

CALCUL des AVALANCHES :
Une METHODE pour le PRATICIEN
avec des EXEMPLES

B. SALM, A. BURKARD & H.U. GUBLER

TRADUCTION d'une publication de
l'Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches
No. 47, Juillet 1990

BERECHNUNG VON FLIESSLAWINEN
EINE ANLEITUNG FÜR PRAKTIKER
MIT BEISPIELEN

Traduction de Christophe ANCEY (1992)

SOMMAIRE

A	INTRODUCTION	1
B	RÉSUMÉ	2
C	BASES DE CALCUL, DONNÉES ET FORMULES.....	2
1	Zone de départ.....	2
1.1	Angle moyen de pente	2
1.2	Épaisseur de neige.....	2
1.2.1	Valeur de d_0^*	4
1.2.2	Facteur d'angle $f(\psi)$	6
2	Débit	6
2.1	Zone de départ vaguement rectangulaire.....	6
2.2	Zone de départ de forme quelconque.....	7
3	Vitesse et hauteur dans la zone d'écoulement	8
3.1	Avalanche de versant	8
3.2	Avalanche de couloir	8
4	Vitesse et hauteur au début de la zone d'arrêt.....	9
4.1	Point représentatif du début de la zone d'arrêt.....	9
4.2	Évaluation de la vitesse et de la hauteur en P.....	10
4.3	Valeur prépondérante de la pente à l'amont de P.....	12
4.3.1	Généralités sur le changement de pente.....	12
4.3.2	Estimation de l'angle de pente à l'amont de P... 12	
5	Zone de dépôt.....	14
6	Valeurs pour ξ et μ	16
6.1	Valeurs pour ξ	16
6.2	Valeurs pour μ	17
D	EFFORTS EXERCES PAR UNE AVALANCHE	18
1	Effort exercé sur un obstacle important	18
2	Effort exercé sur un petit obstacle.....	19
3	Remarques sur le calcul des efforts.....	20
4	Estimation de la frontière 30 kN/m^2 sur les cartes de localisation du risque d'avalanche.....	21
E	EXEMPLES D'APPLICATIONS.....	23
ARIEFA/SAMEDAN		23
MALBUN / TRIESENBERG		26
PARDENN / KLOSTERS.....		29
GROSSI CHIRCHENLAUI / MURGTAL.....		34

A INTRODUCTION

La méthode présentée doit essentiellement servir, en donnant une estimation des caractéristiques des avalanches, pour l'élaboration des cartes de localisation du risque d'avalanches selon des critères standardisés. Elle est complémentaire des "Directives pour la prise en considération du danger d'avalanches lors de l'exercice d'activités touchant l'organisation du territoire" (Office fédéral des forêts, IFENA, 1984). Comme il est mentionné dans ce rapport, les calculs ne représentent qu'une partie des méthodes employées pour l'élaboration des cartes d'avalanches. Ils sont cependant indispensables pour l'appréciation des événements extrêmes et déterminants qui échappent au recensement classique à l'aide du catastre des avalanches. En d'autres termes, on doit répondre à la question "Que se passe-t-il, si on dépasse la limite relativement étroite de la mémoire collective ?".

Gardons cependant à l'esprit que :

- cette méthode correspond à l'**état actuel** des connaissances, qui pourront être dépassées dans l'avenir.
- en principe, la méthode ne concerne que les avalanches **extrêmes** dites de "référence". Les paramètres des avalanches observées en temps normal peuvent varier considérablement par rapport à ceux donnés dans ces instructions.
- les paramètres donnés ont été calés principalement à l'aide de distances d'arrêt extrêmes. Les vitesses obtenues avec cette méthode sont parfois inférieures à celles mesurées.
- **attention** cette méthode n'est pas à prendre comme un "livre de cuisine". Car chaque avalanche requiert un traitement propre et une connaissance de la matière dans son ensemble. A cela s'ajoute aussi l'expérience qui joue un rôle important et que chacun doit acquérir. Il faut en dernier lieu avoir à l'esprit que les avalanches échappent aux calculs par trop précis.

B RÉSUMÉ

Les grandeurs essentielles pour le calcul des avalanches sont :

- l'épaisseur moyenne dans la zone de départ d_0
- le facteur de frottement turbulent ξ
- le coefficient de frottement solide μ

On veut :

- estimer le débit Q à la fin de la zone de déclenchement
- calculer la hauteur et la vitesse en n'importe quel point de la zone d'écoulement
- trouver la vitesse et l'épaisseur de l'écoulement au début de la zone de dépôt (v_p et d_p)
- donner une valeur de la distance d'arrêt (longueur de la zone de dépôt) s .

C BASES DE CALCUL, DONNÉES ET FORMULES

1 Zone de départ

1.1 Etendue de la zone de départ et angle moyen de pente

L'**étendue** est donnée par une inclinaison comprise entre 30° (éventuellement 28°) et 50°.

L'**angle moyen** ψ_{0m} est calculé en quelques points répartis sur **toute** la superficie de la zone de départ au moyen de profils topographiques relevés sur le terrain ou calculés à partir de l'écart horizontal des lignes de niveau selon le tableau 1.

Angle de pente [°]	Ecart horizontal des lignes de niveau de 10 m [mm]	
	Plan 1:10 000	Plan 1:5 000
28	1,88	3,76
30	1,73	3,46
35	1,43	2,86
40	1,19	2,38
45	1,00	2,00
50	0,84	1,68

Tableau 1

1.2 Epaisseur de neige

L'épaisseur moyenne d_0 (mesurée perpendiculairement à la pente) de la neige mise en mouvement est estimée par :

$$d_0 = d_0^* f(\psi) \quad [m] \quad (1)$$

d_0^* : valeur de base, dépendant du **climat** local (c'est à dire de l'épaisseur de neige pouvant être accumulée en trois jours) et de la **période de retour T**.

$f(\psi)$ facteur d'angle, donné à partir de la **résistance de la neige** (on suppose que cette résistance croît avec d_0^*).

1.2.1 Valeur de d_0^*

Période de retour T (années)	Valeur de référence d_0^* pour $\psi_{0m} = 28^\circ$ Climat : hauteur de neige pouvant tomber en 3 jours	
	faible [m]	importante [m]
30	0,88	1,50
100	1,06	1,81
300	1,23	2,10

Tableau 2

Ces valeurs de d_0^* sont valables pour une altitude d'environ 2000 m. Pour des altitudes différentes (alt), il faut corriger de 5 cm/100 m, c'est-à-dire par la relation suivante :

$$d_0^* = (d_0^*)_{alt=2000} + \frac{0,05(alt - 2000)}{100}$$

$$\frac{d_0^*(T = 300)}{d_0^*(T = 30)} \cong 1,4$$

en veillant à ce que le rapport $\frac{d_0^*(T = 300)}{d_0^*(T = 30)}$ soit à peu près **constant**.

Le tableau 2 ne tient pas compte des effets dus aux vents.

Lors **d'accumulations de neige soufflée** importantes sur une partie plus ou moins étendue de la zone de départ, il faut augmenter d_0^* d'une valeur de 30 à 50 cm dans ces zones. Le d_0^* déterminant est la moyenne sur toute la zone de départ.

Dans les **régions de haute altitude** où les effets dus aux vents sont prépondérants, la correction de d_0^* (de 5 cm / 100 m) est de moindre importance.

Le tableau 3 correspond à la répartition des **régions alpines suisses** selon un ordre décroissant de l'épaisseur de neige pouvant être accumulée en 3 jours et avec une période de retour T de 100 ans.

Accumulation de neige	Région
importante	Nord du Tessin, Col du Simplon Région du St. Gothard Alpes Glaronnaises Est du Valais Suisse centrale Prättigau (Rhätikon) Valais central Est de l'Oberland Bernois Région du Säntis Nord des Grisons (sauf Prättigau/Rhätikon) Sud des Grisons
faible	Centre des Grisons Alpes fribourgeoises et vaudoises Ouest de l'Oberland Bernois Ouest du Valais Engadine

Tableau 3

Des variations marquées de l'ordre indiqué ci-dessus peuvent apparaître à l'intérieur des régions. Les conditions locales doivent donc être prises en considération.

1.2.2 Facteur d'angle $f(\psi)$

$$f(\psi) = \frac{0,291}{\sin \psi - 0,202 \cos \psi} \quad [-] \quad (2)$$

Angle moyen ψ_{0m} [°]	$f(\psi)$ [-]
28,0	1,00
30,0	0,90
32,5	0,79
35,0	0,71
37,5	0,65
40,0	0,60
45,0	0,52
50,0	0,46

Tableau 4

Les petits angles de pente provoquent une longue période de retour et vice-versa.

2 Débit

2.1 Zone de départ vaguement rectangulaire

La formule (3) donne le débit :

$$Q = B_0 d_0 v_0 \quad [m^3/s] \quad (3)$$

B_0 [m] plus grande largeur de la zone de départ (mesurée selon une ligne droite, et non pas le long d'une courbe de niveau)

d_0 [m] épaisseur moyenne de l'écoulement (mesurée perpendiculairement à la pente)

v_0 [m/s] vitesse à la sortie de la zone de déclenchement

$$v_0 = \sqrt{d_0 \xi (\sin \psi - \mu \cos \psi)} \quad [\text{m/s}] \quad (4)$$

ξ [m/s²] facteur de frottement turbulent

μ [-] coefficient de frottement solide

$\psi = \psi_{0m}$ [°] angle moyen de la zone de déclenchement

2.2 Zone de départ de forme quelconque

Le débit Q vaut :

$$Q = \frac{K}{\Delta t} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (5)$$

K [m³] volume de neige engagé dans l'avalanche.

Δt [s] temps d'écoulement moyen pour que le volume de neige engagé dans l'avalanche arrive au bord aval de la zone de départ

$$\Delta t = \frac{f}{v_m} \quad [\text{s}] \quad (6)$$

λ [m] plus grande distance parcourue par un petit volume de neige qui se détache dans la zone de départ.

v_m [m/s] vitesse moyenne le long de λ (utiliser la formule (4) avec ψ calculé le long de λ)

La distance λ ne doit en aucun cas être choisie trop grande (p. ex. ne pas tenir compte de bras latéraux dans la zone de départ), sinon le débit Q risque d'être sous-estimé, par rapport à la valeur maximale déterminante.

3 Vitesse et hauteur dans la zone d'écoulement

Si nécessaire, la vitesse v et la hauteur d'écoulement d peuvent être calculées dans la zone d'écoulement à partir du débit Q .

3.1 Avalanche de versant

Une avalanche est dite de versant si :

- la pente est uniforme
- l'écoulement est faiblement canalisé (le rapport largeur sur hauteur est supérieur à 20)

Dans ce cas :

$$v = \left[\frac{Q}{B} \xi (\sin \psi - \mu \cos \psi) \right]^{1/3} \quad [\text{m/s}] \quad (7)$$

$$d = \frac{Q}{Bv} \quad [\text{m}] \quad (8)$$

B [m] largeur de l'avalanche

ψ [°] pente moyenne sur un tronçon amont de 100 à 200 m (correspondant à x_u au paragraphe 4.3)

3.2 Avalanche de couloir

Si une avalanche ne remplit pas les critères précédents, on parle d'avalanche de couloir.

$$v = \sqrt{R \xi (\sin \psi - \mu \cos \psi)} \quad [\text{m/s}] \quad (9)$$

R [m] rayon hydraulique

$$R = F/U \quad [\text{m}] \quad (10)$$

F [m²] section mouillée (surface de la section de l'avalanche perpendiculaire à la pente)

U [m] périmètre mouillé

ψ [°] angle de pente défini comme en l'article 3.1.

En général, on cherche la vitesse par **itérations successives** : on suppose la hauteur, on tire F (section mouillée) puis U (périmètre mouillé). On calcule R (rayon hydraulique) par (10) puis v (vitesse) par (9). On vérifie avec Q (débit) par $Q = Fv$.

4 Vitesse et hauteur au début de la zone d'arrêt

4.1 Point représentatif du début de la zone d'arrêt

Le **point représentatif** du début de la zone d'arrêt que l'on note **P**, dépend uniquement du coefficient de frottement μ et de l'angle de pente ψ . Le mouvement se ralentit dès que ψ satisfait à :

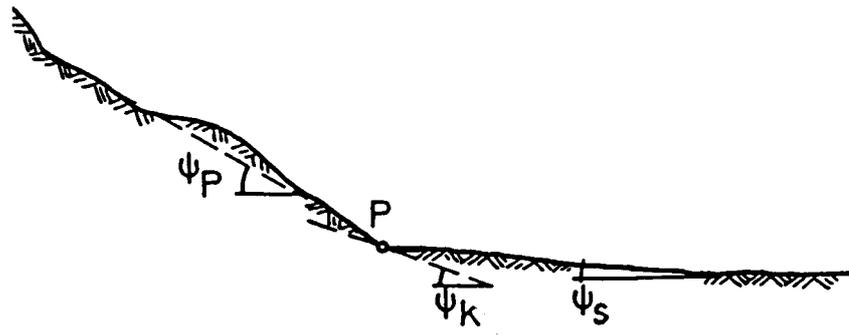
$$\sin \psi - \mu \cos \psi = 0 \quad (\text{voir formule 7})$$

On en déduit la définition de l'**angle critique** ψ_c :

$$\boxed{\tan \psi_c = \mu} \quad \text{Définition du point P} \quad (11)$$

En aval de P, la **pente moyenne de la zone de dépôt** ψ_s doit vérifier la condition :

$$\boxed{\tan \psi_s < \mu} \quad \text{Définition de la zone de dépôt} \quad (12)$$



μ	Point P		
	Angle critique [°]	Écart horizontal des lignes de niveau de 10 m [mm]	
		Plan 1:10 000	Plan 1:5 000
0,155	8,8	6,45	12,90
0,20	11,3	5,00	10,00
0,25	14,0	4,00	8,00
0,30	16,7	3,33	6,66

Tableau 5

L'écart horizontal est l'écart moyen des lignes de niveau sur toute la largeur de la zone concernée par l'avalanche.

Dans la **zone d'arrêt**, l'**angle de pente** doit être plus **petit**, c'est à dire que l'**écart entre les lignes de niveau** doit être plus **grand** que dans le tableau 5.

4.2 Évaluation de la vitesse et de la hauteur d'écoulement en P

De Q calculé (formule (3) ou (5)), on peut tirer directement la vitesse v_P , l'épaisseur d_P et la largeur B_P de l'avalanche à l'amont de P dans la zone d'écoulement.

Pour une **avalanche de versant** en amont et en aval de P on a:

$$v_P = \left[\frac{Q}{B_P} \xi (\sin \psi_P - \mu \cos \psi_P) \right]^{1/3} \quad [\text{m/s}] \quad (13)$$

$$d_p = \frac{Q}{B_p v_p}$$

[m]

(14)

B_P [m] largeur de l'avalanche au point P, estimée dans la zone d'écoulement à l'amont de P (voir article 4.3)

ψ_P [°] valeur déterminante de l'angle de pente dans la zone d'écoulement à l'amont de P

Lorsque l'avalanche est de couloir à l'amont de P et de versant à l'aval de P, on a:

$$v_P = \sqrt{R_P \xi (\sin \psi_P - \mu \cos \psi_P)} \quad [m] \quad (15)$$

R_P [m] rayon hydraulique dans la zone d'écoulement à l'amont de P (voir article 4.3).

La largeur de l'avalanche à l'aval de P en quittant le couloir (c'est alors une avalanche de versant **sans diffusion latérale** avec le même débit Q donné) devient (cf 7) :

$$B_P = \frac{Q}{v_P^3} \xi (\sin \psi_P - \mu \cos \psi_P) \quad [m] \quad (16)$$

où v_P a été calculée à partir de (15). On trouve alors :

$$d_P = \frac{Q}{B_P v_P} \quad [m] \quad (17)$$

Par cette méthode on obtient les distances d'arrêt déterminantes les plus longues car on a supposé qu'il n'y avait aucune diffusion latérale.

Toutefois, on peut considérer la cas d'une **diffusion latérale** de l'avalanche après le point P : il suffit de remplacer dans (13) et (14) B_P par une nouvelle B_P estimée.

4.3 Valeur déterminante de l'angle de pente à l'amont de P

4.3.1 Généralités sur le changement de pente

Les vitesses et épaisseurs calculées en (7), (8), (9) et (10) restent **constantes** tant que la pente est suffisamment étendue et d'inclinaison uniforme ψ_1 .

Mais dès que l'angle change de ψ_1 à ψ_2 il y a une zone de transition de longueur x_u (comptée à partir du changement de pente). A la fin de cette zone de transition, v et d ont une nouvelle valeur calculée à partir de ψ_2 et des formules susmentionnées 7, 8, 9 et 10. On a pour valeur de x_u :

$$x_u = 0,7 \frac{\xi}{g} d_2 \quad [m] \quad (18)$$

avec : $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ accélération de la pesanteur

x_u [m] distance mesurée à partir du changement de pente

4.3.2 Estimation de l'angle de pente à l'amont de P

On considère les deux cas suivants :

Cas 1 : A l'amont du point P, sur une distance connue, l'angle de pente est **supérieur** d'au moins 4 à 5° à l'**angle critique** indiqué dans le tableau 5.

Il faut alors :

- 1) estimer la pente moyenne de la zone de transition sur environ 200 m en amont de P.
- 2) calculer v_p et d_p avec (13) et (14).
- 3) vérifier que cette longueur en amont de P est compatible avec (18) (où l'on remplace d_2 par d_p).
- 4) estimer le cas échéant un nouvel angle moyen sur une nouvelle zone de transition avec une longueur modifiée (la pente du terrain n'est pas en général uniforme).

5) calculer de nouveau v_p et d_p .

6) vérifier de nouveau la longueur de la zone de transition avec (18)

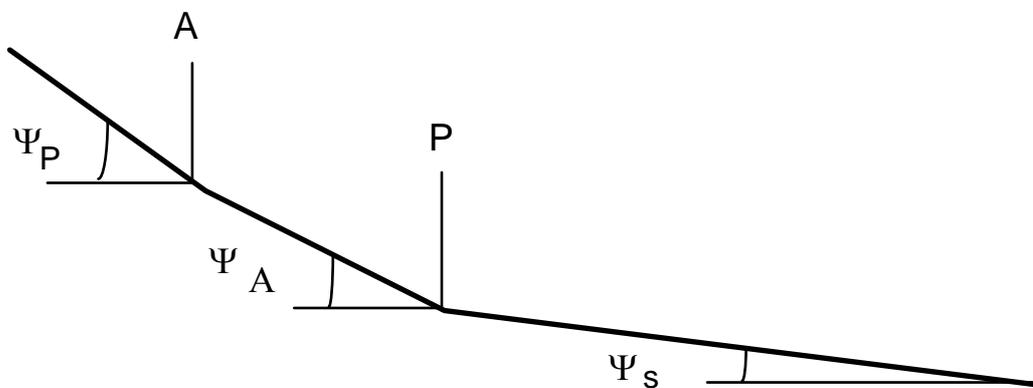
En règle générale, **une seule** correction suffit (x_u doit être estimée à $\pm 10\%$).

Avec la valeur finale de ψ_p , on calcule v_p et d_p et la longueur de la zone de dépôt (cf. article 5).

Cas 2 : A l'amont du point P, sur quelque distance, l'angle de pente n'est **guère supérieur** à l'angle critique indiqué dans le tableau 5.

Il faut alors :

1) déterminer la position du point A situé à l'amont de P, tel que le tronçon [AP] ait un angle de pente ne dépassant pas la valeur critique ψ_c de plus d'environ 3° à 4° ($\psi_A \sim \psi_c + 3,5^\circ$). Dès que la valeur de l'angle de pente dépasse ψ_A , le point A est atteint.



μ	Point A		
	$\psi_A \leq \psi_c + 3,5^\circ$ [°]	Ecart horizontal des lignes de niveau de 10 m [mm]	
		Plan 1:10 000	Plan 1:5 000
0,155	$8,8 + 3,5 = 12,3$	4,58	9,16
0,20	$11,3 + 3,5 = 14,8$	3,78	7,56
0,25	$14,0 + 3,5 = 17,5$	3,16	6,33
0,30	$16,7 + 3,5 = 20,2$	2,72	5,44

Tableau 6

L'écart horizontal est l'écart moyen des lignes de niveau sur toute la largeur de la zone concernée par l'avalanche.

- 2) tirer ψ_P en A comme on l'a fait dans le cas 1
- 3) en déduire les valeurs de v_P et d_P en A
- 4) supposer que, **au point P**, la vitesse v_P et l'épaisseur d_P en P sont **identiques** aux valeurs trouvées en A (et même constantes tout le long du tronçon [AP])

5 Zone de dépôt

$$d_s = d_P + \frac{v_P^2}{10g} \quad (19)$$

d_s [m] hauteur de neige moyenne dans la zone de dépôt (mais en réalité cette valeur est la plupart du temps plus petite à cause de la diffusion latérale; il faut utiliser malgré tout la valeur calculée selon (19))

On tire aussi les relations suivantes

$$\boxed{V^2 = d_s \xi (-\sin \psi_s + \mu \cos \psi_s)} \quad [m^2/s^2] \quad (20)$$

ψ_s [°] angle moyen dans la zone d'arrêt

$$\boxed{s = \frac{d_s \xi}{2g} \ln \left[1 + \frac{v_P^2}{V^2} \right]} \quad [m] \quad (21)$$

s [m] distance d'arrêt (à peu près proportionnelle à l'épaisseur moyenne d_0)

s peut indiquer une longueur **curviligne** si le dépôt adopte une forme courbe.

Si dans la zone d'arrêt ψ_s change notablement en passant de ψ_{s_1} à ψ_{s_2} , alors :

- on cherche la position d'un point P_2 correspondant à ce changement d'angle ψ_{s_2}
- on mesure l'écart x [m] entre P_1 et P_2 : $x = d(P_1, P_2)$
- on obtient la distance d'arrêt théorique s_1 (correspondant à P_1 et à ψ_{s_1}) où $s_1 > x$
- on calcule la vitesse en P_2 par :

$$\boxed{v_{P_2}^2 = v_{P_1}^2 (1 - x / s_1)} \quad [m^2/s^2] \quad (22)$$

- en connaissant ψ_{s_2} et v_{P_2} , et en supposant que $d_{s_2} = d_{s_1}$, on peut calculer s_2
- la distance d'arrêt totale est bien-sûr $s = x + s_2$

6 Valeurs pour ξ et μ

Les valeurs sont valables dans n'importe quelle partie de l'écoulement considéré (zone de départ, d'écoulement, d'arrêt).

6.1 Valeurs pour ξ

	Conditions (indépendantes de la grosseur de l'avalanche)
1000	- pente uniforme - faible rugosité - faible canalisation (la largeur est supérieure à dix fois la hauteur)
500 - 600	- forte rugosité (de l'ordre de m) - forte canalisation (largeur de une à deux fois supérieure à la hauteur)
400	- zone de forêt

Tableau 7

Remarques :

- ξ dépend surtout de la **géométrie** de la zone d'écoulement (rugosité, forme de canalisation, arbres...);
- En cas de doute sur l'importance de la rugosité, il ne faut pas hésiter à prendre une valeur élevée pour ξ car les faibles rugosités peuvent être aplaniées par de la neige d'avalanche.
- Une même avalanche peut avoir des coefficients ξ différents (par exemple, zone de rupture étendue et écoulement canalisé dans un couloir d'avalanche).

6.2 Valeurs pour μ

μ [-]	Conditions
0,155	- grosse avalanche (rare et dont le volume atteint ou dépasse 10^5 m^3) - altitude supérieure à environ 1300 m - épaisseur d'écoulement supérieure à 1-2 m
0,20	- grosse avalanche (rare et dont le volume atteint ou dépasse 10^5 m^3) - altitude inférieure à environ 1300-1500 m - épaisseur d'écoulement supérieure à 1-2 m
0,25 - 0,30	- petite avalanche (fréquente et dont le volume avoisine les 10^4 m^3 ou moins) - toute altitude - épaisseur d'écoulement inférieure à 1-2 m
0,30	- avalanche de neige mouillée de toute grandeur et à toute altitude

Tableau 8

Remarques :

- μ dépend surtout des **caractéristiques intrinsèques** à l'avalanche (masse volumique, teneur en eau liquide, température...), mais aussi de sa **vitesse** (μ décroît lorsque la vitesse augmente) et de la **pression** que peut exercer la neige de l'écoulement sur le sol.
- Les altitudes indiquées se rapportent à la zone de dépôt.
- Pour un cheminement donné et des conditions autrement identiques, μ peut varier entre $\mu = 0,155$ pour de grosses avalanches et $\mu = 0,300$ pour de petites avalanches.

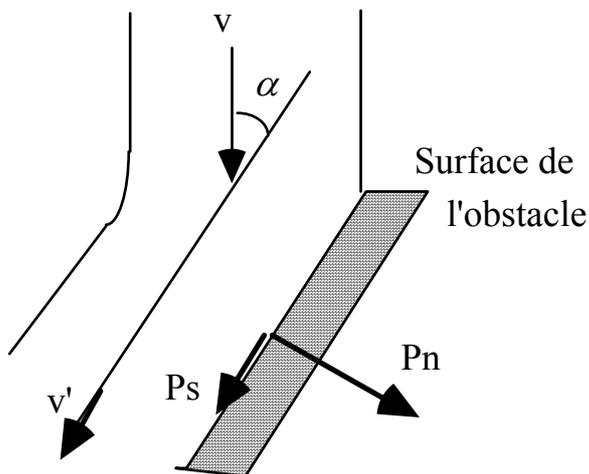
D EFFORTS EXERCES PAR UNE AVALANCHE

En principe, on considère que les contraintes exercées par une avalanche sur un obstacle qu'elle rencontre sont **stationnaires** (c'est-à-dire indépendantes du temps).

Mais le heurt de blocs de neige plus volumineux peut créer des surpressions et dépasser le double de la pression normale durant de courts instants (durée de l'ordre de 10^{-2} s).

1 Effort exercé sur un obstacle important

On considère que l'obstacle est "important" dès qu'il est capable de dévier l'écoulement de l'avalanche d'un angle α uniforme.



$$p_n = \rho v^2 \sin^2 \alpha \quad [\text{N/m}^2] \quad (23)$$

p_n [N/m²] pression stationnaire normale à la surface de l'obstacle

ρ [kg/m³] masse volumique de la neige

v [m/s] vitesse d'arrivée sur l'obstacle

α [°] angle de déviation (entre v et v')

$$\boxed{p_s = \mu \cdot p_n} = \mu \rho v^2 \sin^2 \alpha \quad [\text{N/m}^2] \quad (24)$$

p_s [N/m²] contrainte tangentielle (cisaillement)

p_n [N/m²] pression stationnaire normale à la surface de l'obstacle.
Si l'avalanche passe **au dessus** de l'obstacle (galerie...), il faut rajouter à p_n le **poids de l'avalanche**: $P_{\text{neige}} = \rho g d \cos \psi$

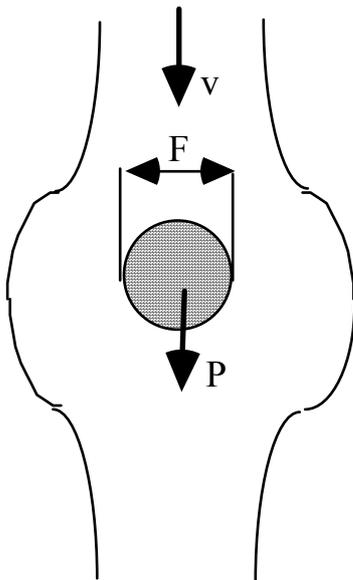
Les ouvrages doivent être dimensionnés de façon qu'ils supportent le poids d'une éventuelle couche de neige au repos ainsi que les forces exercées par l'écoulement passant par-dessus.

Pour le dimensionnement d'ouvrages, μ varie entre **0,30 et 0,40** avec la tendance suivante :

- $\mu = 0,30$ contact neige/neige ou neige/béton
- $\mu = 0,40$ contact neige/sol nu ou neige/mur rugueux

2 Effort exercé sur un petit obstacle

On parle de "petit" obstacle quand celui-ci ne dérange pas fortement l'écoulement et ne provoque pas de changement de direction notable.



$$P = cF \frac{\rho v^2}{2} \quad [N] \quad (25)$$

P	[N]	résultante des efforts
$\frac{\rho v^2}{2}$	[N/m ²]	pression dynamique de l'avalanche (ρ densité, v vitesse)
F	[m ²]	surface de la projection de l'obstacle sur le plan perpendiculaire à la vitesse
c	[-]	coefficient de résistance dépendant de la géométrie valeur approximatives: - forme vaguement circulaire $c = 1$ - forme vaguement droite $c = 2$

3 Remarques sur le calcul des efforts

- Pour aller dans le sens de la sécurité, il est conseillé de prendre des masses volumiques de l'ordre de 300 kg/m³.
- On peut prendre des valeurs plus faibles pour des avalanches rapides de neige sèche.
- Les ouvrages sont sollicités sur une **hauteur totale d_{tot}** de :

$$d_{tot} = d + \frac{v^2}{2g\lambda} \quad [m] \quad (26)$$

d	[m]	épaisseur d'écoulement (pour les avalanches de versant : formule 8)
$\frac{v^2}{2g\lambda}$	[m]	surépaisseur du dépôt dans la zone de compression

On choisit pour valeurs de λ :

- $\lambda = 1,5$ pour des avalanches de neige légère et sèche
- $\lambda = 2$ à 3 pour des avalanches de neige lourde

Pour des hauteurs allant de 0 à d, la pression exercée est constante.

Pour des hauteurs allant de d à d_{tot} , la pression varie linéairement de P à 0.

La surface de glissement est normalement au-dessus de la surface du sol. Entre le sol et la surface de glissement, la neige est au repos et on peut donc y négliger les effets dynamiques.

Pour de petits obstacles, on peut limiter la hauteur d'impact à une épaisseur du dépôt de:

Erreur !

- f(b/d) [-] facteur de réduction
- b [m] largeur de l'obstacle perpendiculaire à la direction de l'écoulement
- d [m] épaisseur de l'écoulement

On donne les valeurs indicatives suivantes :

b/d	0,1	0,5	1	2	≥ 3
f(b/d)	0,1	0,4	0,7	0,9	1

Des coups de béliers peuvent se produire si l'avalanche transporte des arbres arrachés, des pierres, des débris....

4 Estimation de la limite de 30 kN/m² sur les cartes de localisation du risque d'avalanche

Avec une masse volumique usuelle de 300 kg/m³ et une pression normale à un gros obstacle égale à $p_n = \rho v^2$, on atteint une vitesse de :

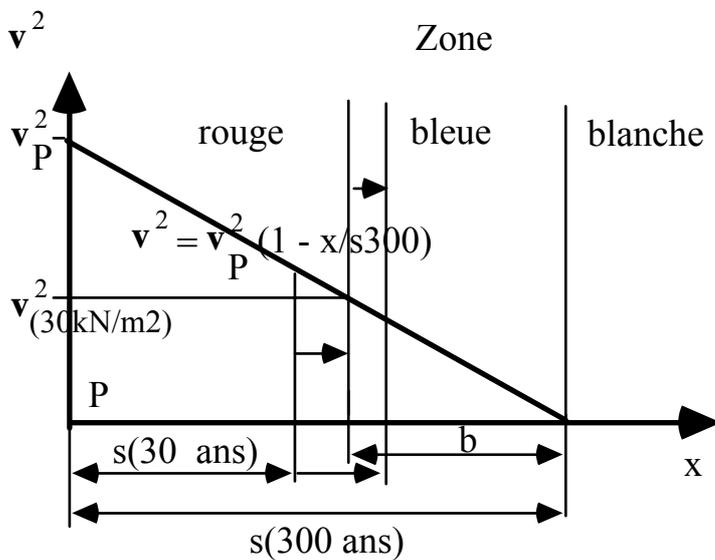
$$v(30 \text{ kN/m}^2) = 10 \text{ m/s}$$

Avec une diminution linéaire de v^2 dans la zone de dépôt, on peut estimer la distance b entre la limite de 30 kN/m^2 et celle de la zone d'arrêt par :

$$b = s \frac{v^2(30\text{kN/m}^2)}{v_P^2} = s \frac{100}{v_P^2} \quad [\text{m}] \quad (28)$$

s [m] distance d'arrêt de l'avalanche dont la période de retour est de 300 ans.

v_P [m/s] vitesse en P (début de la zone d'arrêt)



La totalité de la zone balayée par des **avalanches de période de retour de 30 ans** constitue la zone rouge. C'est pourquoi il faut toujours vérifier que cette condition n'est pas plus forte que celle imposée par la limite des 30 kN/m^2 .

E EXEMPLES D'APPLICATIONS

1 ARIEFA / SAMEDAN

Caractéristiques:

- grosse avalanche de versant (volume avoisinant les 8.10^4 m^3)

$$\xi = 1000 \text{ m/s}^2 \quad (\text{tableau 7})$$

$$\mu = 0,155 \quad (\text{tableau 8})$$

- cas 1 (cf. 4.3.2) $(\psi_P \gg 8,8^\circ + 5^\circ)$

- pente zone d'arrêt uniforme ψ_S

C 1 Zone de départ

C 1.1 Dimensions

- altitude : 2000 à 2340 m

- largeur : 160 m (valeur prépondérante)

- angle moyen du versant ψ_{0m} : $38,5^\circ$ (valeur moyenne sur la surface)

C 1.2 Epaisseur de départ

$$- d_0^* = 1,60 \quad T = 300 \text{ ans, influence du vent comprise} \quad (\text{tableau 2})$$

$$- f(38,5^\circ) = 0,63 \quad (2)$$

$$- d_0 = 1,60 \cdot 0,63 = \mathbf{1,00 \text{ m}} \quad (1)$$

C 2.1 Débit (zone de départ de forme rectangulaire)

$$- v_0 = (1,00 \cdot 1000 (\sin 38,5^\circ - 0,155 \cos 38,5^\circ))^{1/2} = 22,4 \text{ m/s} \quad (4)$$

$$- Q = 160 \cdot 1,00 \cdot 22,4 = 3580 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3)$$

C 4 Vitesse et hauteur au début de la zone d'arrêt

C 4.1 Point de début de la zone de d'arrêt

- Position du point P : alt = 1830 m

(tableau 5)

C 4.2 et 4.3 Vitesse et épaisseur de l'écoulement en P

Angle prépondérant avant P, B_P , v_P et d_P (**cas 1** de l'article 4.3.2)

1^{ère} hypothèse pour ψ_P

- pente entre 1830 et 2000 m $x_u' = 320$ m (mesuré selon l'horizontale)

- $\text{tg } \psi_P = 170 / 320 = 0,531$ $\psi_P = 28,0^\circ$

- $x_u = 320 / \cos 28,0^\circ = 362$ m (mesuré selon l'oblique)

- **largeur de l'avalanche $B_P = 60$ m** (largeur de la canalisation à 1850 m)

- $v_P = ((3580 / 60) \cdot 1000 \cdot (\sin 28,0^\circ - 0,155 \cdot \cos 28,0^\circ))^{1/3}$ (13)
 $= 27,1$ m/s

- hauteur $d_P = 3580 / (60 \cdot 27,1) = 2,20$ m (14)

----> vérification : $x_u = 0,7 \cdot 1000 \cdot 2,20 / 9,81$ (18)
 $= 157$ m < 362 m

une nouvelle itération est à faire !

2^{ème} hypothèse pour ψ_P

- pente entre 1830 et 1900 m $x_u' = 140$ m (mesuré selon l'horizontale))

- $\text{tg } \psi_P = 70 / 140 = 0,500$ $\psi_P = 26,6^\circ$

$x_u = 140 / \cos 26,6^\circ = 157$ m

- largeur de l'avalanche $B_P = 60$ m

- $v_P = 26,4$ m/s (13) $d_P = 2,26$ m (14)

-----> vérification : $x_u = 161$ m (18) de l'ordre de 157 m

En règle OK !

C 5 Distance d'arrêt

observée entre 1830 et 1710 m, de longueur 860 m (mesuré selon l'horizontale)

$$- \operatorname{tg} \psi_s = 120 / 860 = 0,140 \quad \psi_s = 7,94^\circ < \psi_c = 8,8^\circ$$

$$- d_s = 2,26 + (26,4)^2 / 10g = \mathbf{9,36 \text{ m}} \quad (19)$$

$$- V^2 = 9,36 \cdot 1000 (0,155 \cdot \cos 7,94^\circ - \sin 7,94^\circ) = \mathbf{144 \text{ m}^2/\text{s}^2} \quad (20)$$

$$- s = (9,36 \cdot 1000 / 2g) \cdot \ln(1 + (26,4)^2 / 144) = \mathbf{842 \text{ m}} \quad (21)$$

en accord avec l'observation d'environ 860 m !

2 MALBUN / TRIESENBERG (20.1.1951)

Caractéristiques:

- grosse avalanche de versant (volume avoisinant les 6.10^4 m^3)

$$\xi = 1000 \text{ m/s}^2 \quad (\text{tableau 7})$$

$$\mu = 0,155 \quad (\text{tableau 8})$$

- cas 2 (cf. 4.3.2) $(\psi_P \text{ voisin de } 11^\circ < 8,8^\circ + 5^\circ)$

- pente zone d'arrêt uniforme ψ_s

C 1 Zone de départ

C 1.1 Dimensions

- altitude : 2000 à 2100 m et 1900 à 1970 m

- largeur : 200 m (valeur prépondérante)

- angle moyen du versant $\psi_{0m} : 37,6^\circ$ (valeur moyenne sur la surface)

C 1.2 Epaisseur de départ

- $d_0^* = 1,85 \text{ m}$ $T = 300 \text{ ans}$, valeur moyenne (tableau 2)

- $f(37,6^\circ) = 0,65$ (2)

- $d_0 = 1,85 \cdot 0,65 = 1,20 \text{ m}$ (1)

C 2.1 Débit (zone de départ de forme rectangulaire)

- $v_0 = (1,20 \cdot 1000 (\sin 37,6^\circ - 0,155 \cdot \cos 37,6^\circ))^{1/2} = 24,2 \text{ m/s}$ (4)

- $Q = 200 \cdot 1,20 \cdot 24,2 = 5803 \text{ m}^3/\text{s}$ (3)

C 4 Vitesse et hauteur au début de la zone d'arrêt

C 4.1 Point de début de la zone d'arrêt

- Position du point P : alt = **1720 m** (tableau 5)

C 4.2 et 4.3 *Vitesse et épaisseur de l'écoulement en P*

Angle prépondérant avant P, B_P , v_P et d_P (**cas 2** de l'article 4.3.2)

Position du point A : **1750 m**

Justification : depuis 1720 m jusqu'à 1750 m sur une longueur de 160 m la pente est :

$$\text{tg } \psi_A = 30 / 160 = 0,188 \quad \psi_A = \mathbf{10,6^\circ} < 12,3^\circ \text{ (tableau$$

6)

A partir de la cote 1750 m l'angle de pente est considérablement plus fort.

Hypothèse pour ψ_P (à partir du point A)

- pente entre 1750 et 1810 m $x_u' = 150$ m (mesuré selon
l' horizontale)

- $\text{tg } \psi_P = 60 / 150 = 0,400$ $\psi_P = \mathbf{21,8^\circ}$

- $x_u = 150 / \cos 21,8^\circ = \mathbf{162}$ m (mesuré selon l'oblique)

- **largeur de l'avalanche $B_P = 80$ m** (largeur de la canalisation à 1780 m)

$$- v_P = v_A \cdot ((5803 / 80) \cdot 1000 \cdot (\sin 21,8^\circ - 0,155 \cdot \cos 21,8^\circ))^{1/3} \quad (13)$$

$$= \mathbf{25,5} \text{ m/s}$$

$$- \text{ hauteur } d_P = 5803 / (80 \cdot 25,5) = \mathbf{2,85} \text{ m} \quad (14)$$

$$----> \text{ vérification : } x_u = 0,7 \cdot 1000 \cdot 2,85 / 9,81 = \mathbf{203} \text{ m } \spadesuit 162 \text{ m} \quad (18)$$

La valeur présente de x_u est juste trop courte. En tenant compte de l'escarpement au dessus de 1810 m ψ_P augmenterait de manière irréaliste.

C 5 Distance d'arrêt

observée entre 1720 et 1660 m, de longueur 510 m (mesurée selon l'horizontale)

$$\text{tg } \psi_s = 60 / 510 = 0,118 \quad \psi_s = \mathbf{6,71^\circ} < \psi_c = 8,8^\circ$$

$$d_s = 2,85 + (25,5)^2 / 10g = \mathbf{9,48 \text{ m}} \quad (19)$$

$$V^2 = 9,48 \cdot 1000 (0,155 \cdot \cos 6,71^\circ - \sin 6,71^\circ) = \mathbf{352 \text{ m}^2/\text{s}^2} \quad (20)$$

$$s = (9,48 \cdot 1000 / 2g) \cdot \ln(1 + (25,5)^2 / 352) = \mathbf{506 \text{ m}} \quad (21)$$

en accord avec l'observation d'environ 510 m !

3 PARDENN / KLOSTERS (23.2.1970)

Caractéristiques:

- zone de départ de forme non rectangulaire
- dans la zone de départ, avalanche de versant, dans la zone d'écoulement avalanche canalisée (volume K avoisinant les $4,6 \cdot 10^5 \text{ m}^3$)

$$\xi = 1000 \text{ m/s}^2 \quad (\text{dans la partie canalisée, à vérifier suivant le tableau 7})$$
$$\mu = 0,155 \quad (\text{tableau 8})$$

- avalanche de versant avec développement important d'aérosol (voir zone de départ sur le plan)
- cas 2 (cf. 4.3.2) $(\psi_P \text{ voisin de } 11^\circ < 8,8^\circ + 5^\circ)$
- deux pentes dans la zone d'arrêt

C 1 Zone de départ

C 1.1 Dimensions

- altitude : 2460 à 2700 m
- angle moyen du versant $\psi_{0m} : 30,0^\circ$ (valeur moyenne sur la surface)

C 1.2 Epaisseur de départ

- $d_0^* = 2,10 \text{ m}$ $T = 300 \text{ ans}$, valeur maximale (influence du vent)
(tableau 2)

$$- f(33,0^\circ) = 0,78 \quad (2)$$

$$- d_0 = 2,10 \cdot 0,78 = \mathbf{1,64 \text{ m}} \quad (1)$$

C 2.2 Débit (zone de départ de forme quelconque)

Surface de départ (mesurée selon l'horizontale) : $F' = 236 \cdot 10^3 \text{ m}^2$

Hauteur de départ : $h_0 = 1,64 / \cos 33,0^\circ = 1,96 \text{ m}$

Volume : $K = 236 \cdot 10^3 \cdot 1,96 = 463 \cdot 10^3 \text{ m}^3$

Plus grande distance : $\lambda' = 485 \text{ m}$ (mesuré selon l'horizontale)

Angle moyen selon λ : $\psi = 26,3^\circ$ ($\text{tg } \psi = 240 / 485 = 0,495$)

Plus grande distance : $\lambda = 485 / \cos 26,3^\circ = 541 \text{ m}$
(mesuré selon l'oblique)

$$- v_m = (1,64 \cdot 1000 (\sin 26,3^\circ - 0,155 \cdot \cos 26,3^\circ))^{1/2} = 22,3 \text{ m/s} \quad (4)$$

$$- \Delta t = 541 / 22,3 = 24,3 \text{ s} \quad (6)$$

$$- Q = 463 \cdot 10^3 / 24,3 = 19,1 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s} \quad (5)$$

C 4 Vitesse et hauteur au début de la zone d'arrêt

C 4.1 Point de début de la zone d'arrêt

- Position du point P : alt = **1420 m** (tableau 5)

C 4.2 et 4.3 Vitesse et épaisseur de l'écoulement en P

Angle prépondérant avant P, B_p , v_p et d_p (cas 2 de l'article 4,3,2)

Position du point A : alt = **1480 m**

Justification : depuis 1470 m jusqu'à 1480 m sur une longueur de 50 m la pente est :

$$\text{tg } \psi_A = 10 / 50 = 0,20 \quad \psi_A = 11,3^\circ < 12,3^\circ \text{ (tableau 6)}$$

A partir de 1480 m l'angle de pente est plus fort.

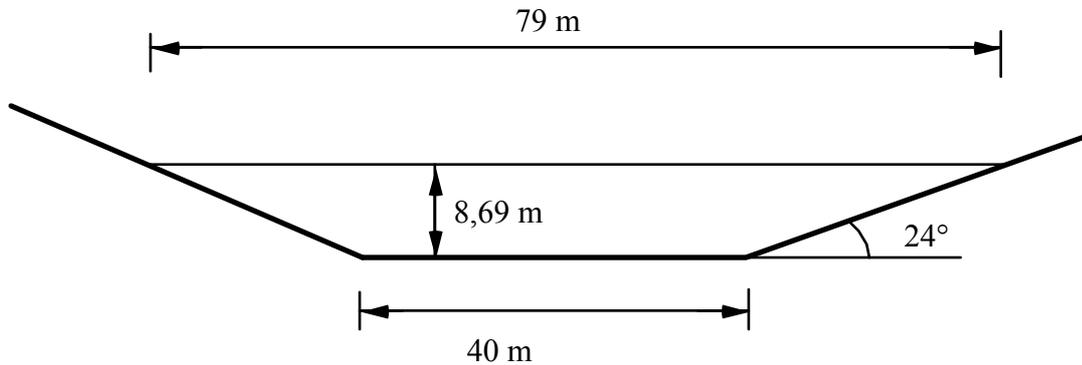
Hypothèse pour ψ_P (à partir du point A)

- pente entre 1480 et 1700 m $x_u' = 560 \text{ m}$ (mesuré selon l'horizontale)

$$- \text{tg } \psi_P = 220 / 560 = 0,393 \quad \psi_P = 21,4^\circ$$

- $x_u = 560 / \cos 21,4^\circ = 601 \text{ m}$ (mesuré selon l'oblique)

Profil d'écoulement idéalisé à la cote 1600 m :



Avec le débit donné Q, la hauteur d'écoulement est calculée et vaut 8,69 m après une itération (voir page 9).

Justification : $F = 40 \cdot d + d^2 / \operatorname{tg} 24^\circ = 517 \text{ m}^2$

$$U = 40 + 2 \cdot d / \sin 24^\circ = 82,7 \text{ m}$$

$$R = 517 / 82,7 = 6,25 \text{ m} \quad (10)$$

$$- v_p = (6,25 \cdot 1000 \cdot (\sin 21,4^\circ - 0,155 \cdot \cos 21,4^\circ))^{1/2} = 37,2 \text{ m/s} \quad (15)$$

$$Q = 517 \cdot 37,2 = 19,1 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s} \quad (= Q \text{ calculé par C 2.2 en page 30})$$

$$\text{Vérification } \psi_P : x_u = 0,7 \cdot 1000 \cdot 8,69 / 9,81 = \mathbf{620 \text{ m}} \spadesuit 602 \text{ m} \quad (18)$$

La valeur présente de x_u correspond bien à l'hypothèse (à la valeur supposée).

Rapport largeur de l'avalanche sur sa hauteur supérieur à 10 (tableau 7)

Transition d'une avalanche de couloir à une avalanche de versant sans diffusion latérale :

$$B_p = 19,2 \cdot 10^3 / 37,2^3 \cdot 1000 \cdot (\sin 21,4^\circ - 0,155 \cos 21,4^\circ) = \mathbf{82,3 \text{ m}} \quad (16)$$

$$d_p = 19,2 \cdot 10^3 / (82,3 \cdot 37,2) = \mathbf{6,27 \text{ m}} \quad (17)$$

C 5 Distance d'arrêt

Zone d'arrêt observée :

- première partie : entre 1470 et 1450 m, de longueur 150 m
- deuxième partie : entre 1450 et 1440 m, de longueur 415 m

Première partie de la zone d'arrêt : du point P₁ (altitude : 1470 m)

$$\operatorname{tg} \psi_{s_1} = 20 / 150 = 0,133 \quad \psi_{s_1} = 7,6^\circ < \psi_k = 8,8^\circ$$

$$d_{s_1} = 6,27 + (37,2)^2 / 10g = \mathbf{20,4 \text{ m}} \quad (19)$$

$$V_1^2 = 20,4 \cdot 1000 (0,155 \cdot \cos 7,6^\circ - \sin 7,6^\circ) = \mathbf{436 \text{ m}^2/\text{s}^2} \quad (20)$$

$$s_1 = (20,4 \cdot 1000 / 2g) \cdot \ln(1 + (37,2)^2 / 436) = \mathbf{1485 \text{ m}} \quad (21)$$

Deuxième partie de la zone d'arrêt : du point P₂ (altitude : 1450 m)

$$\operatorname{tg} \psi_{s_2} = 10 / 415 = 0,0241 \quad \psi_{s_2} = 1,4^\circ < \psi_k = 8,8^\circ$$

vitesse en P₂ (distance P₁ - P₂ = 150 m)

$$v_{P_2}^2 = 37,2^2 (1 - 150 / 1485) = 1244 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (22)$$

$$v_{P_2} = \mathbf{35,3 \text{ m/s}}$$

$$d_{s_2} = d_{s_1} = \mathbf{20,4 \text{ m}}$$

$$V_2^2 = 20,4 \cdot 1000 (0,155 \cdot \cos 1,4^\circ - \sin 1,4^\circ) = \mathbf{2 \text{ 663 m}^2/\text{s}^2} \quad (20)$$

$$s_2 = (20,4 \cdot 1000 / 2g) \cdot \ln(1 + (35,3)^2 / 2 \text{ 663}) = \mathbf{399 \text{ m}} \quad (21)$$

Distance totale d'arrêt (depuis P₁)

$$s = s_1 + s_2 = 150 + 399 = 549 \text{ m}$$

Contrairement à la longueur totale observée de la zone d'arrêt d'environ 600 m, la valeur calculée est trop courte (voir plan). Il est à remarquer que la surface d'arrêt dessinée sur le plan est à fortiori trop grande (surtout la surface latérale) parce qu'elle comprend également celle de l'aérosol. Des observations sur le terrain ont cependant révélé un écoulement dense jusqu'à la ligne de niveau 1440 m avant la contrepente.

4 GROSSI CHIRCHENLAUI / MURGTAL

Caractéristiques :

La plus grosse avalanche observée sur une durée de 20 ans laissa une zone de dépôt d'une longueur de 50 à 55 m.

- avalanche de versant, petite, massive (volume avoisinant les $2,4 \cdot 10^4 \text{ m}^3$)

$$\mu = 0,3 \quad (\text{tableau 8})$$

- zone d'arrêt avec 2 pentes :

- pour la première distance : $\xi = 500 \text{ m/s}^2$ (rochers + bosquets atteignant un mètre ou plus)

- pour la deuxième distance : $\xi = 1000 \text{ m/s}^2$ (pente uniforme)

- dans la zone de départ et d'écoulement :

$$\xi = 1000 \text{ m/s}^2 \quad (\text{tableau 7})$$

- les avalanches se produisant sont, soit sèches, soit mouillées (après de fortes chutes de pluie)

- cas 1 (cf. 4.3.2) $(\psi_P \gg 8,8^\circ + 5^\circ)$

C 1 Zone de départ

C 1.1 Dimensions

- altitude : 1770 à 1200 m

- largeur moyenne : $B_0 = 30 \text{ m}$

- angle moyen ψ_{0m} : $39,4^\circ$ (valeur moyenne sur la surface)

C 1.2 Epaisseur de départ

- $d_0^* = 1,10 \text{ m}$ valeur moyenne pour $T = 20$ ans (observée)
(valeur pour $T = 30$ ans donnée dans le tableau 2)

$$- f(39,4^\circ) = 0,61 \quad (2)$$

$$- \mathbf{d_0} = 1,10 \cdot 0,61 = \mathbf{0,67 \text{ m}} \quad (1)$$

C 2.1 Débit (zone de départ de forme rectangulaire, bras gauche orographique prépondérant)

$$- v_0 = (0,67 \cdot 1000 (\sin 39,4^\circ - 0,3 \cdot \cos 39,4^\circ))^{1/2} = \mathbf{16,4 \text{ m/s}} \quad (4)$$

$$- Q = 30 \cdot 0,67 \cdot 16,4 = 330 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3)$$

C 4 Vitesse et hauteur au début de la zone d'arrêt

C 4.1 *Point de début de la zone d'arrêt*

- Position du point P : alt = **1100 m** (tableau 5)

C 4.2 et 4.3 *Vitesse et épaisseur de l'écoulement en P*

Angle prépondérant avant P, B_p , v_p et d_p (cas 1 de l'article 4.3.2)

1^{ère} hypothèse pour ψ_P

- pente entre 1100 et 1170 m $x_u' = 115 \text{ m}$ (mesuré selon l'horizontale)

$$- \text{tg } \psi_P = 70 / 115 = 0,609 \quad \psi_P = \mathbf{31,3^\circ}$$

- $x_u = 115 / \cos 31,3^\circ = \mathbf{135 \text{ m}}$ (mesuré selon l'oblique)

- **largeur de l'avalanche $B_p = 50 \text{ m}$**

$$- v_p = ((330 / 50) \cdot 1000 \cdot (\sin 31,3^\circ - 0,3 \cdot \cos 31,3^\circ))^{1/3} \quad (13) \\ = 12,0 \text{ m/s}$$

$$- \text{hauteur } d_p = 330 / (50 \cdot 12,0) = 0,55 \text{ m} \quad (14)$$

$$\text{----> vérification : } x_u = 0,7 \cdot 1000 \cdot 0,55 / 9,81 = 39,3 \text{ m} < 135 \text{ m} \quad (18)$$

une nouvelle itération est à faire !

2ème hypothèse pour ψ_P

- pente entre 1100 et 1120 m $x_u' = 35$ m (mesuré selon l'horizontale)

- $\text{tg } \psi_P = 20 / 35 = 0,571$ $\psi_P = 29,7^\circ$ $x_u = 40$ m

- largeur de l'avalanche $B_P = 50$ m

- $v_P = (330 / 50 \cdot 1000 (\sin 29,7^\circ - 0,3 \cdot \cos 29,7^\circ))^{1/3} = 11,6$ m/s (13)

- $d_P = 330 / (50 \cdot 11,6) = 0,57$ m (14)

----> vérification $x_u = 0,7 \cdot 1000 \cdot 0,57 / 9,81 = 40,7$ m de l'ordre de 40 m

En règle OK !

C 5 Distance d'arrêt

Zone d'arrêt observée : 1100 - 1090 m, longueur 50 - 55 m

- première partie : entre 1100 et 1090 m, de longueur 40 m

- deuxième partie : à 1090 m, de longueur 30 m

Première partie de la zone d'arrêt : du point P_1 (altitude : 1100 m)

$\text{tg } \psi_{s1} = 10 / 40 = 0,250$ $\psi_{s1} = 14,0^\circ < \psi_k = 16,7^\circ$

$d_{s1} = 0,57 + (11,6)^2 / 10g = 1,94$ m (19)

$V_1^2 = 1,94 \cdot 500 (0,3 \cdot \cos 14,0^\circ - \sin 14,0^\circ) = 47,7$ m²/s² (20)

$s_1 = (1,94 \cdot 500 / 2g) \cdot \ln(1 + (11,6)^2 / 47,7) = 66,3$ m (21)

Deuxième partie de la zone d'arrêt : du point P_2 (altitude : 1090 m)

$\psi_{s2} = 0^\circ < \psi_k = 16,7^\circ$

vitesse en P_2 (distance $P_1 - P_2 = 40$ m)

$$v_{P_2}^2 = (11,6)^2 (1 - 40 / 66,3) = 53,4 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (22)$$

$$v_{P_2} = \mathbf{7,3 \text{ m/s}}$$

$$d_{s_2} = d_{s_1} = \mathbf{1,94 \text{ m}}$$

$$V_2^2 = 1,94 \cdot 1000 (0,3 \cdot \cos 0^\circ - \sin 0^\circ) = \mathbf{582 \text{ m}^2/\text{s}^2} \quad (20)$$

$$s_2 = (1,94 \cdot 1000 / 2g) \cdot \ln(1 + 53,4 / 582) = \mathbf{8,7 \text{ m}} \quad (21)$$

Attention ici $\xi = \mathbf{1000 \text{ m/s}^2}$

Longueur totale de la zone d'arrêt (depuis P_1)

$$s = 40 + 9 = \mathbf{49 \text{ m}}$$

Correspond parfaitement à la longueur totale observée de la zone d'arrêt d'environ 50 à 55 m.

INDEX

angle critique 9, 12, 13
coefficient de frottement solide 9, 10, 14, 15, 17, 19
coefficient de résistance 20
contraintes 18
couloir 8
débit 6, 7, 8, 10, 11,
facteur d'angle 3, 4, 6
facteur de frottement turbulent 2, 7, 8, 10, 11, 12, 15, 16
hauteur de refoulement 21
périmètre mouillé 8,9
période de retour 3, 4, 5, 22
poussée 19, 2
pression normale 18, 19
pression tangentielle 18, 19
profil topographique 3
rayon hydraulique 8, 9
surface mouillée 8, 9
temps de débit 7
vent 4
versant 8, 10, 11
zone d'arrêt 9
zone de déclenchement 3, 4
zone de départ 2
zone de dépôt 2, 11, 14, 15, 22
zone de transition 12