

Estimation de l'épaisseur moyenne de déclenchement d_0 pour le calcul des avalanches coulantes

Auteurs : A. Burkard & B. Salm

– Traduction de :

“Die Bestimmung der mittleren Anrissmächtigkeit d_0 zur Berechnung von Fliesslawinen”

rapport interne n° 668 (IFENA, Davos, 1992).

– Auteur de la traduction : Christophe ANCEY

– Date de la traduction : 1994

Sommaire

1. Introduction.....	3
2. Hypothèses et appréciation de l'épaisseur de déclenchement d_0	4
3. Données sur les phénomènes principaux.....	9
3.1. La valeur de cumul ΔHS en 3 jours (cumul extrême compatible avec le climat)	9
3.1.1. Estimation du facteur $F(30/300)$	9
3.2. Détermination de la valeur de base d_0 pour une pente de $\psi = 28^\circ$	11
3.3. Détermination de la fonction de déclivité.....	12
3.4. Régions des Alpes suisses, ordonnées suivant le cumul de neige en 3 jours pour une période de retour 100 ans.....	16
4. L'estimation de l'épaisseur de déclenchement dans les 15 dernières années	17
4.1. Cours de Quervain (1979/80) [6].....	17
4.2. Cours pour la localisation du danger d'avalanche - Calcul des avalanches par B. Salm [7]	18
4.3. Calcul actuel des avalanches coulantes – Prescriptions pour le praticien avec des exemples....	20
5. Remarques.....	21
6. Bibliographie.....	22

1. Introduction

Le degré d'exposition au danger d'avalanches dans les régions habitées est estimé en fonction de la poussée exercée (ligne des 30 kN/m²) et de la période de retour (jusqu'à 300 ans) des avalanches. Dans un site avalancheux donné, les avalanches de grande ampleur sont plus rares que celles de faible ampleur. A partir d'une période de retour connue, on peut évaluer les dimensions du phénomène. De là, la poussée de l'avalanche est directement calculable. La pression produite par l'avalanche dans une zone donnée est donc jumelée avec la période de retour. Pour des phénomènes exceptionnels et rares, qui n'ont pas été (encore) en principe observés, pressions et fréquences peuvent donc être la plupart du temps calculées. A cet effet, le modèle déterministe statistique Voellmy-Salm est employé à l'Institut. Dans cette modélisation, les dimensions de l'emprise et les pressions sont à peu près proportionnelles à l'épaisseur moyenne d_0 de la plaque de neige déclenchée. Par ailleurs, d_0 est reliée à la période de retour, ce qui fixe avec vraisemblance l'emprise à une valeur statistique.

De Quervain écrivait en 1974 à propos de la problématique liée à la détermination de la possibilité d'un déclenchement : *"Toute la réflexion serait construite de manière considérable sur un cadre fictif, et la question importante se pose de savoir de quelle manière on peut aboutir à une base concrète. A long terme, les statistiques des données sur les précipitations de neige et les hauteurs déclenchées apporteront leur contribution aux fonctions recherchées, ainsi que les expériences sur la mécanique de la neige. Dans l'immédiat, on doit s'appuyer sur les valeurs d'épaisseur déclenchée habituellement rencontrées dans les régions à catastrophes, ou les estimer a posteriori à partir de l'emprise maximale de l'avalanche. En tout premier lieu, il est essentiel que l'on propose une gradation pertinente de l'épaisseur déclenchée entre les régions riches et pauvres en neige pour des avalanches de même occurrence, ou bien tenir compte d'une telle variation au sein d'une même région climatique lorsque des avalanches de différente période de retour sont à considérer."* [1]

On est aujourd'hui en mesure de proposer une gradation quantitative entre les régions pauvres et riches en neige. Les bases et hypothèses, qui permettent de déterminer quantitativement l'épaisseur de déclenchement d_0 sont explicitées dans ce rapport. Grâce au choix judicieux de l'épaisseur de déclenchement d_0 dans différentes régions climatiques des Alpes suisses, on peut représenter l'échelle de danger sur les cartes d'exposition au risque et dans les normes de construction pour la protection contre les avalanches. Cela est exploité dans les directives pour la calcul des avalanches à l'attention du praticien [2].

2. Hypothèses et appréciation de l'épaisseur de déclenchement d_0

Les facteurs essentiels influant sur d_0 sont d'après [3] :

- Neige récente : on tient compte ici du cumul de neige tombée en trois jours consécutifs compatible avec le climat de la région (voir figure 1). Il n'est pas utile de prendre en considération des durées de précipitation plus longues. Il est également admis que les grosses avalanche, contrairement aux avalanches déclenchées par des skieurs, partent toujours durant les précipitations et qu'elles concernent pour l'essentiel la neige récente. Des analyses ont établi cela bien qu'occasionnellement des décrochements dans de la vieille neige soient possible. Par la suite, on considère comme égales les périodes de retour de ces chutes et des avalanches correspondantes (hypothèse conservative).
- Déclivité : la résistance au cisaillement limite la quantité de neige déposée sur une pente. Avant que ne soit atteint le seuil de précipitations possibles sur le plan climatique, la neige aura déjà commencé à glisser. La stabilité est déduite selon la loi de Mohr-Coulomb (voir paragraphe 3.3), mais elle doit être pareillement plus importante lors de précipitations plus grosses. Autrement, les épaisseurs de déclenchement sur une même pente seraient toujours identiques pour un manteau neigeux de même cohésion, et ce de manière indépendante de la période de retour et du climat.
- Neige chassée par le vent : dans un versant sous le vent, les quantités de neige et conséquemment l'épaisseur de déclenchement sont localement plus élevées à cause du transport par le vent (on tient compte de la direction dominante du vent durant les précipitations).

L'épaisseur moyenne de déclenchement d_0 (moyennée sur toute la surface potentielle de déclenchement, elle ne correspond pas en général à l'épaisseur moyenne mesurée le long de la ligne de rupture) mesurée perpendiculairement à la pente est estimé de la façon suivante:

$$d_0 = d_0^* f(\psi) \quad [\text{m}]$$

d_0^*	Valeur de base, dépendant du climat régional, c'est-à-dire du cumul possible de neige en trois jours et de la période de retour.
$f(\psi)$	Facteur de pente, où la stabilité croît avec une diminution de la pente (relation entre la résistance au cisaillement et la contrainte de cisaillement). Pour $\psi = 28^\circ$, $f(\psi) = 1$, et pour $\psi = 45^\circ$, $f(\psi) = 0,52$ (par expérience, la stabilité croît quand d_0^* décroît, voir chapitre 3.3).

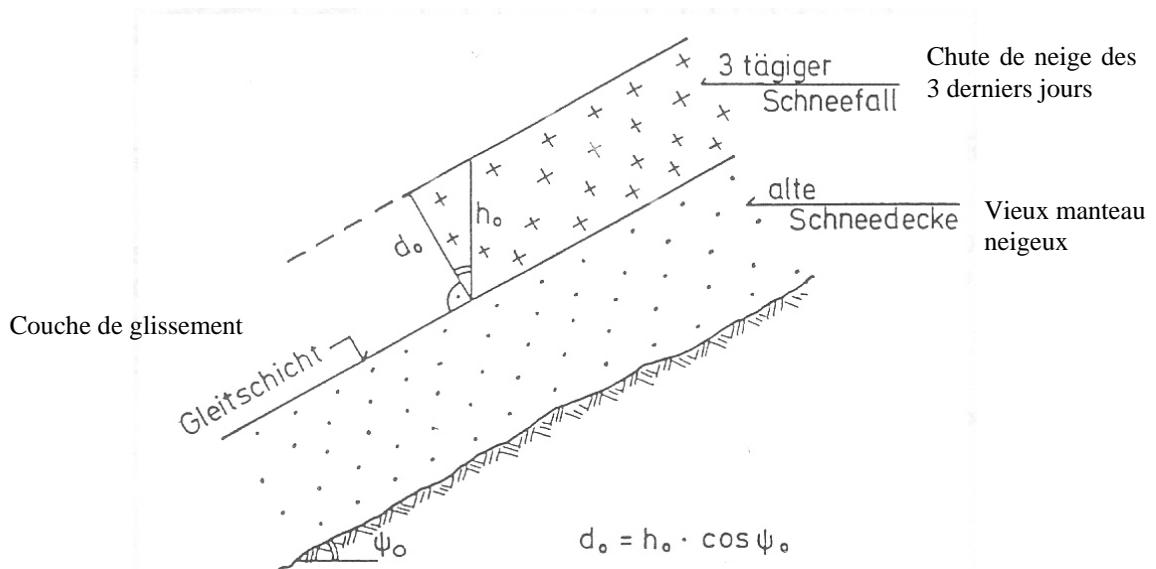


Figure 1

L'épaisseur de déclenchement est, en résumé, une quantité combinant climat, mécanique de la neige et topographie.

Distribution des valeurs extrêmes:

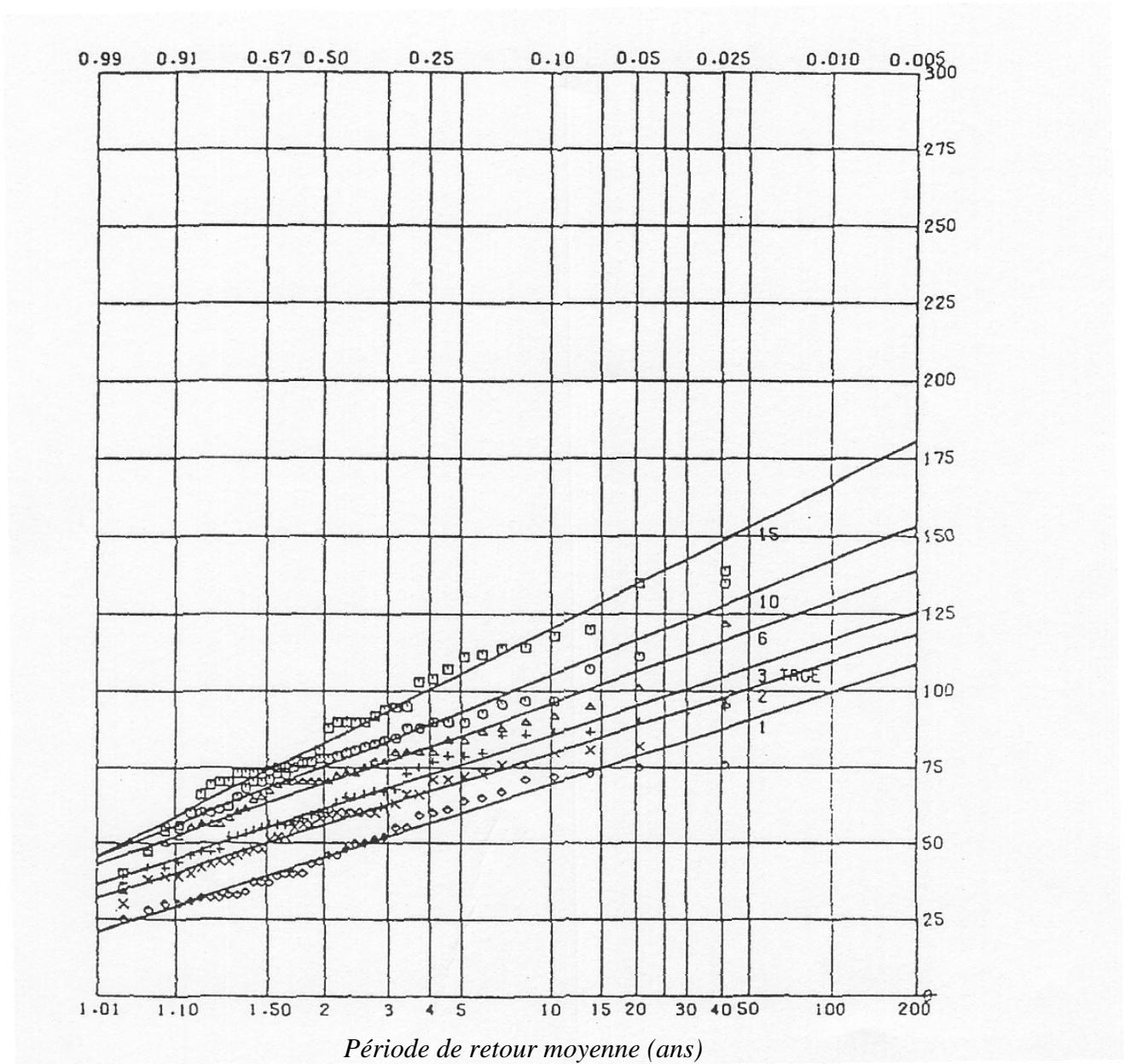


Figure 2 : Ulrichen. Valeurs maximales d'accroissement du manteau neigeux en 1, 3, 6, 10 et 15 jours. D'après [4]. 1941/42 – 1981/82 (40 ans)

Cumul de neige (HS), qui peut arriver avec une probabilité de $X\%$ pendant 100 ans en une fois en au moins une journée :

95,0%	: 85 cm	10,0 %	: 129 cm
63,2%	: 100 cm	5,0 %	: 138 cm

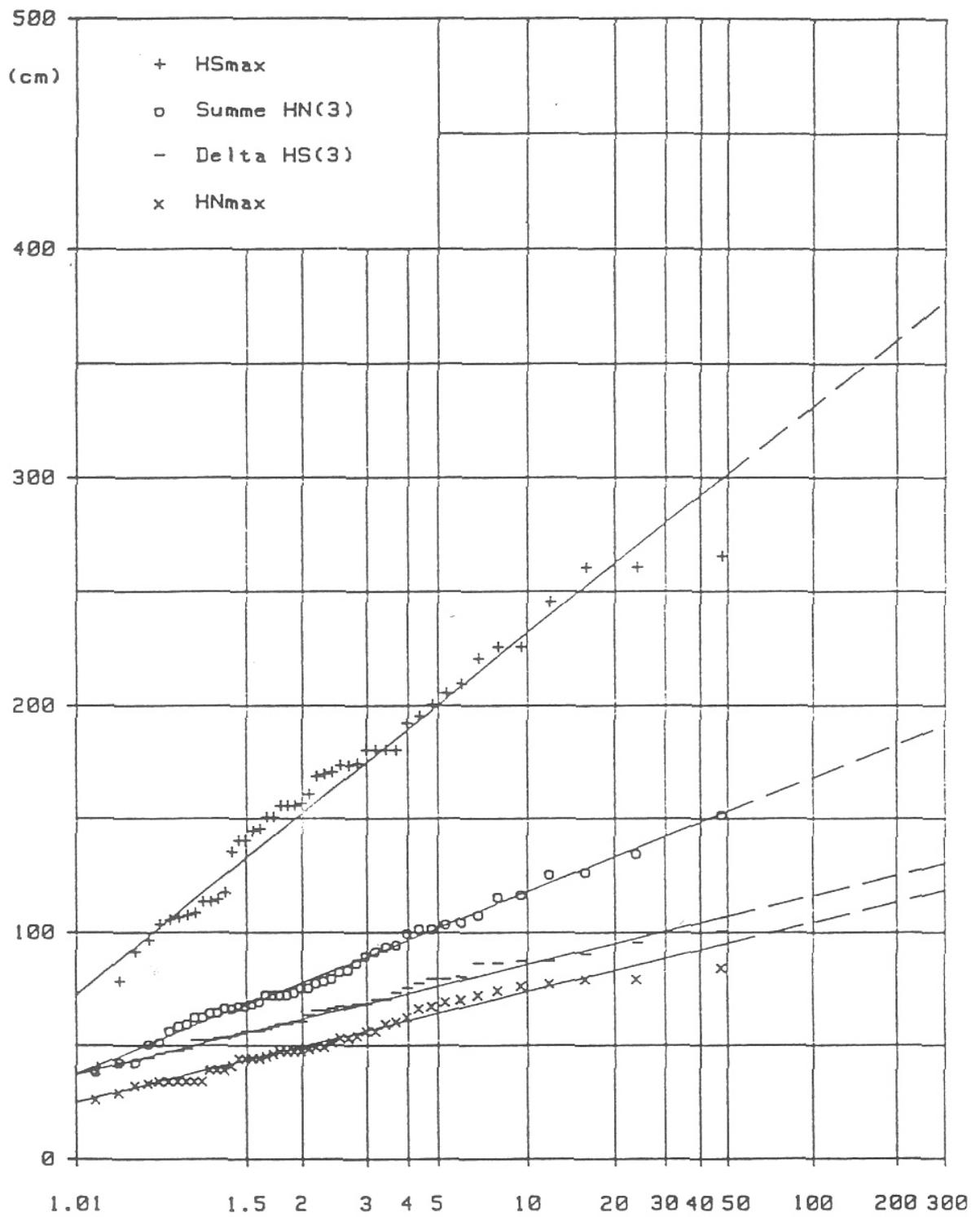


Figure 3 : Statistique des valeurs extrêmes. Ulrichen 1350 m. Base : 59 hivers (1930/31-1988/89) [SLF, section I, R. Meister]

3. Données sur les phénomènes principaux

Les bases les plus importantes sont formées des informations concernant la neige recueillies et exploitées depuis des années à partir des stations de comparaison et des points de mesures (réseau d'observation IFENA) dans les Alpes suisses. Les données sur la neige sont présentées sous forme de séries sur 20 à 60 années. Les informations concernant les principaux événements sont tirées de ces tableaux (altitude comprise entre 1100 et 2800 m). Comment parvient-on à des épaisseurs de déclenchement pour différentes périodes de retour et des régions climatiques uniquement à partir de ces données ?

3.1. La valeur de cumul ΔHS en 3 jours (cumul extrême compatible avec le climat)

Les données de chacune des stations de comparaison et des points de mesures étaient exploitées jusqu'en 1982 par l'Institut de Géographie de l'université de Berne [4] (sous la direction de l'institut IFENA) (figure 2). A partir de cette année, elles sont suivies station par station et actualisées par la section 1 de VIFENA (section Föhn) (figure 3).

Les valeurs AHS correspondent au cumul de neige enregistrées pour un manteau neigeux en terrain plat. L'extrapolation des valeurs d'accumulation sur 30 à 60 années rend possibles ici les statistiques des valeurs extrêmes.

Par la suite, on doit tenir compte d'un gradient de hauteur ΔHS : l'altitude moyenne des champs de mesures et des stations de comparaison est comprise entre 1100 et 2800 mètres, avec une valeur moyenne de 1600 mètres. Par ailleurs, comme les zones de départ des avalanches sont plus en altitude, il est nécessaire de tenir compte du gradient ΔHS de hauteur. D'après [5] page 155, selon les régions, ce gradient est environ de 3 à 7 cm par tranche d'altitude de 100 mètres. Nous proposons une valeur moyenne de 5 cm/100 m. De plus, nous estimons qu'il existe une altitude de référence de 2000 m au-dessus de laquelle l'effet du vent devient prédominant et des accumulations de neige soufflée doivent être prises en compte (à travers le calcul déterminant de d_0^* , qui est la valeur moyenne sur toute la zone de départ).

3.1.1. Estimation du facteur $F(30/300)$

Le cumul sur trois jours ΔHS avec une période de retour de 30 ans est une valeur mesurée avec certitude. L'extrapolation des valeurs statistiques extrêmes à une période de retour de 300 ans est

naturellement associée à une dispersion croissante. On peut se demander s'il est possible d'extrapoler à 300 ans des données établies sur 30 à 60 années et quelle fiabilité on peut accorder à ces valeurs. En général la règle suivante prévaut : on ne peut au mieux extrapoler que sur une période trois fois plus étendue que la période de référence. Malgré la faible durée de la période de mesure, nous sommes contraints d'établir une extrapolation. Le dépouillement (sur 66 stations) des valeurs de cumul sur 3 jours ΔHS pour $T=30$ ans et $T=300$ ans fournit une relation F entre valeurs sur 300 ans et celles sur 30 ans, comprise entre 1,30 et 1,45 ($F_{moy}=1,37$). Au demeurant, on ne discerne pas de différence significative dans une région. Dans les réflexions suivantes, on considère que $F=1,4$. Dans les deux tableaux suivants A et B, les cumuls les plus importants et les plus faibles ainsi que l'altitude de chaque station sont reportés pour $T=30$ ans. Les valeurs sur 300 ans sont ensuite extrapolées de ces valeurs avec le facteur 1,4.

<i>cumul de neige ΔHS</i>	<i>altitude</i>	<i>nombre d'hivers jusqu'en 88189</i>	<i>$\Delta HS = 30$ ans</i>	<i>correction d'altitude 5 cm/100 m</i>	<i>valeur de référence ΔHS à 2000 m, $T=30$ ans</i>
Stations	[m]		[cm]	[cm]	[cm]
<u><i>Tessin :</i></u>					
<i>Campo Blenio</i>	1193	37	150	40	190
<i>– Bosco-Gurin</i>	1490	39	150	25	175
<i>– Ritom-Piora</i>	1800	36	140	10	150
<i>– Bedretto</i>	1400	36	160	30	190
<i>– St Gotthard</i>	2095	40	200	-5	195
<u><i>autres :</i></u>					
<i>– Braunwald¹</i>	1340	38	135	35	170
<i>– Grimsel²</i>	1970	40	165	-	165

Tableau A : valeur moyenne $\Delta HS_{30} = 170$ cm

¹ Cette station SLF n'est plus en service (1945-1981)

² Cette station SLF n'est plus en service (1931-1971)

<i>cumul de neige ΔHS</i>	<i>altitude</i>	<i>nombre d'hivers jusqu'en 88189</i>	$\Delta HS = 30 \text{ ans}$	<i>correction d'altitude 5 cm/100 m</i>	<i>valeur de référence ΔHS à 2000 m, T=30 ans</i>
Stations	[m]		[cm]	[cm]	[cm]
<u>Engadine:</u>					
– Samedan	1710	39	70	15	85
– Bever ³	1710	50	85	15	100
– Zuoz	1710	46	80	15	95
– La Drossa	1710	39	80	15	95
– Pontresina	1840	39	95	8	108
<u>Autres :</u>					
– Bivio	1770	36	95	7	102
– Inerferrera	1480	40	80	25	105
– Grimentz	1570	36	85	20	105

Tableau B : valeur moyenne $\Delta HS_{30} = 100 \text{ cm}$

Avec le facteur 1,4, ΔHS_{30} (important) et ΔHS_{30} (faible) pour T=30 ans, on déduit les valeurs pour T=300 ans :

ΔHS_{30} (important)	(enneigement important) :	$\Delta HS_{300} = 170 \times 1,4 = 238 \text{ cm}$
ΔHS_{30} (faible)	(enneigement faible) :	$\Delta HS_{300} = 100 \times 1,4 = 140 \text{ cm}$

3.2. Détermination de la valeur de base d_0 pour une pente de $\psi = 28^\circ$

Les cumuls de neige ΔHS sont mesurés verticalement (sur un terrain horizontal). Pour le calcul des avalanches, les valeurs sont établies selon la perpendiculaire à la pente. Avec la détermination des zones de départ potentielles dont la déclivité est comprise entre 28° et 50° , on évalue d'abord la valeur de base d_0^* pour $\psi = 28^\circ$ en supposant à cet effet qu'il se dépose autant de neige sur une pente à $28'$ que sur un terrain plat. Ensuite, il faut tenir compte des valeurs supérieures de l'angle de pente par l'intermédiaire d'une fonction de la déclivité $f(\psi) : d_0^*(\psi = 28^\circ) = \Delta HS \cos 28^\circ$.

³ Cette station SLF n'est plus en service (1931-1981)

Période de retour (ans)	Valeur de base d_0^* ($\psi = 28^\circ$)	
	[cm]	
	enneigement faible	enneigement fort
30	88	150
100	107	182
300	123	210

3.3. Détermination de la fonction de déclivité

La dépendance avec l'angle de pente est prise en compte par l'intermédiaire du facteur de déclivité $f(\psi)$. Un critère général pour l'évaluation de la stabilité n'est pas encore connu. En suivant l'exemple de la mécanique du solide, on emploie en mécanique de la neige le critère simple de Mohr-Coulomb. Il y a rupture lorsque la stabilité $s \leq 1$, où s est le rapport de la résistance d'une couche intermédiaire faible sur la contrainte de cisaillement. Nous établissons le facteur de déclivité $f(\psi)$ mentionné comme suit:

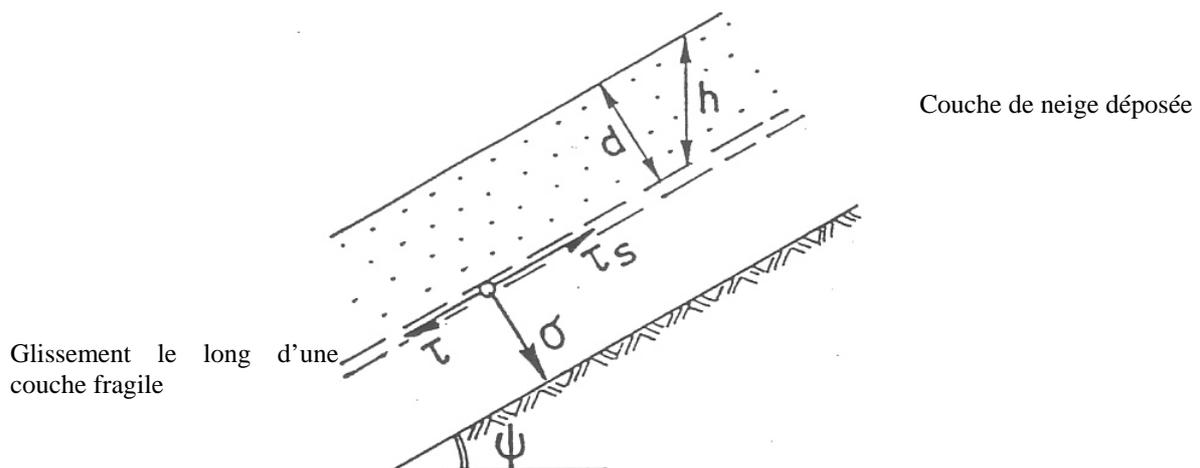


Figure 2 : rupture si $\tau_s / \tau \leq 1$

Résistance au cisaillement : $\tau_s = C + \sigma \tan \varphi$ (Mohr-Coulomb)

Contrainte de cisaillement : $\tau = \rho g d \sin \psi$

Où l'on a :

– $\sigma = \rho g d \cos \psi$ Contrainte normale

- φ = angle de frottement interne
- C = cohésion
- d = épaisseur de déclenchement

$$\frac{\tau_s}{\tau} = 1 = \frac{C + \tau \tan \varphi}{\rho g d \sin \psi} = \frac{C}{\rho g d \sin \psi} + \frac{\rho g d \cos \psi}{\rho g d \sin \psi} \tan \varphi$$

$$d = \frac{C}{\rho g \sin \psi} + \frac{\tan \varphi}{\tan \psi} d$$

$$d \left(1 - \frac{\tan \varphi}{\tan \psi} \right) = \frac{C}{\rho g \sin \psi}$$

$$d = d_0 = d_{cr} = \frac{C}{\rho g (\sin \psi - \cos \psi \tan \varphi)}$$

d_c : épaisseur critique de déclenchement

On aboutit pour $f(\psi)$ à:

$$f(\psi) = \frac{d_0}{d_0^*} = \frac{C}{\rho g d_0^* (\sin \psi - \cos \psi \tan \varphi)}$$

Les valeurs de C et φ sont prises de la manière suivante à partir des valeurs expérimentales à l'endroit de la fracture :

- Pour la cohésion, on postule que :

$$\frac{1}{\rho g} \frac{C}{d_0^*} = \text{const} = 0,291 \text{ ou bien } C = 0,291 \rho g d_0^*$$

Elle croît proportionnellement à d_0^* . Elle dépend en général de l'agglomération au cours du temps des grains (renforcement des liaisons entre grains). De manière grossière, la métamorphose est favorisée avec d_0^* (plus grosse est la surcharge sur la surface de glissement, plus grand est le temps nécessaire pour former une couche épaisse).

- Pour l'angle de frottement interne, on doit prendre

$$\tan \varphi = \text{const} = 0,202 \quad (\tan \varphi = 11,4^\circ)$$

Il est considéré comme indépendant de d_0^* , comme il paraît vraisemblable qu'il dépende surtout de la forme des grains à la surface de glissement (rugosité de la surface de rupture). A titre de comparaison, nous donnons les valeurs obtenues par Roch (1966) [8]. Il a réalisé les mesures à l'aide

d'un scissomètre pour différentes charges. La plage prépondérante des contraintes possibles est comprise environ entre 1 et 2 kN/m².

type de neige	$\tan \varphi$	C [kN/m ²]
Neige fraîche	0,35 19,3°	0,8
Grains fins	0,65 33°	2,2
Particules reconnaissables	0,45 24,2°	0,45

En comparaison, nous reportons les valeurs admises:

ρ	d_0^* [m]	C [kN/m ²]
150 kg/m ³	1	0,43
	2	0,86

Elles se retrouvent également dans la plage des valeurs mesurées. La valeur admise pour $\tan \varphi = 0,202$ est en revanche exagérée. Les valeurs données par Roch semblent également trop élevées. Étant donné que des avalanches en plaque peuvent se déclencher pour des pentes de 25°, φ doit être inférieur à 25° dans ces cas-là. Il faut également considérer une surface de rupture lisse et composée de grains fins. Il ressort des mesures de Roch que φ a tendance à augmenter avec la taille des grains.

ψ	28	30	32,5	35	37,5	40	45	50
$f(\psi)$	1,00	0,90	0,79	0,71	0,65	0,60	0,52	0,46

ψ : angle de pente [°]

$f(\psi)$ facteur de déclivité [1]

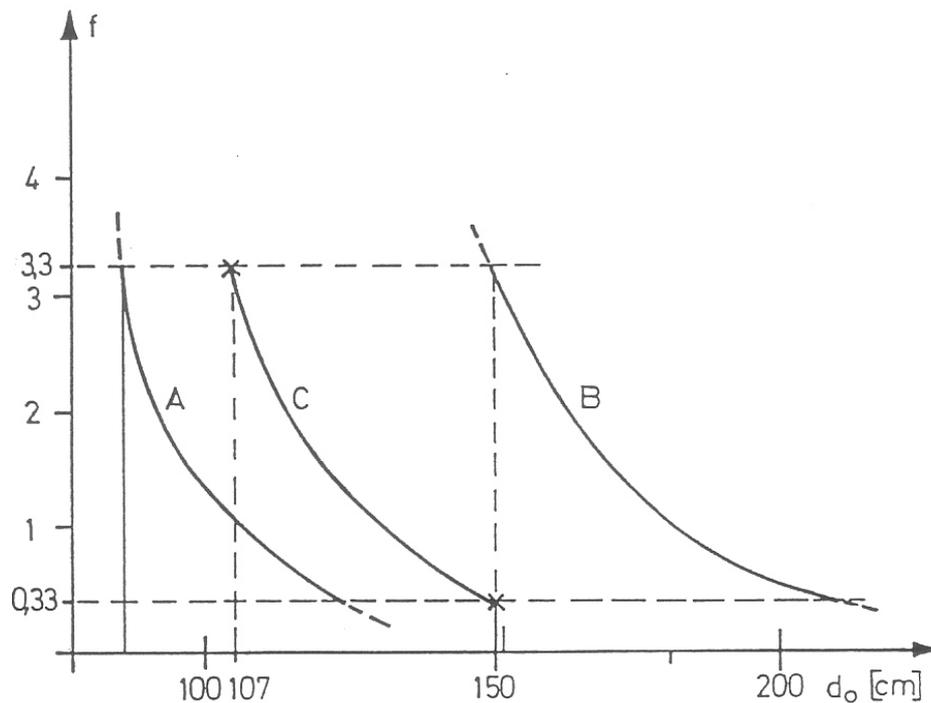


Figure 4 : nombre de périodes par siècle, avec des précipitations consécutives sur 3 jours, qui provoquent un cumul de neige d_0^* et plus dans une zone de départ de déclivité $\psi = 28^\circ$ dans les régions A, B et C.

Pour $\psi_0 = 28^\circ$, on a: $d_0^* = d_0$ f = fréquence

Région climatique A (par exemple une partie de l'Engadine)

$f = 3,3$ ($T = 30$ ans): $d_0^* = 90$ cm

$f = 0,33$ ($T = 300$ ans): $d_0^* = 125$ cm

Région climatique B (par exemple région du Gotthard)

$f = 3,3$ ($T = 30$ ans): $d_0^* = 150$ cm

$$f = 0,33 \quad (T = 300 \text{ ans}) \quad d_0^* = 210 \text{ cm}$$

3.4. Régions des Alpes suisses, ordonnées suivant le cumul de neige en 3 jours pour une période de retour 100 ans

cumul de neige	Région
important	Nord du Tessin/ Simplon
	Région du Gotthard
	Alpes glaronnaises (de Glaris)
	Valais est
	Suisse centrale
	Prättigau (Rätikon)
	moyen Valais
	Oberland bernois de l'est
	Région de Säntis
	Nord des Grisons (sauf Prättigau)
	Sud des Grisons
	Centre des Grisons
	Alpes fribourgeoises et vaudoises
	Oberland bernois de l'Ouest
	Valais ouest
	faible

4. L'estimation de l'épaisseur de déclenchement dans les 15 dernières années

4.1. Cours de Quervain (1979/80) [6]

D'après le script S. 145 et 146:

Hauteur de déclenchement primaire d_0

Fonction de la région climatique, de l'exposition de la pente, de la période de retour et de l'angle (problème statistique)

Soit: $d_0 = d_0^* f(\psi)$ d_0^* valeur de base pour $\psi = 35^\circ$

$f(\psi)$ fonction de déclivité

Valeur de base d_0^* pour un angle de pente $\psi = 35^\circ$

Période de retour	pauvre en neige	$\psi = 35^\circ$	riche en neige
30 ans	de 0,6 m	à	1,0 m
300 ans	de 1,5 m	à	1,8 m
recommandations provisoires !			

Fonction de déclivité :

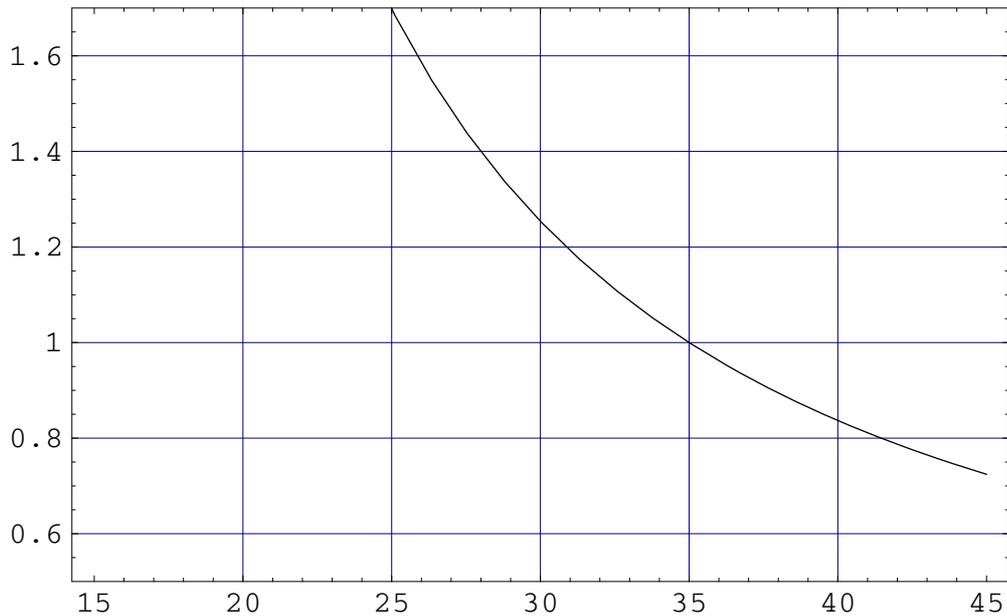
Conditions identiques de limite de stabilité (c'est-à-dire de même cohésion), pour tout angle de pente, on a d'après 82 S 99 :

$$f(\psi) = \frac{k}{\sin \psi - \nu \cos \psi}$$

avec $\nu = 0,2$ (neige récente) et k normé de telle sorte $f(35^\circ) = 1$, il s'ensuit que $k = (\sin 35 - 0,2 \cos 35) = 0,41$

ψ	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45
--------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

$f(\psi)$	1,70	1,49	1,32	1,19	1,09	1,00	0,93	0,87	0,81	0,7	0,72
-----------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-----	------



4.2. Cours pour la localisation du danger d'avalanche - Calcul des avalanches par B. Salm [7]

D'après les pages 1 et 2 :

L'épaisseur de déclenchement est donnée en fonction du climat (précipitations extrêmes de neige, vent prédominant) et de la déclivité (par l'intermédiaire de la résistance de la neige).

Il faut aussi scrupuleusement établir que l'emprise croît à peu proportionnellement avec elle.

$$d_0 = d_0^* f(\psi)$$

d_0^* valeur de base pour $\psi = 35^\circ$

$f(\psi)$ fonction de déclivité

d_0 épaisseur de déclenchement $d_0 = h_0 \cos \psi$

h_0 hauteur de déclenchement (verticale)

Valeurs guides pour d_0^* [m]

Période de retour	Valeur de base d_0^* ($\psi = 35^\circ$)	
	pauvre en neige	riche en neige
30 ans	0,6 m	1,0 m
300 ans	1,0 m	1,6 m

Fonction de déclivité $f(\psi)$:

Angle de pente	$f(\psi)$ [1]	Fréquence	Ordre de grandeur de la période de retour
28	1,4	très rare	300 ans
30	1,25		
32,5	1,11	rare	
35	1,00		
37,5	0,91	relativement fréquent	≤ 30 ans
40	0,84		
45	0,72		
50	0,64		

L'augmentation de la fréquence avec l'angle de pente est surtout due au fait, qu'à fortes pentes, 'un faible accroissement de la hauteur de neige suffit à causer des avalanches (les petites chutes de neige sont plus fréquentes que les grosses).

4.3. Calcul actuel des avalanches coulantes – Prescriptions pour le praticien avec des exemples

Les valeurs valables actuellement sont détaillées dans la communication n° 47 de l'IFENA avec le titre mentionné ci-dessus et font l'objet de ce rapport interne.

5. Remarques

Le tableau ci-dessous montre les différences entre les valeurs de base d_0^* actuellement utilisées et celles de Salm (1984) et de Quervain (1979/80).

T [ans]		Valeur de base d_0^*		Épaisseur de déclenchement d_0 [cm]			Tendance + : croissante - : décroissante
		faible	forte	1979/80	1984	1990	
30	28	X		84	84	88	+
			X	140	140	150	+
	45	X		43	43	46	+
			X	72	72	78	+
300	28	X		210	140	123	-
			X	252	224	210	-
	45	X		108	72	64	-
			X	130	115	109	-

Ces différences en partie grosses dans l'estimation de l'épaisseur de déclenchement peuvent conduire à la conclusion, que les cartes d'exposition au risque d'avalanches élaborées à cette époque doivent être révisées. Mais il n'en est pas ainsi. Le lecteur disposé a en effet tenu compte que le calcul des avalanches s'est continuellement amélioré et qu'il le continuera. Parallèlement à la détermination éprouvée d'une épaisseur moyenne de déclenchement, il a fallu recalculer les paramètres de frottement ξ [m²/s] et μ [1]. Le facteur de frottement turbulent ξ est ainsi passé de 500 à 1000. Il en résulte une augmentation de la vitesse de l'avalanche, qui compense un peu la diminution de la valeur de d_0 correspondant à une période de 300 ans. En résumé, nous constatons qu'aujourd'hui la détermination de l'emprise des avalanches d'occurrence 30 ans est plus rigoureuse et qu'il n'y a pas de différences fondamentales en ce qui concerne l'emprise des avalanches de fréquence 300 ans.

6. Bibliographie

- [1] De Quervain M. "Die Berücksichtigung der Lawinenhäufigkeit in der Lawinengefahrenkarte. Ein grundsätzliche Betrachtung", IFENA, rapport n° 37, 1974, S 157-162
- [2] Salm B., Burkard A., Gübler H. "Berechnung von Fliesslawinen. Eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen", IFENA, communication n° 47, 1990, 37 S
- [3] Salm B., Zarn B., Brigger V. Vorlesung, Schnee, Lawinen und Lawinenschutz, ETHZürich, août 1990, 284 S
- [4] Witmer U, Filliger P. Kunz S., et Kueng P. Bearbeitung von Schneedaten in der Schweiz Extremwertstatistik der Höchstwerte der Schneehöhenzuwächse, Institut Géographique de
- [5] Witmer U. Erfassung, Bearbeitung und Kartierung von Schneedaten in der Schweiz. Institut Géographique de l'Université de Berne, Geographica Bernensia G25, Berne, 1986, 215 S
- [6] De Quervain M "Schneekunde und Lawinenverbau", ETHZ Vorlesung, Zürich, IFENA, 1979
- [7] Salm B Lawinentechnische Berechnungen. Kurs für Lawinengefahrenkartierung, IFENA, octobre 1984, 15 S
- [8] Roch A. Les variations de la résistance de la neige. Symposium sur les aspects scientifiques des avalanches de neige. Davos 1965. Publication n° 65 de l'IAHS 1966, pp 86-99.