’un règlement : l’autorité prend la décision, dont elle est responsable, elle doit prévoir des plans d’alerte, de secours ou d’intervention.

Tableau 3.1 *Récapitulatif des stratégies de défense contre les écoulements torrentiels..*

	Défense active permanente	Défense passive permanente	Défense passive temporaire
Type d’actions	<ul style="list-style-type: none"> – Reboisement, revégétalisation (plantation, semis) – Modification de l’écoulement d’eau (puits, dérivation) – Consolidation du lit et des berges (seuil, barrage) 	<ul style="list-style-type: none"> – Déviation, canalisation (galerie, digue, canal surélevé) – Freinage : tas, dent, obstacle, ouvrage essoreur – Arrêt : digue – Stockage : plage de dépôt – Zonage (PPR) – Adaptation : renforcement des constructions 	<ul style="list-style-type: none"> – Réglementaire : évacuation, consignation – Automatique : détecteurs routiers (feux rouges), signalisation
Niveau de sécurité	bon si bien conçu, bien adapté au contexte et entretenu	bon si bien conçu	insuffisant pour des habitations, mais adapté à des routes
Investissement	très élevé	élevé à très élevé	faible
Coût en entretien	élevé	faible à élevé	très faible
Avantage(s)	techniques solides et éprouvées	large éventail de solutions techniques	facilité de mise en œuvre, rapport qualité/ prix
Inconvénient(s)	pérennité, efficacité parfois incertaine (fragilité), entretien pénalisant pour le maître d’ouvrage	insertion dans le site, curage, parfois facteur aggravant (flottants, stock de matériau en cas de rupture, risque de déstabilisation du lit à l’aval)	temps de propagation des écoulements torrentiels parfois trop court pour une mise en alerte efficace



Figure 3.2 Construction de la plage de dépôt du Pissot au-dessus de Villeneuve (Vaud) en 1996 (C. Ancey).



Figure 3.3 Voiture poussée par une lave torrentielle dans le Valgaudemar en France (C. Ancey).



Figure 3.4 *Protection de Schlans (Grisons) en 2004 (C. Ancey).*



Figure 3.5 *Dommage à Schlans (Grisons) en 2000 (DR).*



Figure 3.6 *Domage à Brigue (Valais) lors du débordement de la Saltina (Valais) en septembre 1993 (DR).*

3.3 Typologie des écoulements torrentiels

3.3.1 Le système torrentiel

La notion de torrent renvoie à l'idée de cours d'eau à forte pente, typiquement le long d'un versant montagneux. C'est aussi ce critère qui est retenu dans les classifications des cours d'eau. Ainsi, selon Bernard [32] :

- lorsque la pente moyenne longitudinale du lit excède 6 %, on parle de *torrent* ;
- lorsqu'elle est comprise entre 1 et 6 %, il s'agit de *rivière torrentielle* ;
- lorsqu'elle ne dépasse pas 1 %, c'est une *rivière*.



Figure 3.7 *Le torrent de Brandy en Maurienne (Cliché C. Ancy).*

Un autre ingrédient fondamental du système torrentiel est la fourniture en matériaux solides. Selon la nature des sols et la configuration du relief, les versants peuvent apporter aux torrents une grande quantité de matériaux de toute taille. La situation est donc très différente de celle des cours d'eau de plaine où le matériau solide transporté soit provient de l'amont immédiat, soit a été repris dans le lit majeur

alluvionnaire. Dans ces deux derniers cas, il s'agit de matériaux déjà triés, de granulométrie nettement moins étendue (limons, sables, graviers) que pour les torrents. Enfin, le dernier ingrédient du système est l'eau elle-même. Les faibles dimensions d'un bassin-versant torrentiel (de quelques ha à quelques km²) et des pentes prononcées rendent les crues soudaines, violentes, et courtes. Le régime des crues est donc très différent également de celui des cours d'eau de plaine, qui se caractérisent en effet par une dynamique bien plus lente et étalée dans le temps. La figure 3.8 schématise un bassin-versant typique. La partie supérieure, appelée parfois bassin de réception, est généralement plus ou moins dégradée (versant érodé, éboulis, mouvement de terrain, etc.). Elle fournit à la crue torrentielle la majeure part de l'eau et (plus ou moins directement) du matériau solide. Le torrent a le plus souvent taillé son lit dans une gorge, plus ou moins abrupte selon la nature du sol en place, appelée chenal d'écoulement. Enfin la partie aval du bassin-versant s'ouvre en général assez largement et est recouverte des matériaux transportés par le torrent au fil du temps, d'où son nom de cône de déjection.

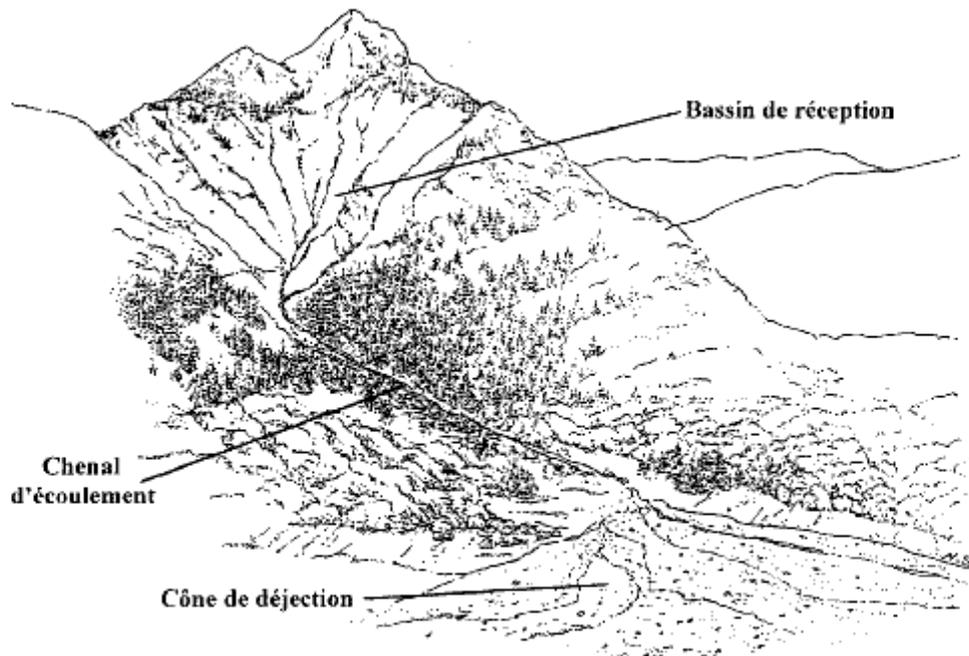


Figure 3.8 Schématisation d'un bassin-versant torrentiel. Ill. Nicole Sardat.

En rivière de plaine, le transport solide est dû essentiellement à l'action de l'eau, qui entraîne les matériaux solides soit en les poussant au fond (charriage), soit en les maintenant en suspension sous l'effet de la turbulence. Dans le contexte torrentiel, les pentes atteignent des valeurs suffisamment fortes pour que la gravité commence à influencer sur la dynamique d'entraînement des particules. Cela a pour conséquences d'une part une intensification des processus de transport par charriage, d'autre part un nouveau mode de transport solide : la lave torrentielle. Le tableau 3.2 récapitule les principales caractéristiques de ces deux modes de transport, que nous allons détailler ci-après. La figure 3.9 représente deux états distincts du transport solide tel qu'on peut le simuler en laboratoire :

- à gauche, à une pente pas encore trop forte (17 %), le transport solide se fait par charriage, c'est-à-dire roulement et glissement des particules au fond du lit sous l'effet de la poussée de l'eau ; les particules les plus fines sont en suspension.
- à droite, à une forte pente (27 %), le transport solide se fait sous forme d'une bouffée solide, où phases solide et liquide sont intimement liées, et qui semble s'écouler comme un fluide très visqueux.

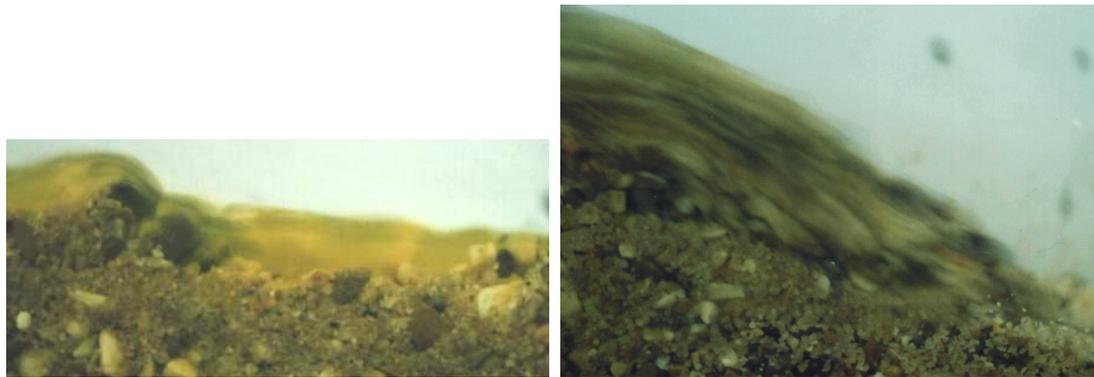


Figure 3.9 *Transport solide par charriage (à gauche) et sous forme de bouffée de lave torrentielle (à droite). Photo. C. Ancey.*

Tableau 3.2 *tableau synoptique des principales caractéristiques des phénomènes torrentiels.*

	caractéristiques phénoménologiques	caractéristiques mécaniques
lave torrentielle	<ul style="list-style-type: none"> – écoulement en masse, avec zone de dépôt nette sur le cône de déjection – parfois des formes particulières de dépôts : bourrelets latéraux, lobes frontaux – capacité de transport de gros blocs 	<ul style="list-style-type: none"> – à l'échelle macroscopique, un fluide <i>monophasique</i> – concentration volumique solide supérieure à 60 % – fluide non Newtonien, lois de comportement de type viscoplastique, ou frictionnel-visqueux, frictionnel-collisionnel
transport solide par charriage	<ul style="list-style-type: none"> – transport de blocs, dont le diamètre maximal correspond <i>grosso modo</i> à la hauteur d'écoulement – pente de quelques dixièmes de % à plusieurs % 	<ul style="list-style-type: none"> – écoulement biphasique (nette séparation de la phase liquide et solide, vitesses des deux phases différentes) – concentration solide en débit inférieure à 30 %

3.4 Les laves torrentielles

3.4.1 Classification des phénomènes

Nous avons cherché à dresser une classification des laves torrentielles. Dans la mesure où nous nous intéressons aux phases d'écoulement et d'arrêt des laves torrentielles et où nous préférons nous situer dans un cadre opérationnel, il est clair que nous avons cherché à fonder cette classification sur des critères caractéristiques de l'écoulement qui soient quantifiables (pente d'écoulement, forme de dépôt, etc.). Il est évident que d'autres typologies sont possibles ; elles peuvent être justifiées par d'autres intérêts que la spécification des caractéristiques de l'écoulement¹. Il n'est pour l'heure pas certain que toutes les terminologies en usage en Europe se recoupent (la situation est encore plus confuse à l'échelle internationale avec les américains et les asiatiques) et il convient de bien garder à l'esprit le risque d'amalgame qu'est susceptible d'engendrer cette situation. Nous proposons ci-après des termes nouveaux pour désigner les familles de lave torrentielle : s'il y a risque de rendre notre terminologie un peu plus lourde, nous espérons également éviter le risque de confusion.

Pour construire cette classification, nous nous sommes fondés à la fois sur des éléments issus d'observations de terrain, des séries d'essais en laboratoire, et des analyses théoriques sur le comportement des mélanges de particules solides dans de l'eau. Un soin particulier a été apporté à vérifier que l'on n'a pas oublié une classe de comportement. Nous arrivons finalement à trois familles de lave torrentielle. Nous reportons dans le tableau 3.3 la classification des laves torrentielles fondée sur des critères de terrain et de laboratoire.

1. Ainsi, en vue de relier l'activité torrentielle aux caractéristiques géomorphologiques et géotechniques des zones de départ, l'équipe de Roger Cojean (École des Mines de Paris) a récemment proposé une classification des laves torrentielles fondée sur des critères granulométriques du matériau mobilisé.

Tableau 3.3. Classification des laves torrentielles.

	<i>Lave torrentielle à comportement viscoplastique</i>	<i>Lave torrentielle à comportement collisionnel</i>	<i>Lave torrentielle à comportement frictionnel-visqueux</i>
<i>Nom scientifique proposé</i>	<i>Lave torrentielle à comportement viscoplastique</i>	<i>Lave torrentielle à comportement collisionnel</i>	<i>Lave torrentielle à comportement frictionnel-visqueux</i>
<i>Nom commun</i>	<i>Lave torrentielle boueuse</i>	<i>Lave torrentielle granulaire</i>	<i>Lahar</i>
Caractéristiques de terrain	Régulier, avec des limites assez bien définies, encore fluide quand saturé d'eau, très cohésif quand sec	Chaotique avec des limites pas nécessairement franches, pas de cohésion des dépôts	En forme de terrasse alluvionnaire, cohésion suffisante pour supporter le poids d'un homme
Forme des bourrelets et des lobes	Forme arrondie plane	Pas de bourrelet	
Pente de la zone d'arrêt	>5%	>15 %	>0,1 %
Rhéologie	Loi de comportement viscoplastique (Bingham, Herschel-Bulkley)	Loi de comportement de type Coulomb	Loi de comportement Coulomb aux faibles vitesses et Newton aux fortes vitesses
Granulométrie	Matrice fine importante avec quantité importante d'argiles	Matrice fine faible, peu d'argiles	Matrice fine importante avec peu d'argiles et beaucoup de silts
Essais d'identification des sols	Sols argileux	Sols grossiers	Sols limoneux, le plus souvent d'origine volcanique
Vitesse observée (m/s)	1-30	?	1-30
Témoignages			

Nous joignons ci-après quelques éléments typiques qui permettent de se faire une idée sur la nature d'une lave torrentielle. Nous commençons par les observations de terrain. L'un des premiers points à regarder est la forme des dépôts de lave torrentielle.

► Les laves torrentielles à comportement viscoplastique (ou boueuses) sont caractérisées généralement par des dépôts aux limites bien nettes. La surface libre est douce ; elle s'incurve régulièrement de son front (généralement très raide) vers son centre. Sur la photographie 3.10 illustrant le dépôt de lave torrentielle du torrent du Ravin des Sables (Hautes-Alpes), on retrouvera bien ces deux caractéristiques : limites franches et forme régulière du dépôt. Naturellement, selon la composition granulométrique du matériau mobilisé, la surface du dépôt peut présenter une rugosité plus ou moins marquée, mais considérée grossièrement, elle conserve un profil régulier.

La photographie 3.11 montre le lobe frontal d'une bouffée de lave torrentielle au Saint-Antoine (Isère) : quoique localement très irrégulier, le profil du dépôt possède néanmoins un caractère globalement régulier, qui s'observe de manière évidente sur le reste du dépôt comme le montre la photographie 3.12. Les bourrelets latéraux sont également des témoins précieux quand on arrive à en trouver le long du chenal d'écoulement : en forme de cordons réguliers au sommet arrondi, ils encadrent le lit du torrent, marquant ainsi les limites latérales d'une précédente lave torrentielle.

La photographie 3.13 prise sur le torrent du Riou Sec (Hautes-Alpes) le montre bien. Naturellement, là encore, le profil du bourrelet peut être plus ou moins grossier selon la granulométrie du matériau transporté.

La photographie 3.14 montre un bourrelet latéral assez grossier consolidé d'une lave torrentielle survenue dans le lit du Saint-Julien (Savoie). Tous les dépôts de lave torrentielle boueuse sont très cohésifs. Une fois secs, ils supportent sans problème le poids d'un homme. Saturés d'eau, ils conservent pendant quelques jours un caractère fluide : on s'y enfonce sans problème et le matériau est très collant. Notons que, parfois, la première impression qui se dégage de l'observation d'un dépôt est la prédominance de blocs grossiers (la photographie n° 6 en est un exemple). Il faut bien prendre garde et ne pas qualifier trop rapidement la lave torrentielle de granulaire sur cette seule constatation : un exemple est donné par la lave torrentielle du torrent du Ravin des Sables (photographies 3.10 et 3.15), qui malgré le caractère très rocaillieux de la surface de son dépôt, est à classer parmi les laves torrentielles boueuses.

► Les laves torrentielles « granulaires » sont plutôt caractérisées par des dépôts d'allure chaotique. Les limites des dépôts ne sont pas toujours franches : en effet, leur forte perméabilité entraîne un essorage rapide de l'eau, qui continue à entraîner avec elle les particules les plus fines et les graviers. Les traces d'essorage sont souvent visibles hors du lit torrentiel ; elles sont bien plus difficiles à détecter lorsque la lave torrentielle s'est écoulée dans le lit mineur du torrent sans déborder. Les dépôts comportent souvent une grande proportion de blocs grossiers sans matrice. La cohésion est faible voire nulle.

La photographie 3.16 prise sur le torrent du Bez (Hautes-Alpes) montre le dépôt d'une lave torrentielle granulaire. On notera que le dépôt s'apparente à un amas informe de blocs très grossiers et assez instable (quand on marche dessus).

La photographie 3.17 montre un lobe frontal d'une lave torrentielle du torrent de la Creusaz (Haute-Savoie) : on y observe nettement la séparation entre les gros blocs amassés sans matrice interstitielle et la partie fine (silts, sables fins) déposée à son pied. Les bourrelets latéraux de lave torrentielle granulaire évoquent des tas de sable : ils sont sans cohésion (ils supportent difficilement le poids d'un homme) ; ils présentent des arêtes assez vives et des surfaces libres assez planes. La photographie 3.18 en montre un exemple sur le torrent du Bez.

► Les laves torrentielles de type lahar sont très faciles à caractériser. Les dépôts sont souvent sous forme de terrasse et font penser à des dépôts alluvionnaires. La surface libre est très régulière et presque horizontale. Les bourrelets frontaux et latéraux sont difficiles à remarquer tant ils sont peu marqués. La cohésion des dépôts n'est pas très forte mais en tout cas suffisante pour supporter le poids d'un homme et donner lieu à des tranches de dépôt proches de la verticale. La photographie 3.19 montre un exemple de ces dépôts sous forme de terrasse dans le lit du Boscodon (Hautes-Alpes). Cet exemple est à rapprocher de ce que l'on observe pour des lahars en terrain volcanique (tel que l'illustre la photographie 3.20 prise non loin du Pinatubo aux Philippines).



Figure 3.10 *Ravin des Sables* (C. Ancey).



Figure 3.11 *Torrent du Saint-Antoine dans l'Isère, juin 1998* (C. Ancey).



Figure 3.12 *Torrent du Saint-Antoine dans l'Isère, juin 1998 (C. Ancey).*



Figure 3.13 *Torrent du Riou Sec, juin 1996 (C. Ancey).*



Figure 3.14 *Torrent du Saint-Julien, juillet 1995 (C. Ancey).*

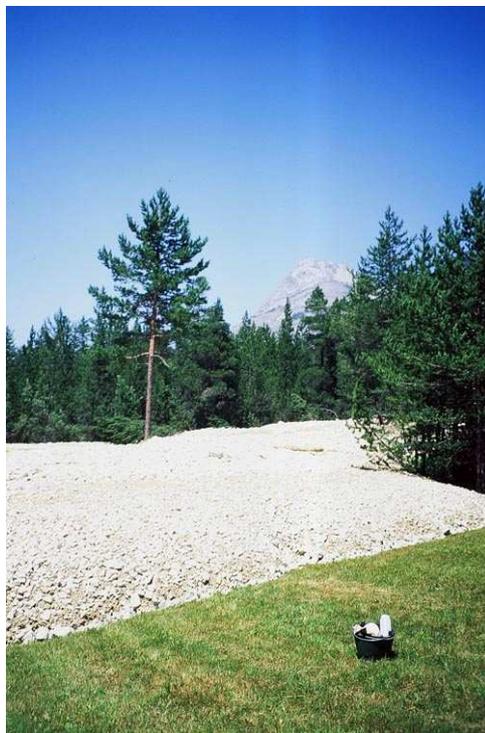


Figure 3.15 *Ravin des Sables, juillet 1995 (C. Ancey).*



Figure 3.16 *Torrent du Bez, juillet 1996 (C. Ancey).*



Figure 3.17 *Torrent de la Creusaz, juillet 1996 (C. Ancey).*



Figure 3.18 *Torrent du Saint-Julien, juillet 1995 (C. Ancey).*



Figure 3.19 *Torrent du Boscodon, août 1998 (C. Ancey).*



Figure 3.20 Lahar sur les flancs du Pinatubo, juillet 1994 (M. Zimmermann, Geo 7).

3.4.2 Étude au laboratoire

L'étude en laboratoire permet de mettre en évidence un certain nombre de propriétés caractéristiques pour les différentes familles de lave torrentielle. Parmi les essais les plus fréquemment réalisés sur des échantillons de matériaux mobilisés par des laves torrentielles se trouvent les essais dits d'identification, qui permettent en mécanique des sols de se faire une idée sur la nature du matériau. Ceux-ci comportent notamment la mesure de la courbe granulométrique.

Une grande partie de l'origine des différences de comportement mécanique entre laves torrentielles provient en fait des caractéristiques de la partie fine du matériau et, pour cette raison, il est plus pertinent de travailler sur la distribution granulométrique de la partie fine que de dresser une courbe granulométrique complète du matériau transporté. Pour l'instant, de manière quelque peu arbitraire mais conforme à l'usage en mécanique des sols, nous appelons « matrice » la partie fine du matériau de diamètre moyen inférieur à $400 \mu\text{m}$. Nous avons reporté sur la figure 3.21 quelques exemples de courbe granulométrique de la matrice. Trois échantillons ont été prélevés sur des dépôts frais de lave torrentielle boueuse : au Saint-Antoine (Isère), sur le torrent des Rasses (Haute-Savoie), et au Poucet (Savoie). Un échantillon a été recueilli sur le cône de déjection du torrent du Boscodon (Hautes-Alpes) : il s'agit d'un dépôt frais de lave torrentielle de type *lahar*. Un autre a été prélevé au sein d'un bourrelet d'une lave torrentielle granulaire du torrent de la Grande Combe (Hautes-Alpes).

On note pour ces cinq échantillons un comportement assez typique (mais plusieurs exceptions à cette règle ont été observées) :

- les laves torrentielles de type *lahar* sont plutôt composées de matériaux très fins mais faiblement colloïdaux (ce ne sont pas des argiles). Dans le cas particulier du Boscodon, on trouve $d_{50}=8 \mu\text{m}$;
- à l'opposé, les laves torrentielles granulaires sont riches en particules grossières (sables fins, silts). Dans le cas particulier du torrent de la Grande Combe, on trouve $d_{50}=42 \mu\text{m}$;
- intermédiaires entre les deux précédentes classes de comportement, les laves torrentielles boueuses sont plutôt riches en matériaux fins argileux. Dans le cas des trois torrents mentionnés sur la figure 3.21, on trouve que le diamètre moyen d_{50} est compris entre 7 et $14 \mu\text{m}$.

La distribution granulométrique est l'un des principaux facteurs qui influe sur le comportement mécanique d'une lave torrentielle. La raison en est que la nature des contacts entre particules dépend prin-

cipalement de leur taille :

- les particules fines colloïdales (argiles) interagissent plus ou moins violemment avec l'eau (forces électriques de van der Waals), ce qui confère au mélange sa cohésion ;
- les particules fines non colloïdales interagissent entre elles sous l'effet des forces hydrodynamiques : l'inertie des particules est faible par rapport à l'inertie du fluide et tous les contacts entre particules sont lubrifiés, ce qui explique le caractère visqueux du mélange ;
- les particules grossières interagissent entre elles par frottement et chocs : son inertie étant faible par rapport à celle des particules, le fluide ne parvient plus à lubrifier les contacts et les contacts directs frottants sont majoritaires, ce qui explique le caractère frictionnel du mélange.

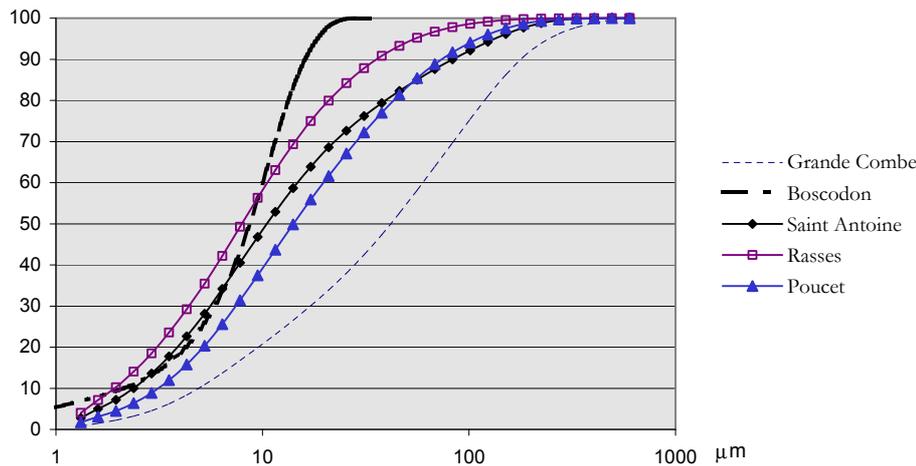


Figure 3.21 Courbes granulométriques de matériaux de lave torrentielle pour cinq torrents (passant à 400 mm). Courbes réalisées à partir du granulomètre laser Malvern.

Même si l'on tient compte de toute l'étendue granulométrique, l'influence de la partie matricielle est essentielle car elle lubrifie les contacts des grosses particules : c'est donc bien elle qui impose son comportement au matériau complet. Les essais en rhéomètre de laboratoire ont montré des propriétés propres à chacune des classes de comportement (voir figure 3.22) :

- pour le comportement viscoplastique : il existe un seuil de contrainte (la contrainte au sein du matériau doit dépasser une valeur critique pour qu'il y ait écoulement) τ_c et, aux fortes vitesses, le comportement est dit rhéofluidifiant (la résistance au cisaillement exercée par le fluide croît de manière non linéaire avec la vitesse de cisaillement : $\tau \propto \dot{\gamma}^n$, avec $n < 1$). Une loi de comportement à trois paramètres comme la loi de Herschel-Bulkley permet en général de caler correctement les données expérimentales : $\tau = \tau_c + K\dot{\gamma}^n$;
- pour le comportement frictionnel (ou frictionnel-collisionnel) : la contrainte de cisaillement dépend à la fois de la contrainte normale (σ) et de la vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$) : $\tau = f(\sigma, \dot{\gamma})$. Pour les essais de cisaillement réalisés en laboratoire, on trouve en général une indépendance de la contrainte de cisaillement vis-à-vis de la vitesse de cisaillement : $\tau = k(\varphi)\sigma$, avec k un paramètre qui dépend principalement de l'angle de frottement interne du matériau ($\tan \varphi$). Sur la figure 3.22, le rhéogramme apparaît donc comme plat. (Attention, la loi de comportement dans le régime frictionnel-collisionnel est complexe et la dépendance vis-à-vis de la vitesse de cisaillement n'apparaît pas toujours explicitement : en fait, d'une manière un peu similaire à la turbulence, la loi de comportement n'est pas intrinsèque mais dépend également de la façon dont se fait la dissipation d'énergie) ;
- pour le comportement frictionnel-visqueux : aux faibles vitesses de cisaillement, on a affaire à un comportement frictionnel pur ($\tau = k(\varphi)\sigma$) alors qu'aux fortes vitesses, on a affaire à un comportement visqueux ou bien rhéofluidifiant (le seuil de contrainte est généralement négligeable ici) : $\tau = \dot{\gamma}^n$, avec $n \approx 1$. La transition s'explique principalement par la lubrification des contacts

sous l'effet de l'augmentation de la vitesse de cisaillement. A signaler que le comportement se distingue par une hystérésis selon le sens de la variation de la vitesse de cisaillement : en effet, si l'on part du régime visqueux et que l'on diminue la vitesse de cisaillement au-dessous de la vitesse critique ($\dot{\gamma}_c$), on ne retombe pas sur le régime frictionnel mais on reste dans la continuité du régime visqueux : le fluide se comporte encore comme un liquide.

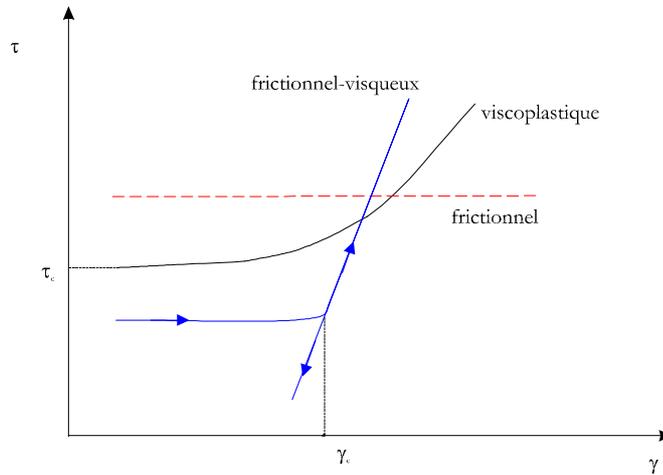


Figure 3.22 Rhéogramme schématisé pour les trois classes de comportement.

Naturellement, ces différences de comportement ont des implications importantes au niveau du comportement global des laves torrentielles, notamment en termes de pente d'écoulement (paramètre de prime importance pour le zonage) :

- pour le comportement frictionnel-visqueux, l'existence d'une hystérésis explique qu'une fois qu'ils ont été fortement cisailés, les matériaux soient capables de s'écouler sur des pentes très faibles (moins de 1 %) ;
- pour le comportement frictionnel-collisionnel, l'intensité de la dissipation (par frottement) explique pourquoi les matériaux ont du mal à s'écouler sur des pentes moyennes (de moins de 20 %) ;
- pour le comportement viscoplastique, l'existence d'un seuil de contrainte explique que les matériaux peuvent se figer assez brusquement à l'arrêt dès que la pente devient trop faible (entre 5 et 15 % en général).

On pourrait de même comparer les comportements en termes de vitesse d'écoulement ou d'impact sur des obstacles. En bref, retenons que les caractéristiques rhéologiques des matériaux mobilisés par les laves torrentielles ont d'importantes répercussions sur le comportement global des laves torrentielles. Aussi bien pour le zonage que pour l'étude d'une correction torrentielle, il est donc primordial d'évaluer le type de lave(s) torrentielle(s) s'écoulant dans le bassin-versant étudié.

3.5 Le transport solide par charriage

3.5.1 Mise en mouvement

Dans le charriage, la phase liquide est l'élément essentiel de la dynamique du transport. Nous nous contenterons ici d'indiquer une vue phénoménologique générale en présentant les différents régimes observés et leurs caractéristiques en fonction du débit liquide. Aux faibles débits, la force de l'eau n'est pas suffisante pour entraîner les particules et aucun transport n'est observé (si ce n'est un transport résiduel de particules fines en suspension). À partir d'un certain seuil de débit, l'eau a suffisamment de force pour commencer à entraîner des particules : on parle de début du transport et le débit d'eau

correspondant est appelé seuil de début de transport. Comme en hydraulique fluviale, il peut être plus ou moins bien évalué à l'aide d'un nombre sans dimension, appelé nombre de Shields [33, 34] :

$$Sh = \frac{\tau_p}{gd(\rho_p - \rho_f)}$$

où τ_p est la contrainte au fond (contrainte exercée par l'écoulement d'eau sur le fond), \bar{d} le diamètre moyen des particules sur le fond, ρ_p leur masse volumique et ρ_f celle de l'eau. Le nombre de Shields traduit *grosso modo* le rapport entre la force motrice de cisaillement exercée par le fluide en écoulement et la force résistante due à la gravité effective (c'est-à-dire le poids volumique déjaugé correspondant au poids de la particule diminué de la force de pression exercée par le fluide).

Expérimentalement, on observe qu'il y a mise en mouvement de matériaux lorsque le nombre de Shields dépasse une valeur critique prise en général autour de 0,05 pour un matériau uniforme (c'est le cas des rivières à fond composé de sables) [33]. Dans la plupart des cas pratiques (rivières à fond composé de graviers), la distribution granulométrique est étendue et les diverses expériences et mesures *in situ* donnent des valeurs du nombre de Shields comprises entre 0,02 et 0,2 [35].

3.5.2 Tri granulométrique, structure du lit, et pavage

L'existence d'une granulométrie étendue conduit par ailleurs à l'apparition de nouveaux phénomènes liés au *tri granulométrique*. Ainsi, on observe en général que le début d'entraînement de matériaux ne concerne au début qu'une fraction du matériau : ce sont les matériaux les plus fins en surface qui sont les plus faciles à entraîner. Si de telles conditions perdurent, cela conduit à un appauvrissement en matériaux fins à la surface du lit et une fois la surface du lit érodée de la fraction fine, il n'y a plus entraînement de matériaux sur ce secteur. Ce processus d'érosion entraînant un appauvrissement en particules fines contribue à ce que l'on appelle le pavage du lit, qui aboutit à une plus grande imbrication des éléments grossiers de la surface du lit [34, 36]. Lorsque le transport solide n'affecte qu'une certaine fraction granulométrique, un *tri granulométrique* s'opère au sein du matériau en mouvement.

Un des effets de ce tri est la formation de *structures morphologiques* à la surface du lit, qui interagissent avec l'écoulement d'eau en augmentant la dissipation d'énergie. Ce processus complexe d'interactions entre fond mobile, transport solide, et lame d'eau se traduit souvent par des propriétés remarquables : pour un écoulement à fond mobile et pas trop contraint latéralement, on observe ainsi qu'en moyenne, le nombre de Froude \bar{u}/\sqrt{gh} (avec \bar{u} la vitesse moyenne de l'écoulement d'eau et h sa hauteur) tend vers la valeur critique 1 par excès (séparant le régime fluvial du régime torrentiel) alors que, dans le même temps, aucune corrélation significative n'existe entre débits solide et liquide [39]. On parle souvent de *transport solide partiel* pour désigner ce type de transport solide. Les structures morphologiques qui apparaissent dépendent de la possibilité qu'a l'écoulement de changer de direction. Dans le cas des écoulements canalisés, on observe en général la formation de structures appelées anti-dunes, qui se déplacent en sens inverse du courant [40]. Dans le cas des écoulements libres (non contraints latéralement), on observe, au moins à échelle réduite au laboratoire, la formation de structures très particulières appelées dunes à forte pente [37]. Une dune à forte pente est composée de trois parties interdépendantes [38, 37] :

- a) un entonnoir concave amont qui collecte les filets liquides et s'étend vers l'amont par érosion régressive, s'agrandissant et collectant ainsi le matériau solide,
- b) un chenal central d'apparence filaire, où les éléments solides donnent l'impression de se déplacer aussi vite que l'eau sur un lit tapissé de matériaux fins, enfin, en aval du chenal central,
- c) un cône où s'étalent et s'infiltrent les filets liquides, ce qui obligent les éléments solides grossiers à s'arrêter et dictent l'extension du cône vers l'aval.

Bien évidemment, ces diverses structures morphodynamiques se côtoient dans l'espace sur un même lit alluvial, et comme elles s'agrandissent, le moment de leurs connexions arrive inévitablement ; elles se transforment alors et une nouvelle configuration du lit alluvial s'installe, avec un nouveau pseudo équilibre. Lorsque la décrue se produit, les chenaux les plus élevés en altitude sont progressivement

abandonnés par l'écoulement ; la morphologie des zones alimentées par ces chenaux est alors figée à cet instant de leur évolution par ce tarissement très rapide. Au total, en fin de crue, le lit torrentiel alluvial présente une grande variété de formes correspondant à des zones particulières de dunes à forte pente, éventuellement remodelées en partie par des écoulements postérieurs non encore taris. Ces formes partielles du lit alluvial en fin de crue, ont été fixées à des moments différents de la décrue et sont donc assez souvent enchevêtrées les unes dans les autres. On retrouve des entonnoirs d'érosion régressive entaillant un banc ou un dépôt, des chenaux secondaires plus ou moins perchés, des accumulations de matériau grossier à pente assez forte, qui portent des noms variables selon les auteurs. L'abandon parfois rapide des chenaux secondaires par la décrue explique qu'ils ne soient pas pavés, le pavage étant une couche de surface d'éléments grossiers qui augmente la résistance à l'écoulement (voir la dynamique ci-après). On admet souvent en conséquence que les cours d'eau alluviaux à largeur d'écoulement libre fournissent autant de matériaux au transport solide que le nécessite la puissance de l'écoulement, bref qu'ils fonctionnent à la capacité maximale de transport. Quand le débit liquide augmente fortement, la contrainte pariétale croît également et toute la distribution granulométrique peut être entraînée par l'eau. On parle alors de charriage hyperconcentré (transport total). On observe alors que le débit solide génère peu de tri granulométrique et qu'il dépend à peu près linéairement du débit liquide [37].

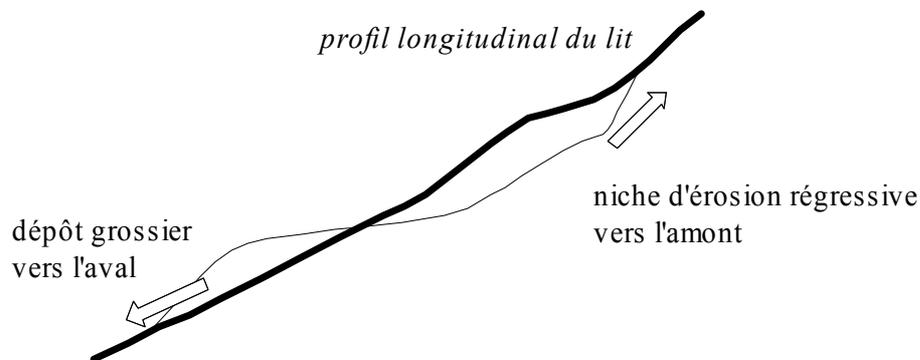


Figure 3.23 Schéma d'une dune à forte pente (coupe longitudinale). D'après [37].

3.5.3 Calcul hydraulique

En comparaison de l'hydraulique d'eau claire et du transport solide dans les cours d'eau à faible pente (moins de 1 %), dont les mécanismes physiques impliqués ont fait l'objet d'études scientifiques intensives et pour lesquels les outils développés pour l'ingénierie sont abondants, les connaissances et les outils en hydraulique torrentielle apparaissent bien en retrait. Dans la plupart des modèles déterministes, les ingrédients employés sont les suivants [41] :

- une description de la phase liquide par les outils traditionnels de l'hydraulique d'eau claire. Cela passe par exemple par l'emploi de formules de type Manning-Strickler en régime permanent pour relier débit (par unité de largeur) et hauteur d'écoulement en fonction de la pente du lit et d'un coefficient de rugosité dit de Manning-Strickler K (de l'ordre de 10 à 20 pour un torrent) : $q = K \sqrt{\sin \theta} h^{5/3}$.
- une description du charriage. Elle est en généralement réalisée à travers une relation donnant le débit solide q_s en fonction du débit liquide, des caractéristiques granulométriques du matériau notées ici d , et de la pente : $q_s = f_s(q, d, \theta)$
- une description du lit torrentiel. C'est à la fois la cote du fond z et sa composition granulométrique qui sont étudiées. Le profil longitudinal renseigne sur l'évolution du lit (exhaussement, enfoncement, équilibre) et l'apparition de structures morphologiques (alternance de seuils, de mouilles, de marches d'escalier etc.) qui peuvent accroître la dissipation d'énergie. En général, l'évolution de la cote est trouvée à partir d'une équation de bilan de masse ; on aboutit à une équation de la forme : $\partial z / \partial t = f_z(q, d_z, \theta)$. La granulométrie du fond, notée ici d_z , peut renseigner à la fois

sur les capacités de transport (disponibilité en matériaux mobilisables, pavage, etc.) et la rugosité, donc sur K .

Notons que l'une des difficultés essentielles dans l'étude du transport solide est que les trois ingrédients principaux mentionnés sont en interaction, généralement fortement non linéaire. Comme cela a été fait dans la présentation phénoménologique des écoulements torrentiels (cf. § 2), il est d'usage de considérer en fait trois régimes d'écoulement, qui peuvent être plus ou moins délimités par le nombre de Shields (Il ne s'agit là bien sûr que d'une description très simplifiée, presque caricaturale, de l'ensemble des processus intervenant dans le transport solide par charriage.):

- $Sh < Sh_c$ (avec Sh_c allant de 0,04 à 0,2), il n'y a pas de transport solide significatif par charriage. On peut se contenter d'une description unique de la phase liquide ;
- $Sh > Sh_c$ ($Fr \approx 1$). Il y a un transport solide partiel. Un ensemble de phénomènes complexes prend place : tri granulométrique, pavage, apparition de structures morphologiques (anti-dunes, lit en tresses), etc. Les expériences réalisées au laboratoire mettent en évidence qu'il n'y a pas de relation univoque liant débits solide et liquide, mais qu'au contraire le débit solide est une fonction complexe du transport solide passé, comme l'illustre la figure 3.24. Dans certains, on a observé néanmoins expérimentalement et in situ que, tant que le fond pouvait fournir du matériau à l'écoulement, il peut y avoir une sorte de régulation complexe entre le lit, l'écoulement d'eau, et le transport solide et qu'en moyenne (en moyenne seulement), le nombre de Froude de l'écoulement se fixe à la valeur critique séparant régimes torrentiel ($Fr > 1$) et fluvial ($Fr < 1$), soit à la valeur 1 environ (en fait la valeur critique est une fonction de la pente et de la géométrie du canal, mais les corrections à apporter si on en tenait compte sont peu significatives). Se fondant sur cette observation (dont on connaît encore mal les limites), il est possible de calculer les caractéristiques de la phase liquide, notamment on a : $\bar{u} = \sqrt{gh}$ en moyenne. En revanche, il n'est pas possible d'en déduire le débit solide.
- $Sh \gg Sh_c$. Un écoulement hyperconcentré prend place. Il se traduit par un certain nombre de faits remarquables : destruction des structures morphologiques (pavage, anti-dunes, etc.), mobilité de toutes les classes granulométriques, et forte corrélation entre débits solide et liquide. Un certain nombre de formules ont été calées à partir d'essais en laboratoire sur des matériaux naturels à granulométrie étendue. Le tableau 4 reporte les formules principales applicables en hydraulique torrentielle. Toutes ces formules sont structurellement similaires. De plus, elles donnent la capacité maximale de transport, valable uniquement durant la phase de charriage hyperconcentré lorsque le matériau solide (apporté par l'amont ou le lit) est présent en quantité suffisante. De plus toutes ces formules ne sont en principe applicables qu'à des écoulements contraints, c'est-à-dire sans divagation latérale possible. Les principales différences concernent les variables utilisées. Certains auteurs (Smart et Jaeggi) expriment le débit solide par unité de largeur et en fonction du nombre de Shields, d'autres préfèrent raisonner en débit total et excès de débit liquide (Lefort). Enfin, en complément de ces formules, il est nécessaire de connaître la variation du facteur de rugosité K pour connaître la variation de la lame d'eau. Là encore ce sont le plus souvent des essais en laboratoire qui ont conduit à la formulation de relations empiriques de la forme : $K = f_K(q, h, \theta, d)$. On indique dans le tableau 4 les relations trouvées expérimentalement.

3.5.4 Simulation sur modèles réduits

Comme dans le cas des laves torrentielles, l'utilisation de modèles réduits est pratique pour étudier le charriage torrentiel sur un cône de déjection. Ils présentent le très grand avantage de mieux simuler les phases de transport solide partiel que les modèles numériques fondés sur l'approche déterministe décrite ci-dessus. Ils permettent également de tester le fonctionnement des ouvrages hydrauliques placés le long d'un cours d'eau (ouvrage de protection, piège à sédiment, etc.). Pour être représentatifs d'un cas réel, le modèle réduit et les matériaux doivent être choisis en fonction des critères de similitude à respecter. Pour la phase liquide, c'est principalement le nombre de Froude qui doit être considéré. Pour le transport solide, selon la pratique actuelle, on examine en général le nombre de Shields et le nombre de Reynolds particulière : $Re_p = d\sqrt{gh}\tan\theta/\nu$, avec ν la viscosité cinématique de l'eau.

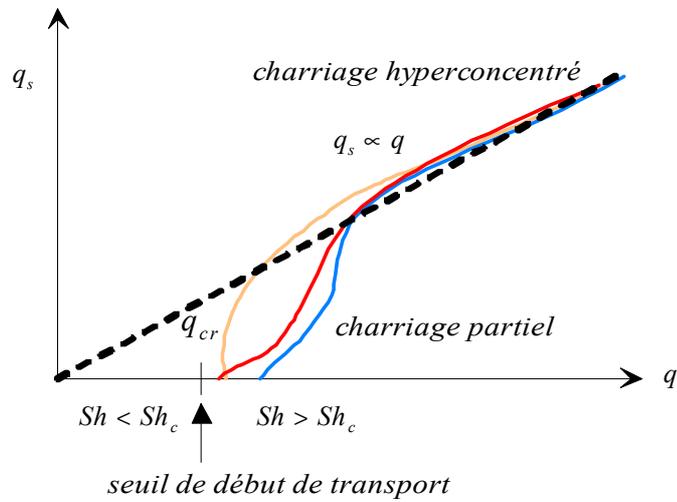


Figure 3.24 Schématisation de la relation entre débits solide et liquide sur un tronçon.

Tableau 3.4 Formule de charriage pour le régime d'écoulement hyperconcentré. d_n indique le quantile correspondant en % (en poids). q : débit par unité de largeur, Q débit total.

Smart & Jaeggi (1983) [42]	$\frac{q_s}{q} = 4 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0,2} \frac{\tan^{0,6} \theta}{\rho_p/\rho - 1} \left(1 - \frac{Sh_c}{Sh} \right)$ <p>avec : $Sh_c = 0,05 \cos \theta (1 - \tan \theta / \tan \varphi)$ et $K = 2,23 \left(\frac{h}{d_{90}} \right)^{0,5} \tan^{-0,21} \theta$</p>
Rickenmann (1990) [43, 44]	$q_s = 12,6 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0,2} \frac{\tan^2 \theta}{(\rho_p/\rho - 1)^{1,6}} (q - q_{cr})$ <p>avec $Sh_c = 0,065 (\rho_p/\rho - 1)^{1,67} \sqrt{g} d_{50} \tan^{-1,12} \theta$ et $K = 1,5 \left(\frac{h}{d_{90}} \right)^{0,5} \tan^{-0,29} \theta$</p>
Lefort (1991)	$\frac{Q_s}{Q} = 4,45 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0,2} \frac{\tan^{1,5} \theta}{\rho_p/\rho - 1} \left(1 - (Q_{cr}/Q)^{0,375} \right)$ <p>avec $Q_{cr} = 0,0776 (\rho_p/\rho - 1)^{2,7} \sqrt{g} d_m^{2,5} (1 - 1,2 \tan \theta)^{2,7} \tan^{-2,14} \theta$</p>

Bibliographie

- [1] F. Valla, *Ski et sécurité* (Glénat, Grenoble, 1991).
- [2] D. M. McClung and P. A. Schaerer, *The Avalanche Handbook* (The Mountaineers, Seattle, 1993).
- [3] W. Munter, *Lawinen, entscheiden in kritischen Situationen* (Agentur Pohl & Schellhammer, Garmisch-Partenkirchen, 1997).
- [4] C. Ancey (coord.), *Guide Neige et Avalanches : Connaissances, Pratiques, Sécurité* (Édisud, Aix-en-Provence, 1998), 2nde édition. Version électronique (libre d'accès) depuis <http://lhe.epfl.ch>.
- [5] F. Sivardière, *Dans le secret des avalanches* (Glénat, Grenoble, 2004).
- [6] C. Ancey, « L'analyse fréquentielle en nivologie : quel enjeu ? ». *Neige et Avalanches* **94** (2001) 12–16.
- [7] La Documentation Française : *Guide méthodologique des plans de prévention des risques d'avalanches*. Voir aussi http://www.prim.net/professionnel/documentation/guide_avalanche/page01.html
- [8] C. Ancey et C. Charlier, « Quelques réflexions autour d'une classification des avalanches », *Revue de Géographie Alpine* **84** (1996) 9–21.
- [9] R. de Quervain, *Avalanche Atlas* (Unesco, Paris, 1981).
- [10] R.M. Iverson, « How should mathematical models of geomorphic processes to be judged? » in *Prediction in Geomorphology* edited by P.R. Wilcock and R.M. Iverson (American Geophysical Union, Washington, D.C., 2003) pp. 83–94.
- [11] C. Ancey, « L'avalanche, l'expert, le modèle ». *Neige et Avalanches* **97** (2002) 17–19.
- [12] M. Meunier, C. Ancey and J.-M. Taillandier, « Fitting avalanche-dynamics models with documented with documented events from the Col du Lautaret site (France) using the conceptual approach », *Cold Regions Science and Technology* **39** (2004) 55–66 ; M. Barbolini, U. Gruber, C.J. Keylock, M. Naaim and F. Savi, « Application of statistical and hydraulic-continuum dense-snow avalanche models to five European sites », *Cold Regions Science and Technology* **31** (2000) 133–149.
- [13] B. Salm, « A short and personal history of snow avalanche dynamics », *Cold Regions Science and Technology*, **39** (2004) 83–92.
- [14] B. Salm, A. Burkard, und H. Gubler, *Berechnung von Fliesslawinen, eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen*, rapport technique 47 (Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos, 1990).
- [15] T. Zwinger, A. Kluwick, and P. Sampl, « Numerical simulation of dry-snow avalanche flow over natural terrain » in *Dynamic response of granular and porous materials under large and catastrophic deformation* edited by K. Hutter and N. Kirchner (Springer, Berlin, 2003) 161–194.
- [16] M. Christen, P. Bartelt, und U. Gruber, « AVAL1D: Numerische Berechnung von Fliess- und Staublawinen » (Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos, 2002) [manuel d'utilisation].
- [17] P. Bartelt and U. Gruber, « Development and calibration of a Voellmy-fluid dense snow avalanche model based on a finite element method », rapport technique 714 (Eidgenössisches Institut für

- Schnee- und Lawinenforschung, Davos, 1997); P. Bartelt, B. Salm, and U. Gruber, « Calculating dense-snow avalanche runout using a Voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining », *Journal of Glaciology*, **45** (1999) 242–254; G. Sartoris and P. Bartelt, « Upwinded finite difference schemes for dense snow avalanche modeling », *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, **32** (2000) 799–821.
- [18] R.J. LeVeque, *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems* (Cambridge University Press, Cambridge, 2002)
- [19] A.-M. Granet-Abisset et G. Brugnot (coord.), *Avalanches et risques. Regards croisés d'ingénieurs et d'historiens* (CNRS MSH Alpes, Grenoble, 2002).
- [20] C. Gardelle, *Les Alpes* (Fontaine de Siloë, Montmélian, 2001).
- [21] W.J. Ammann, « Les besoins de recherche pour réduire les risques naturels dans les régions de montagne » in *Risques naturels en montagne* coordonné par F. Gillet and F. Zanoloni (Cemagref éditions, Grenoble, 1999) 10–17.
- [22] P. Mougin, *Restauration des montagnes* (Imprimerie Nationale, Paris, 1931).
- [23] M. Schneebeli, M. Laternser, P. Föhn, und W.J. Ammann, « Wechselwirkungen zwischen Klima, Lawinen, und technischen Massnahmen » (VDF, Zürich, 1998); W. Amman (coord.), *der Lawinenwinter 1999* (Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos, 2000) 588 p.
- [24] R. Wilson and E.A.C. Crouch, *Risk-Benefit Analysis* (Harvard University Press, Cambridge, 2001).
- [25] C. Wilhelm, « Quantitative risk analysis for evaluation of avalanche protection projects » in *25 years of snow avalanche research* coordonné par Erik Hestnes (Norwegian Geotechnical Institute, Voss, 1998) pp. 288–293; Bundestamt für Umwelt, Wald und Landschaft, *Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren* (BUWAL, Berne, 1999).
- [26] F. Rapin et R. Guillaude, « Une nouvelle échelle d'intensité pour les avalanches ». *Neige et Avalanches* **109** (2005) 11–17
- [27] C. Gardelle and F. Gardelle, *Vallorcine, histoire d'une vallée entre Aoste, Mont-Blanc, et Valais* (Textel, Lyon, 1988).
- [28] H. Bessat and C. Germe, *Les noms du paysage alpin* (Ellug, Grenoble, 2001).
- [29] J.W. Coaz, *Die Lawinen der Schweizer Alpen* (Schmid-Franke, Bern, 1881).
- [30] L. Besson, « Les risques naturels en montagne » (Artès, Grenoble, 1996).
- [31] M. Meunier, « Éléments d'hydraulique torrentielle » (Dicova, CEMAGREF, Antony, 1991).
- [32] C.J.M. Bernard, « Cours de restauration des montagnes » (École Nationale des Eaux et Forêts, Nancy, 1927).
- [33] J. Buffington, « The legend of A. Shields », *Journal of Hydraulic Engineering*, **125** (1999) 376–387.
- [34] P.-Y. Julien, « Erosion and Sedimentation » (Cambridge University Press, Cambridge, 1994).
- [35] J.M. Buffington and D.R. Montgomery, « A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers », *Water Resources Research*, **33** (1997) 1993–2029.
- [36] K. Koulinski, P. Bois, P. Lefort and M. Meunier, « Étude de la formation d'un lit torrentiel : dune à forte pente et pavage », *La Houille Blanche*, **1994-33** (1994) 57–70.
- [37] V. Koulinski, « Étude de la formation d'un lit torrentiel par confrontation d'essais sur modèle réduit et d'observations sur le terrain », thèse de doctorat (Grenoble, 1993).
- [38] T. Mizuyama, « Bed load transport in steep channel », thèse de doctorat (Kyoto, 1978).
- [39] G.E. Grant, « Critical flow constrains flow hydraulics in mobile-bed streams: a new hypothesis », *Water Resources Research*, **33** (1997) 349–358.
- [40] Y.S. Yalin, « River Mechanics » (Pergamon Press, Oxford, 1992).
- [41] P. Alexandre, « Modélisation numérique de l'évolution du lit des torrents », thèse de doctorat (Université Joseph Fourier, 1997).
- [42] G.M. Smart and M.N.R. Jaeggi, « Sedimenttransport in steilen Gerinnen », rapport technique (Mitteilungen n°64 der Versuchsanstalt für wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, 1983).

- [43] D. Rickenmann, « Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes », rapport technique (Mitteilungen n° 103 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, 1990).
- [44] D. Rickenmann, « Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes », *Journal of Hydraulic Engineering*, **117** (1992) 1419–1439.

