

Avalanches : des essais en laboratoire à la gestion du territoire

Christophe Ancey

École Polytechnique Fédérale de Lausanne
Faculté *Environnemental Naturel, Architectural et Construit*

Section de génie civil, 11 décembre 2008

christophe.ancey@epfl.ch

Plan de la conférence

- Les avalanches : l'avalanche des skieurs & l'avalanche de l'ingénieur
- Physique des avalanches : écoulement, effets, causes
- Lutte contre les avalanches : historique, stratégie de protection
- Comprendre les avalanches : essais *in situ*, avalanches en laboratoire
- Bilan et perspectives de la recherche sur la neige et les avalanches

Classification des avalanches

Les avalanches : deux menaces, deux points de vue, deux classifications...

- Point de vue du skieur : le danger d'avalanche est intimement lié au type de neige ;
- Point de vue de l'ingénieur : le danger d'avalanche est une conséquence de la nature de l'écoulement.

Et deux problématiques différentes

- Prévoir les avalanches au sens météorologique : quelles pentes sont dangereuses aujourd'hui ?
- Prédire les avalanches : est-ce que cet équipement peut un jour être touché par une avalanche ?

Le point de vue du skieur

Trois types d'avalanche :

- l'avalanche de plaque friable ;
- l'avalanche de plaque dure ;
- l'avalanche de printemps.

Une terminologie souvent confuse, pleine de descriptions quelque peu fantasmagoriques... Toujours employée par les services météorologiques et dans les ouvrages de vulgarisation, cette classification a longtemps transmis des idées fausses sur la neige et les avalanches.

Avalanche dite de *plaque*

Longtemps appelée avalanche de poudreuse, l'avalanche de plaque concerne le plus souvent de la neige récente, poudreuse, mais suffisamment cohésive pour permettre la propagation d'ondes de rupture sur de longues distances.



Caractéristiques : cassure en plaque, vitesse de propagation de la rupture, extension de la cassure [Film : avalanche à Piau Engaly, Jérôme Buc, novembre 2005]

Avalanche dite de *plaque dure*

Longtemps décrite comme de la neige dure (« Schneebrett ») et reliée à l'action du vent (« plaque à vent »), l'avalanche de plaque dure concerne le plus souvent de la neige ayant subi un fort frittage, lui conférant une forte cohésion.



Caractéristiques : cassure en plaque, existence d'une couche fragile, extension limitée de la cassure, dépôt riche en boules/blocs de neige

Avalanche dite de *printemps* ou de *fonte*

Associée à la neige humide, ce type d'avalanche se rencontre surtout au printemps ou pendant des périodes de redoux durant l'hiver. L'apparition d'eau liquide permet la lubrification des cristaux de neige, conférant à la neige un caractère visqueux.



Caractéristiques : cassure ponctuelle ou en plaque, vitesse lente de propagation de la rupture

Le point de vue de l'ingénieur

Deux cas limites d'écoulement :

- avalanche en aérosol : nuage turbulent de particules de neige dans l'air.
 - vitesse importante : 50–100 m/s,
 - hauteur d'écoulement : 20–100 m,
 - masse volumique moyenne : $\rho \sim 20 \text{ kg/m}^3$, mais forte stratification dans le sens de la hauteur
 - influence partielle de la topographie,
 - rôle important de l'entraînement d'air et l'incorporation de neige.
- avalanche coulante : écoulement dense de neige coulant le long du sol
 - vitesse faible à moyenne : 10–25, parfois jusqu'à 50 m/s,
 - hauteur d'écoulement : 1–2 m, mais dépôt parfois très épais (10–20 m)
 - masse volumique moyenne : $\rho \sim 300 - 500 \text{ kg/m}^3$,
 - rôle essentiel de la topographie.

Avalanche en aérosol



Vallée de la Sionne (VS)

Courtoisie du SLF (Davos)

Avalanche en aérosol



Schattenbach, Walenstadt (Saint-Gall) 7
février 2003

Rôle essentiel de l'entraînement (dilution) et de la reprise de neige au sol : sans reprise, le nuage se dilue et malgré l'apparence, l'avalanche est peu dangereuse.

Le potentiel de dommages balaye un large spectre : du nuage de poussières peu violent (effet similaire à un coup de vent) à l'avalanche dévastatrice.

Généralement, la neige mobilisée est de la neige récente et froide, mais exceptionnellement des avalanches de neige humide donnent naissance à des aérosols.

Avalanche en aérosol

La forme de l'écoulement (aspect du nuage) dépend fortement de l'incorporation de neige.



Raffort, Méribel-les-Allues (Savoie) 21 janvier 1981

Avalanche en aérosol

Le dépôt varie selon la stratification (en densité) du nuage : si le nuage comporte une partie dense ou s'effondre en partie, il existe un dépôt dense. Dans le cas contraire, le dépôt est diffus et disparaît rapidement après quelques jours ou en cas de chutes de neige.



Avalanches du Roux d'Abriès (19 janvier 2004) et de Crévoux (18 janvier 2004) dans les Hautes-Alpes

Avalanche coulante



Courtoisie ANENA (Grenoble), Cemagref, M6, and PGHM-73.

Avalanche des Lanches à Peisey-Nancroix (face nord de Bellecôté), 25 février 1995.

Avalanche coulante

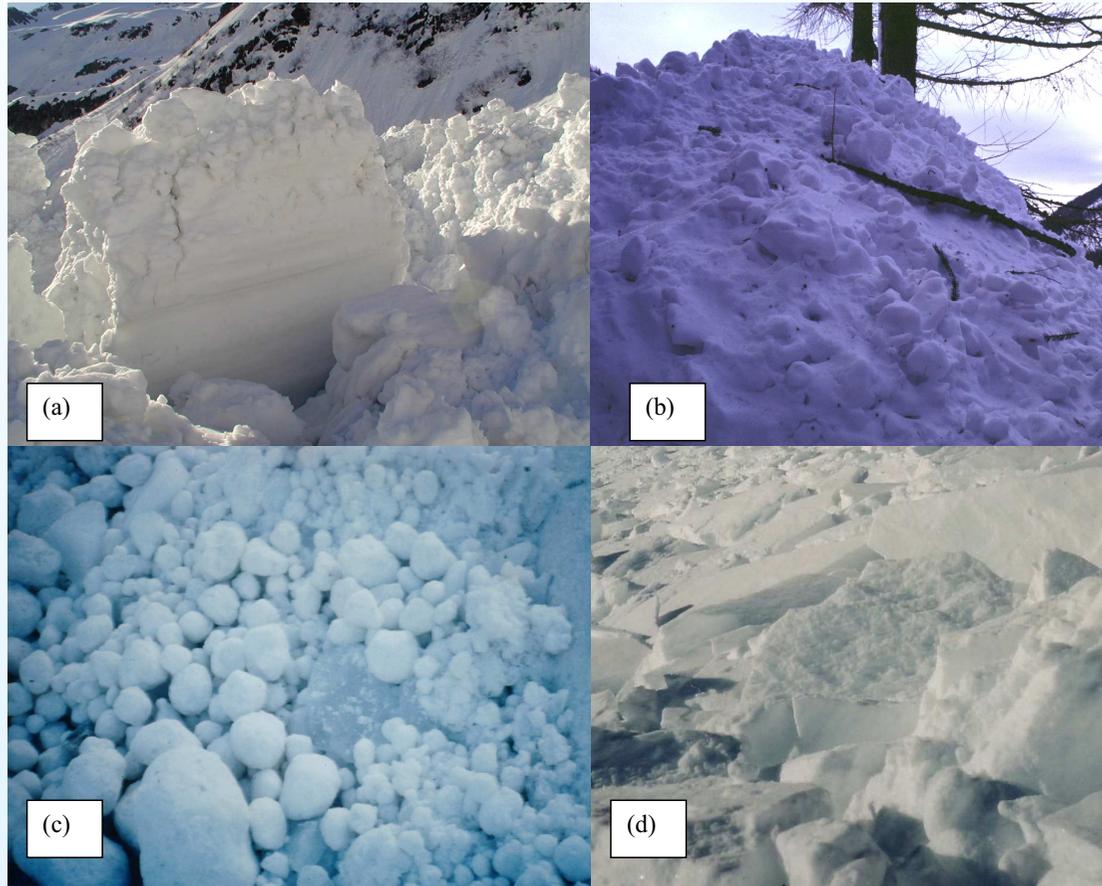
Des formes d'écoulement variées : granulaire, poudreuse, plastique, etc.



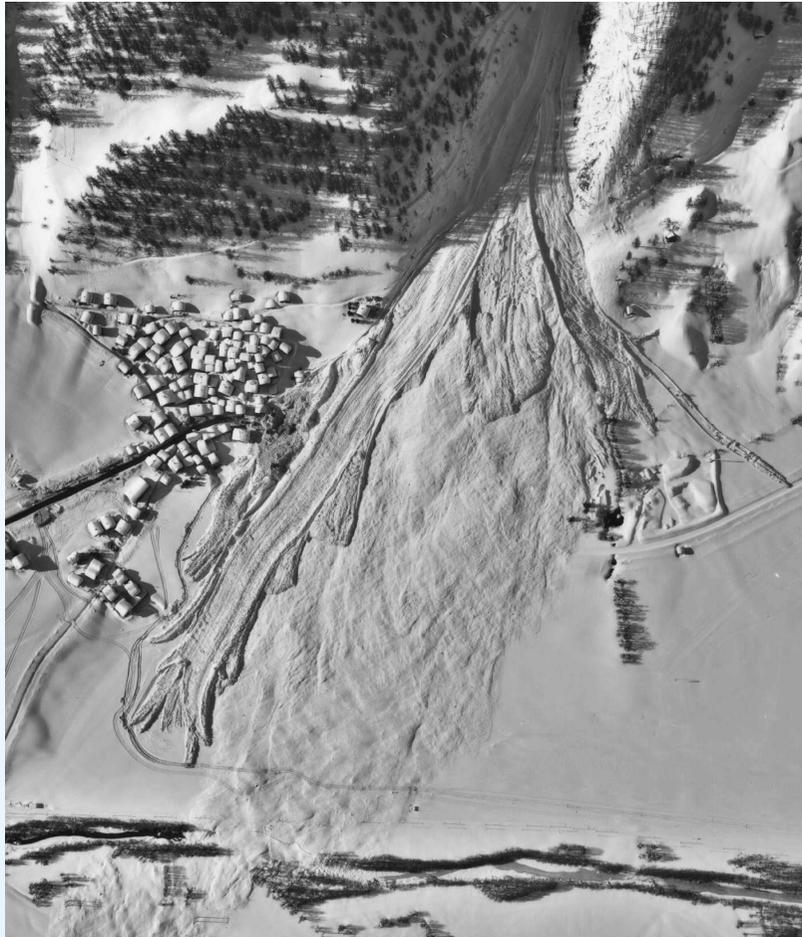
Site expérimental du Lautaret (Hautes-Alpes) : avalanche mobilisant de la neige humide (à gauche) ou sèche (à droite)

Avalanche coulante

Des types variables de neige mobilisée.



Avalanche coulante



Des trajectoires/étalements très différentes selon les caractéristiques

Courtoisie Office fédéral de la topographie. Gschinen (VS) 23 février 1999.

Avalanche coulante

Des dépôts épais : des dépôts pouvant dépasser 10 m d'épaisseur



Tunnel du Lötschberg (côté Goppenstein, VS) et du Gothard (côté Göschenen, UR) en février 1999.

Avalanche coulante

Des dépôts étalés



Avalanches dans Belledonne (Isère, février 1999) et à la Foux-d'Allos (Alpes-de-Haute-Provence, mars 2001).

Avalanche coulante

Dépôt en masse ou bien en langue : le problème de l'étalement toujours mal compris



Avalanches vers l'Eimendras (Chartreuse, janvier 1981) et à Peisey-Nancroix (Savoie, février 1995).

Avalanche coulante

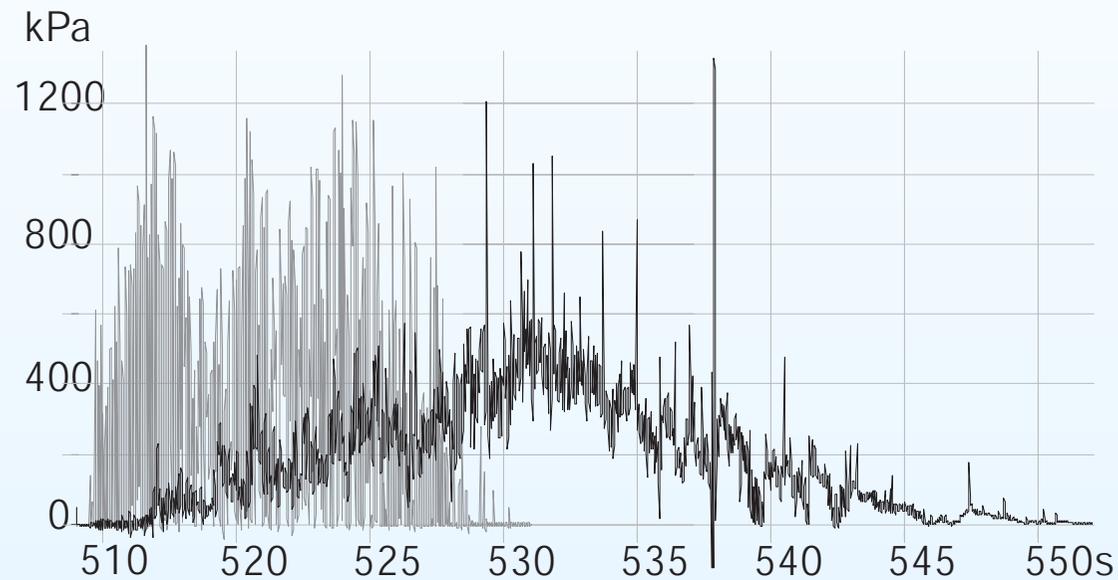
Érosion et dépôt (bilan de masse) : un facteur important, mais mal apprécié



Avalanches vers la Cabane de Chanrion (VS, mai 1992) et à Tour-en-Savoie (Savoie, mars 1999).

Effet d'une avalanche

Deux problèmes : pression moyenne d'impact et spectre de pression



Avalanche de la Vallée de la Sionne (février 1999). Données SLF.

Effet d'une avalanche en aérosol

Effet d'un aérosol puissant



Avalanche de Tacconnaz (Haute-Savoie, 11 février 1999) et à Arinsal (Andorre, 8 février 1996).

Effet d'une avalanche en aérosol

Effet d'un aérosol « léger »



Avalanche de Clavans (Isère, 20 janvier 1981) et à Loèche-les-Bains (VS, 25 février 1999).

Effet d'une avalanche coulante



Courtoisie Cemagref, avalanche 7 mars 2006, col du Lautaret (Hautes-Alpes)

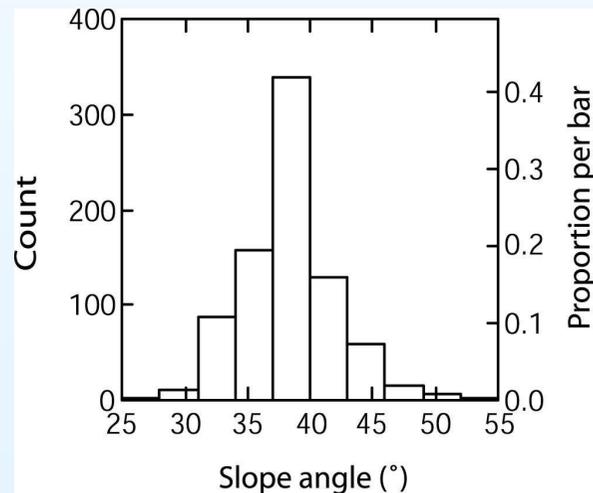
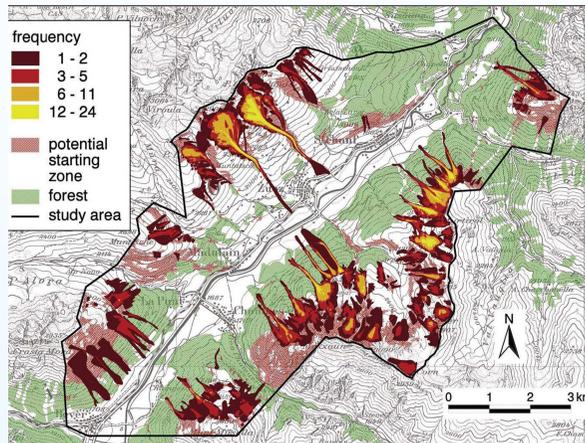
Effet d'une avalanche coulante



Avalanches à Peisey-Nancroix (Savoie, 25 février 1995) et à Airolo (TI, 11 février 1951)

Formation d'une avalanche

Des facteurs topographiques favorables



Courtoisie Jürg Schweizer (SLF).

Facteurs géographiques favorables :

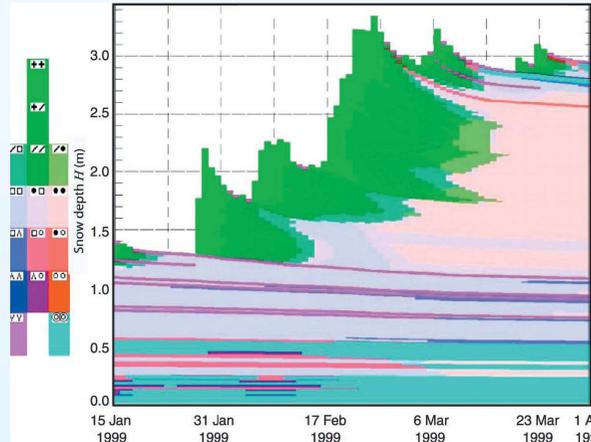
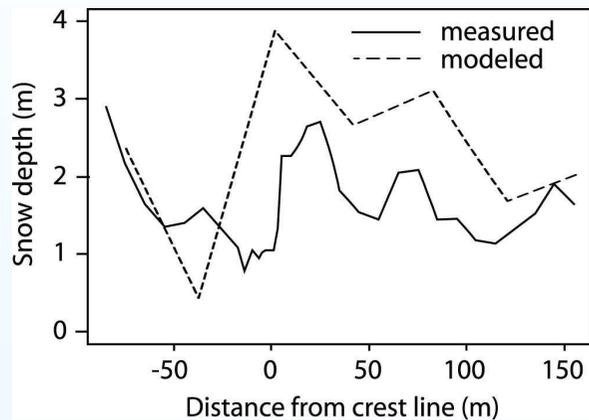
- pente
- altitude
- orientation
- structuration du site : zone d'accumulation, d'écoulement



Avalanche de Galtür (Tyrol, 23 février 1999).

Formation d'une avalanche

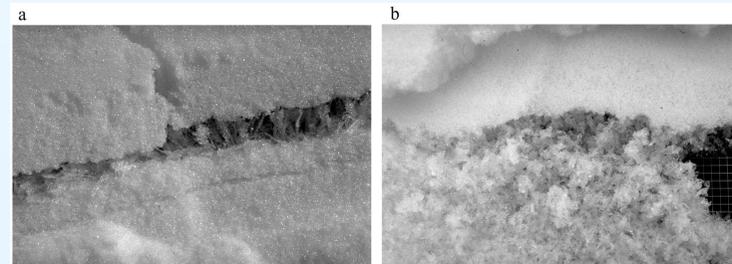
Des facteurs météorologiques favorables



Courtoisie Jürg Schweizer (SLF).

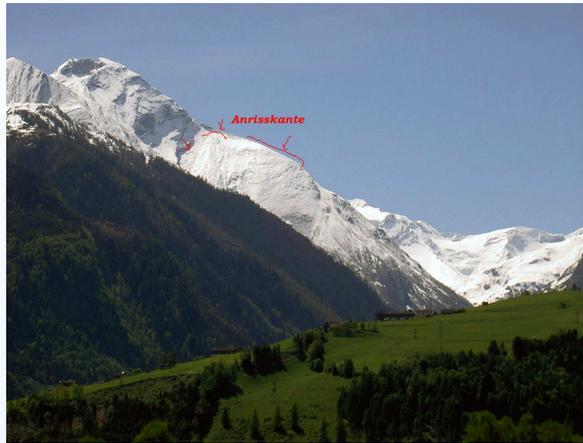
Facteurs nivo-météorologiques favorables :

- quantité de neige récente ;
- hétérogénéités du manteau neigeux : couche fragile, épaisseur inégale ;
- redoux (baisse de la résistance au cisaillement) ;
- cohésion critique.



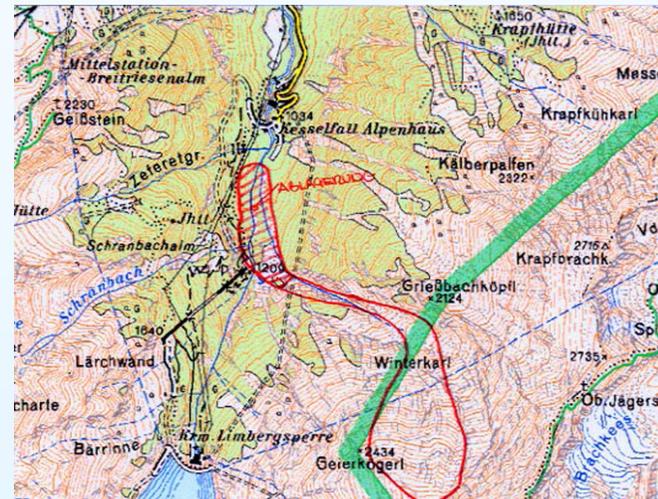
Formation d'une avalanche

Les avalanches aiment les exceptions



Courtoisie Barbara Turnbull (SLF).

Avalanche de Kaprun (Tyrol, 23 mai 2004) : aérosol de neige humide



Avalanches du XIX^e siècle en Suisse

<i>Année</i>	<i>Canton</i>	<i>Descriptif</i>
1807	Grisons	Des avalanches tuent 8 personnes à Unterschächen et une autre à Saint-Antoine.
1808	Berne	Une bonne partie du village d'Obermad (Gadmen) est détruit (23 morts) ; on dénombre 4 morts à Nesselal et 9 à Schärmatte.
1808	Grisons	Le bourg de Selva est en grande partie détruit (26 morts, 11 bâtiments détruits).
1817	Berne	Au moins 15 personnes sont tuées par une avalanche.
1827	Valais	Des avalanches tuent 51 personnes et causent de nombreux dégâts.
1844	Uri	Des avalanches tuent 5 personnes.
1849	Valais	La mort de 19 personnes et de nombreux dégâts sont causés par une avalanche.
1851	Tessin	23 personnes sont tuées.
1853	Tessin	29 personnes sont tuées.
1888	Tessin, Valais	Une grosse crue avalancheuse (49 morts).

Avalanches du XX^e siècle en Suisse

<i>Année</i>	<i>Canton</i>	<i>Descriptif</i>
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 causant la mort de 20 personnes (125 en Autriche dans le Vorarlberg).
1968	Grisons	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 al- pin Suisse	En tout 12 personnes perdent la vie. 414 ha de forêt et 424 bâtiments sont détruits.
1999	Valais	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): 17 personnes sont tuées, dont 12 morts à Évólène. L'ensemble des dommages au bâti et au patrimoine dépasse les 440 Mio.

Lutte contre les avalanches

Sommes remboursées par les assurances cantonales suisses pour la décennie 1993–2002 en millions de francs.

<i>Nature</i>	<i>Montant total (Mio F.)</i>	<i>Part relative (%)</i>
tempête	588	41,5
grêle	362	25,6
inondation	373	26,4
avalanche	65	4,6
chute de pierre	28	2,0

Source : *Vereinigung der kantonalen Feuerversicherungen* (www.vkf.ch)

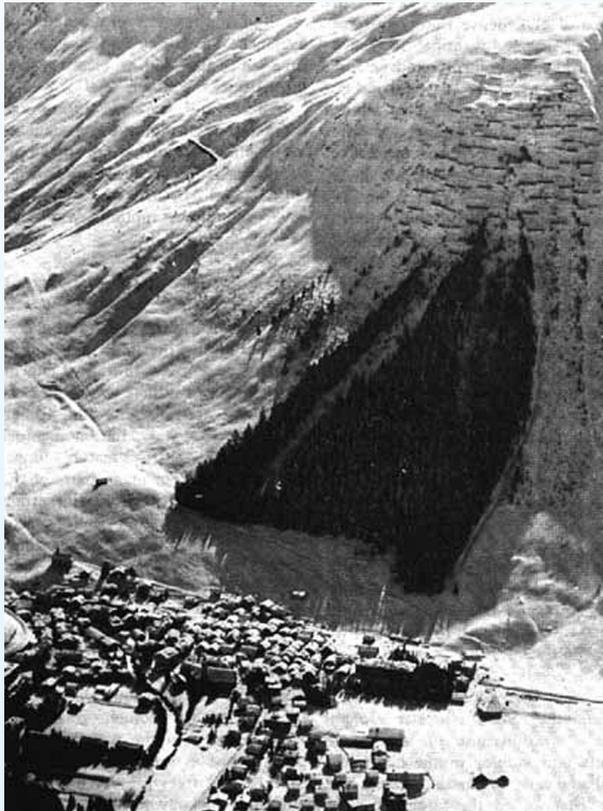
Lutte contre les avalanches : une longue histoire

- 1795 : description d'une avalanche par le naturaliste genevois de Saussure (Uri) ;
- 1874 : création d'un service fédéral des forêts ;
- 1878–1809 : recensement par le Dr Johann Coaz de l'activité avalancheuse dans les Grisons ;
- 1881 : « die Lauenen » par J. Coaz, premier ouvrage scientifique sur les avalanches ;
- 1936 : création du Schnee- ou Lawinenforschung à Davos sous l'impulsion de Robert Haefeli ;
- 1951 : électrochoc d'Airolo. Début du zonage et des premiers modèles de calcul (Voellmy) ;
- 1960–1967 : élaboration des techniques de zonage (bleu/blanc/rouge) ;
- 1970–1980 : début des premiers modèles numériques.

Techniques de lutte

Défense : durée d'action de la protection → permanente/temporaire

Défense : lieu d'action de la protection → active (zone de départ)/passive (zone d'écoulement/d'arrêt)



forêt d'Andermatt (UR) église de Vallorcine (Haute-Savoie)

Défense active

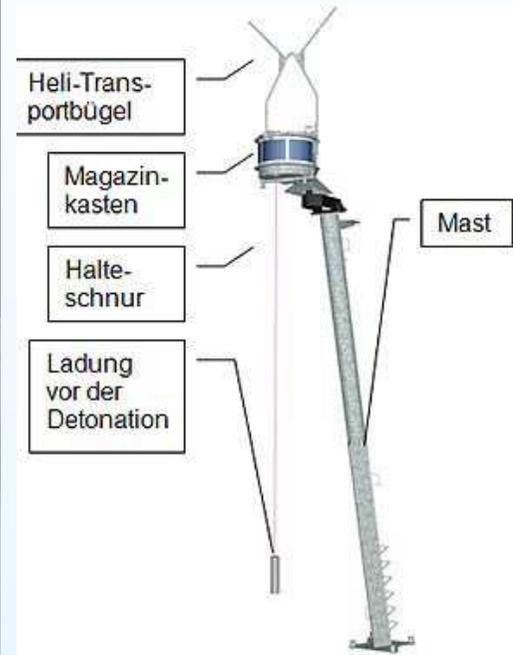
Filets et râteliers



Claies, Schweifinen, Zermatt (VS, février 1999) La Tournelle, Verbier (VS, février 2006)

Défense active

Déclenchement préventif : explosif, Gazex, catex, Sprengmast



Le quotidien des domaines skiabiles...

Défense passive

Défense passive (génie civil)



Digue paravalanche de Disentis (GR), galerie du Lautaret (Hautes-Alpes)

Défense passive

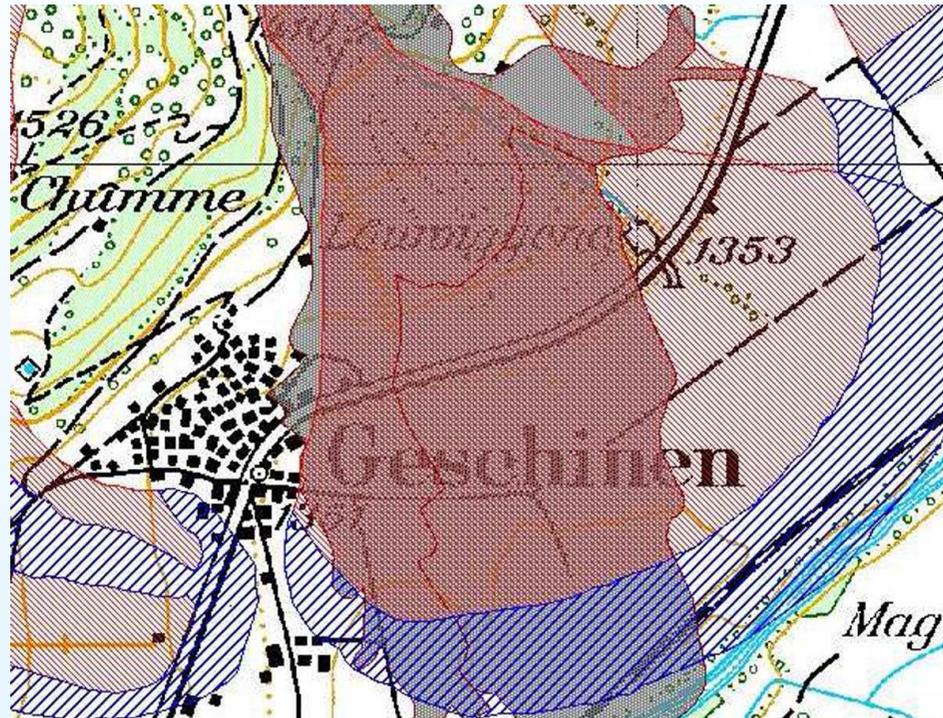
Paravalanche de Taconnaz : apprentis-sorciers ?



Dispositif construit en 1992 (coût : 10 Mio). Fortement endommagé entre février 1999, puis avril 2006.

Défense passive : zonage et aménagement

Cadastre des avalanches, zonage des dangers



Plan de zonage réglementaire de Geschinen (VS).

Bilan d'un siècle de protections

- Un bilan jugé positif : les protections ont permis de contenir la plupart des avalanches extrêmes en 1999.
- Un glissement des pratiques de défense : défense active → passive (digue, auto-protection).
- La limite de certains systèmes de défense : peut-on prévoir tous les scénarios catastrophiques ? Faisabilité technique ? Intérêt économique ?

Défaillance de systèmes de protection

Faible retour d'expérience, limites des stratégies de protection, erreurs de conception...



Avalanche de Belle-Plagne (Savoie, 22 décembre 1991) et avalanche de Taconnaz (Haute-Savoie, 11 février 1999).

Problème dans la conception

Des problèmes de structure



Avalanche de Tacconnaz (Haute-Savoie, 11 février 1999 et 5 avril 2006).

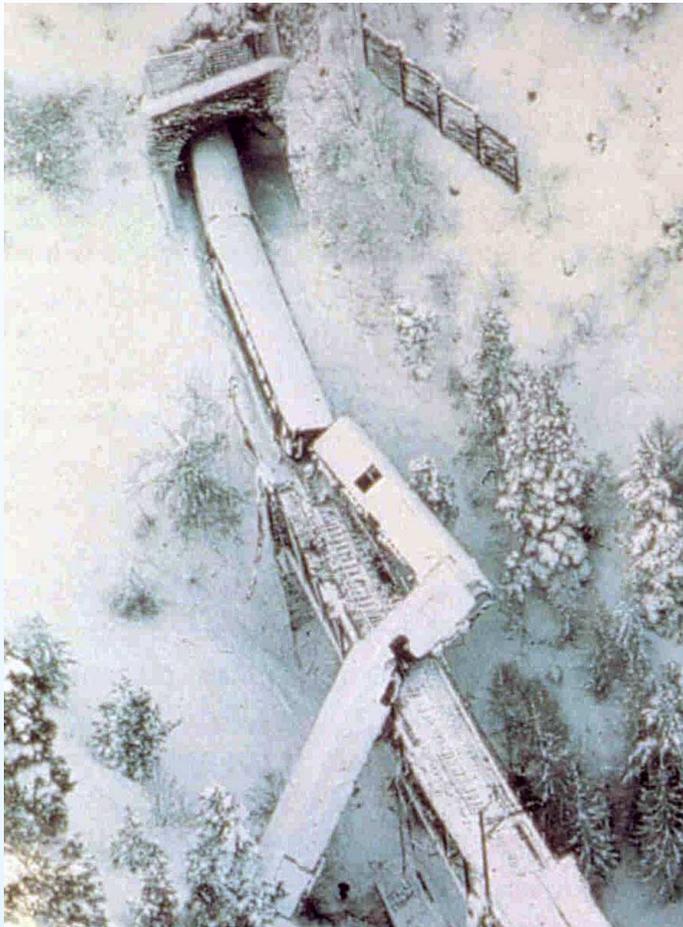
Mur : hauteur 7 m, épaisseur 1,5 m. Résistance : 250 kPa... en équivalent statique !

Problème dans la conception



Combe de l'Aiguille en mai 1977 (Allos), Bellecôte en février 1990 (la Plagne),
Saint-Hilaire-du-Touvet (février 1999), Montroc (février 1999).

Protection des voies de communication



Avalanche de Rorbach (UR) sur la ligne du Saint-Gothard (janvier 1981). Route de Bonneval-sur-Arc (Savoie) en février 1970.

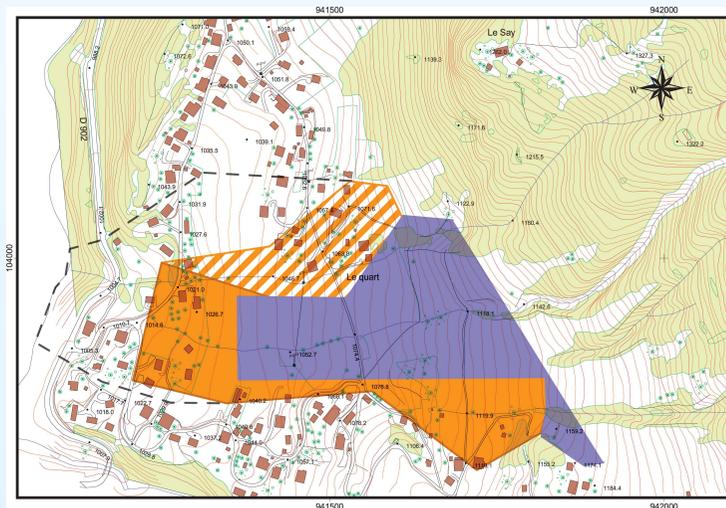
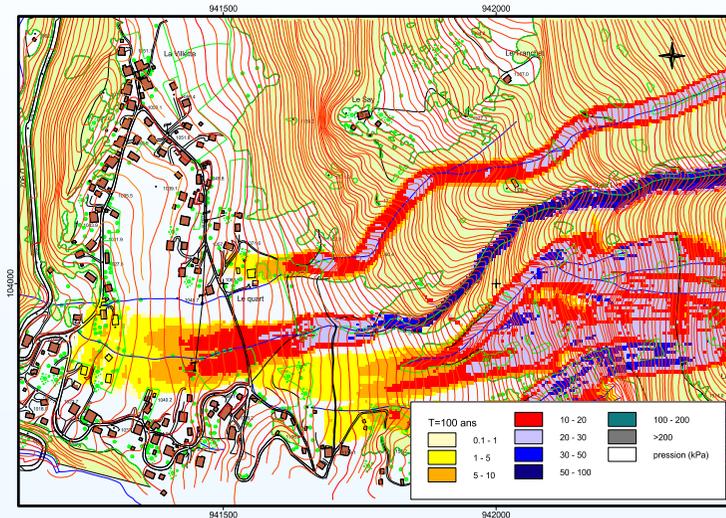
Enjeux de la protection

- Une demande croissante d'ouverture des routes durant la saison hivernale.
- Sécurisation des transports (énergie, personnes, marchandises).
- Extension des zones urbanisées : les zones sans risques sont déjà aménagées.
- Équipements sensibles placés dans les zones d'altitudes : remontées mécaniques, lacs de retenue, etc.
- Effets du réchauffement climatique : beaucoup d'incertitudes sur l'enneigement, mais sans doute peu d'effets sur les avalanches extrêmes.

⇒ De nouveaux besoins :

- Adapter les techniques de protection et les méthodes de dimensionnement.
- Modèles numériques pour calculer les avalanches.
- Solutions de protection plus économiques et écologiques.

Modèles numériques



Simulation numérique d'avalanche et zonage

Équations de Saint-Venant

↪ Conservation de la masse

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} = 0,$$

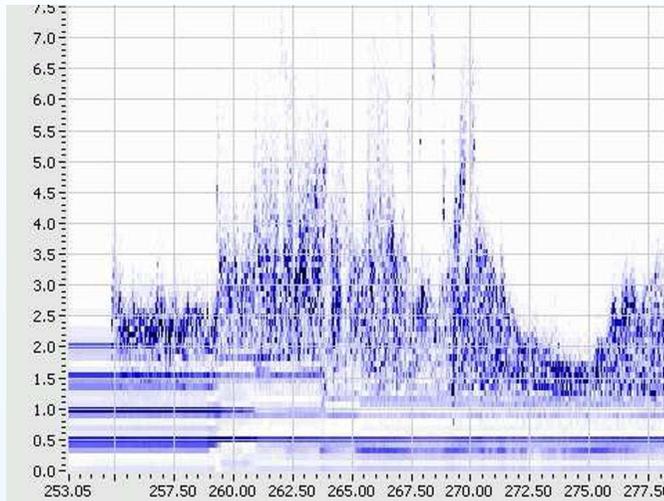
↪ Conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = g \sin \theta - g \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_p}{\rho h}.$$

h : hauteur de neige, \bar{u} : vitesse de l'avalanche, τ_p frottement, ρ : masse volumique.

Problème : que vaut τ_p ?

Mesures *in situ* : la Sionne (VS)



Doppler radar

Un site instrumenté unique au monde, mais

- Dépendance vis-à-vis de la météorologie.
- Coût du suivi.
- Expériences non reproductibles.
- Difficultés d'interprétation des résultats et survie des capteurs.

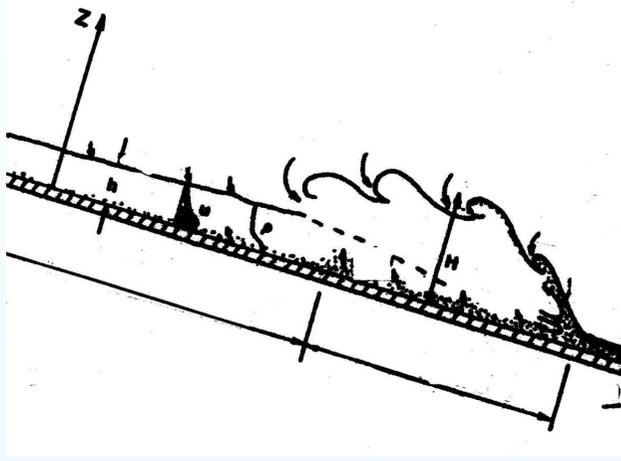


Avalanches en laboratoire

- Expériences reproductibles.
- Conditions initiales et aux limites maîtrisées.
- Propriétés mécaniques connues et pouvant être changées.
- Topographie connue.

Quelques problèmes : rapport aux écoulements naturels (similitude), effets perturbateurs, etc.

Avalanches de laboratoire : aérosols



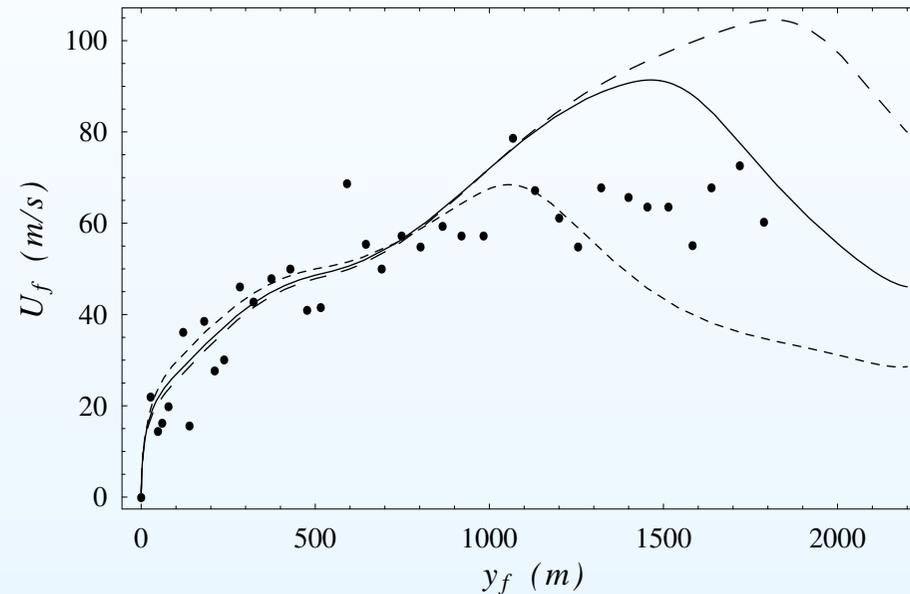
Expériences : sciure de bois (colorée)
dans l'eau

Essais à échelle réduite : équilibre entre entraînement de fluide ambiant (dilution) et incorporation de matériaux du sol.

- Problème de la similitude : nombre de Richardson
 $Ri = g' H \cos \theta / U^2$
($g' = g \Delta \rho / \rho_a$ gravité réduite).
- Problèmes non résolus : entraînement de matériaux, inertie des particules, etc.

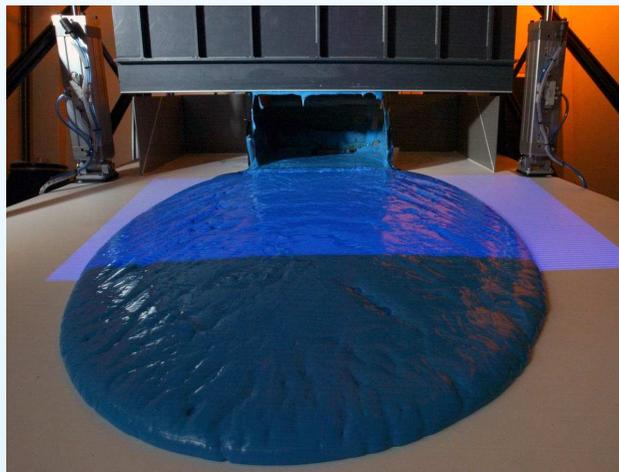
Des résultats encourageants

Vitesse du front en fonction de la distance



Variation de la vitesse du front de l'avalanche en fonction de sa position et en fonction de la quantité de neige érodée (courbes). Points : données obtenues par le SLF à la Sionne (février 1999).

Avalanches de laboratoire : avalanche coulante

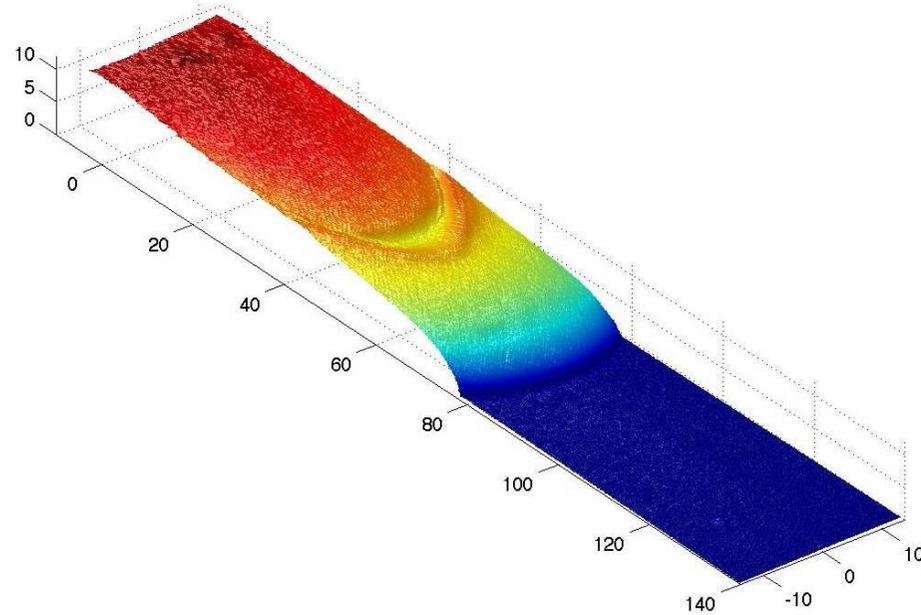


Expériences: Carbopol (gel polymérique) teinté en bleu.

Essais à échelle réduite : équilibre entre gradient de pression, frottement visqueux, et inertie

- Comportement mécanique : connu à l'avance (rhéomètre).
- Conditions initiales et aux limites : maîtrisées.

Reconstruction de la surface libre de l'écoulement



Thèses Steve Cochard, Sébastien Wiederseiner, Martin Rentschler, & Nicolas Andreini (EPFL/ENAC/LHE).

Équations du mouvement

La plupart des modèles développés à ce jour sont fondés sur l'approximation d'écoulement peu épais : $\epsilon = H/L \ll 1$.



Il y a deux approches distinctes :

- équations moyennées selon la hauteur : c'est l'approche historique lancée par Saint-Venant (crues), puis Savage & Hutter (granular flows), Iverson & Denlinger, Mangeney & Bouchut, et largement utilisée de nos jours
- développement asymptotique des équations locales : travail conduit par Reynolds (théorie de la lubrification), puis d'autres auteurs (théorie de la couche limite), intérêt croissant avec les travaux de Huppert, Mei, Balmforth, etc..

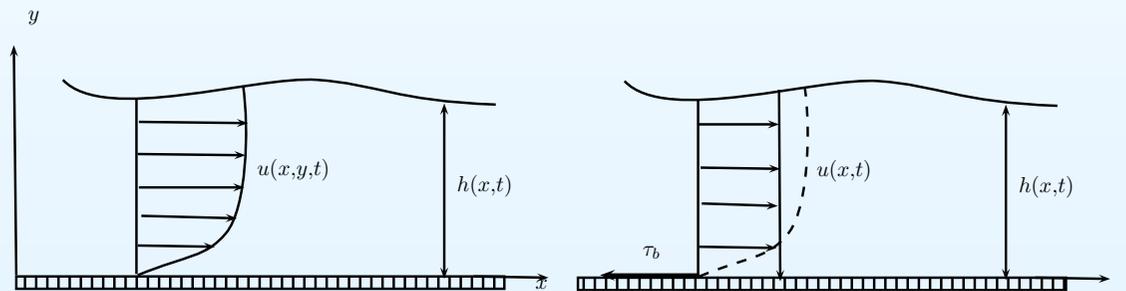
Équations moyennées selon la hauteur

Équations de Saint-Venant: un jeu d'équations à tout faire?

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} = E - D,$$

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \beta \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} = \rho gh - kgh \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_b}{\rho},$$

avec β le coefficient de Boussinesq (généralement égal à 1), k un coefficient de pression, τ_b la contrainte de cisaillement, E et D les taux d'entraînement et de déposition.



L'information est moyennée quand on dérive les équations du mouvement, ce qui rend parfois difficile de déterminer correctement les coefficients qui apparaissent dans ces équations.

Développement asymptotique des équations locales

En partant des équations de Cauchy (équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement), on introduit des variables sans dimension

$$\tilde{u} = u/U_*, \tilde{x} = x/L_*, \tilde{y} = y/(\epsilon L_*), \tilde{p} = p/P_*, \tilde{p} = p/P_*, \dots$$

avec $\epsilon = H_*/L_*$ supposé petit. Ensuite, on réalise un ϵ -développement des variables : $\tilde{u} = \tilde{u}_0 + \epsilon \tilde{u}_1 + \dots$. Réunissant les termes de même ordre en ϵ , on aboutit à une suite hiérarchique d'équations :

$$\epsilon \text{Re} \frac{du}{dt} = 1 - \epsilon \cot \theta \frac{\partial p}{\partial x} + \epsilon^2 \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y}, \quad (1)$$

$$\epsilon^2 \text{Re} \frac{dv}{dt} = -\cot \theta \left(1 + \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \epsilon \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \epsilon \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y}, \quad (2)$$

Développement asymptotique des équations locales

À l'ordre ϵ^0 , on doit résoudre

$$0 = 1 + \frac{\partial \sigma_{0,xy}}{\partial y}, \quad (3)$$

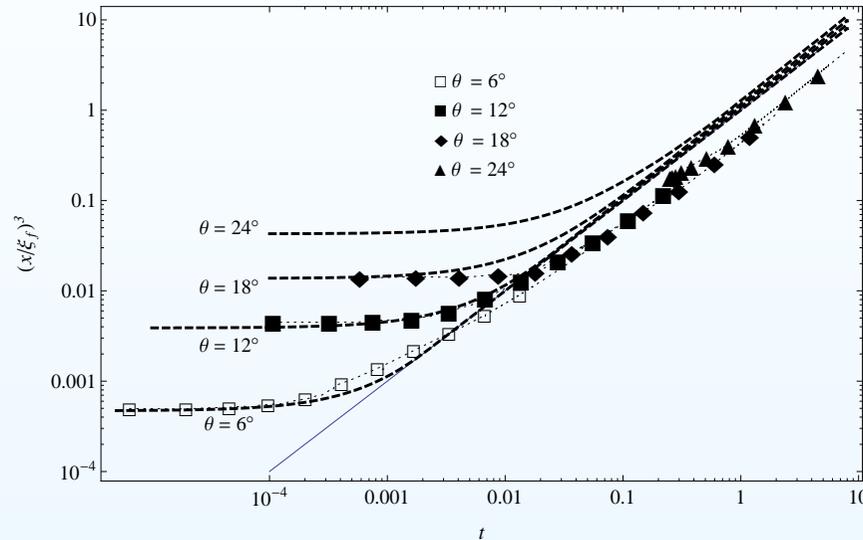
$$0 = -1 - \frac{\partial p_0}{\partial y}, \quad (4)$$

un jeu d'équations bien plus simples que les équations originales ! L'intégration de l'équation de conservation de la masse fournit

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial h^3}{\partial x}}_{convection} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial h}{\partial x} \right)}_{diffusion}. \quad (5)$$

Des solutions analytiques peuvent être déterminées en recherchant des solutions auto-similaires : $h(x,t) = t^{-n} H(\xi,t)$ $\xi = x/t^n$, $n = 1/3$ (solution aux petits temps) ou $n = 1/5$ (solution aux temps grands).

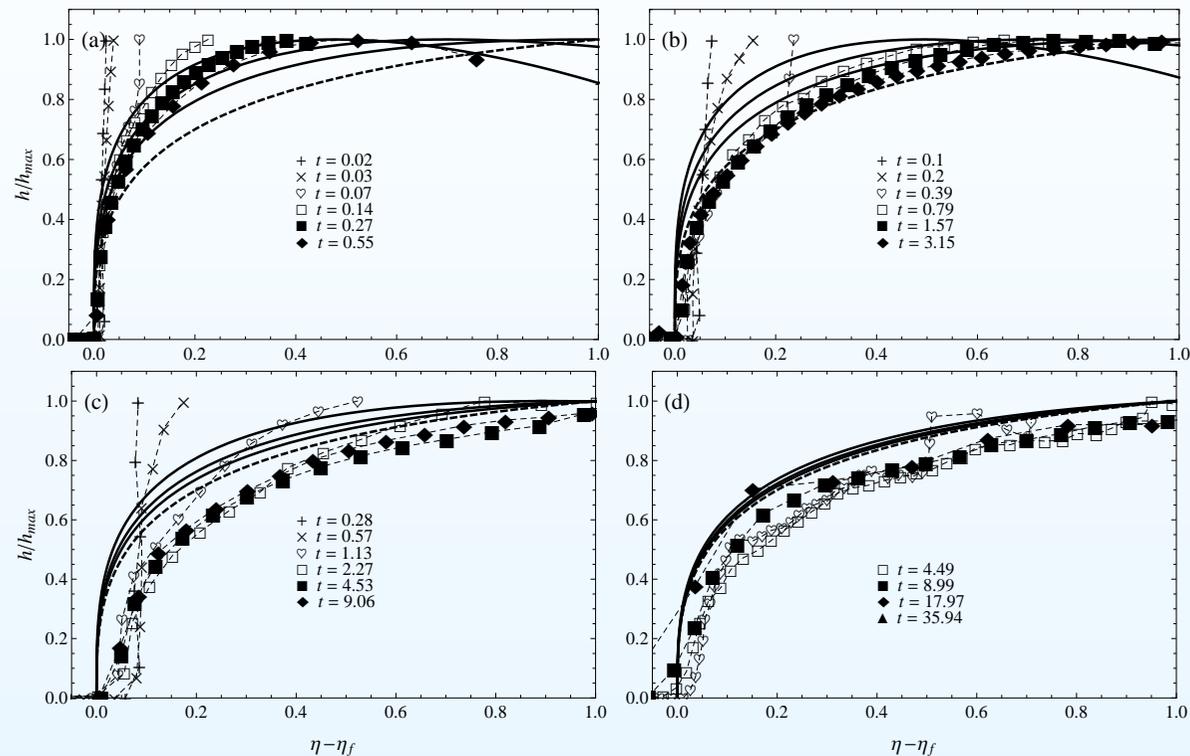
Application aux avalanches de fluide newtonien



Evolution de la position du front (normalisée) $(x_f/\xi_f)^3$ dans un diagramme log-log : les données expérimentales correspondant aux pentes $\theta = 6^\circ$, 12° , 18° , et 24° sont reportées. La ligne continue $(x_f/\xi_f)^3 = t$ correspond à la solution auto-similaire.

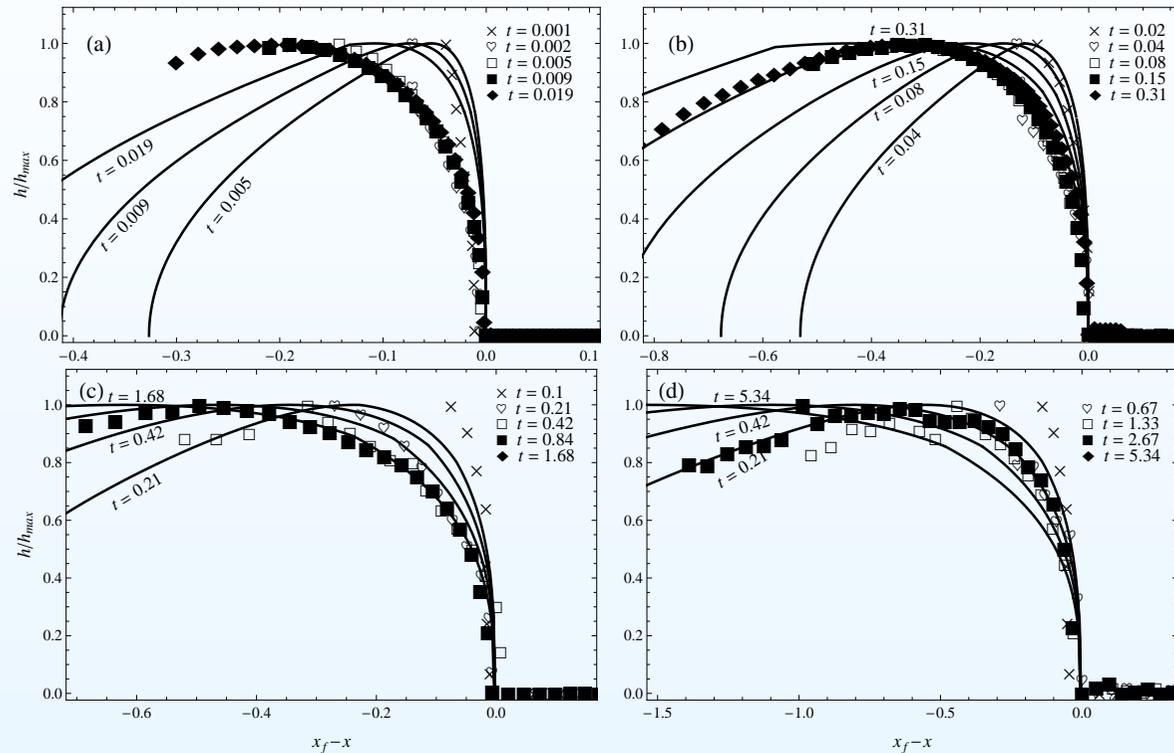
Fluide : glycérol $\mu \sim 345$ Pa.s (caramel!)

Application aux avalanches de fluide newtonien (1)



Profils de hauteur $h(\eta, t)$ normalisée par la hauteur maximale h_{max} pour $\theta = 6^\circ$ (a), $\theta = 12^\circ$ (b), $\theta = 18^\circ$ (c), et $\theta = 24^\circ$ (d) à différents temps (adimensionnels). La courbe continue représente la théorie asymptotique pour les **faibles pentes** ($\epsilon = \tan \theta$).

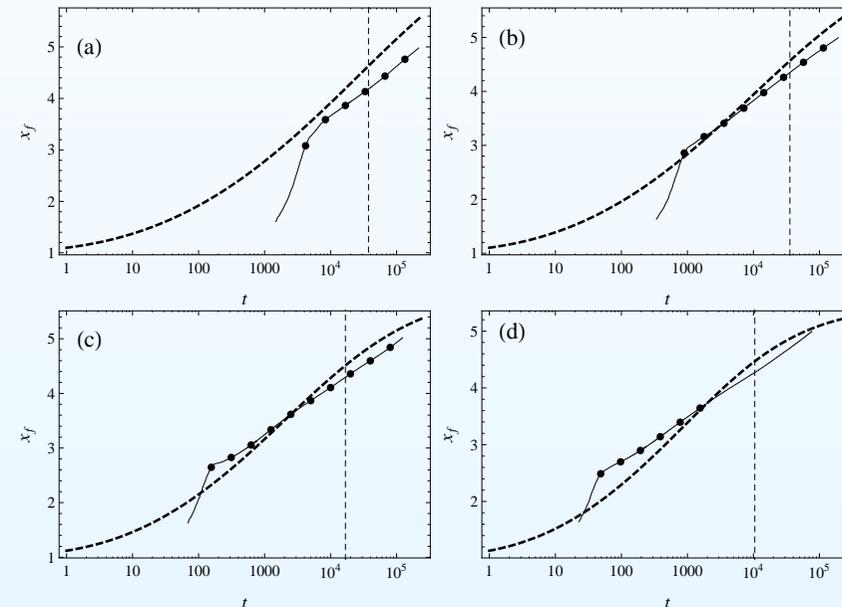
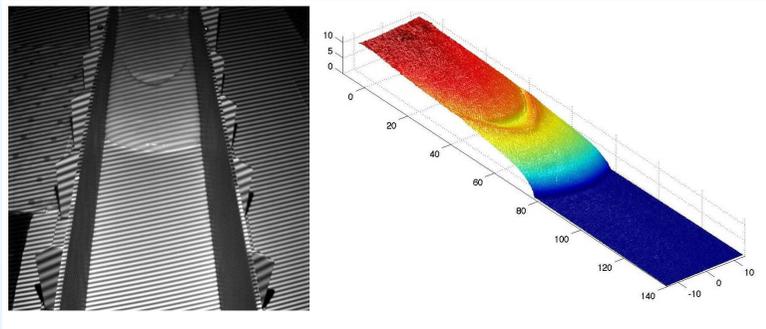
Application aux avalanches de fluide newtonien (2)



Profils de hauteur $h(\eta, t)$ normalisée par la hauteur maximale h_{max} pour $\theta = 6^\circ$ (a), $\theta = 12^\circ$ (b), $\theta = 18^\circ$ (c), et $\theta = 24^\circ$ (d) à différents temps (adimensionnels). La courbe continue représente la théorie asymptotique pour les **fortes pentes** ($\epsilon = \tan^2 \theta$).

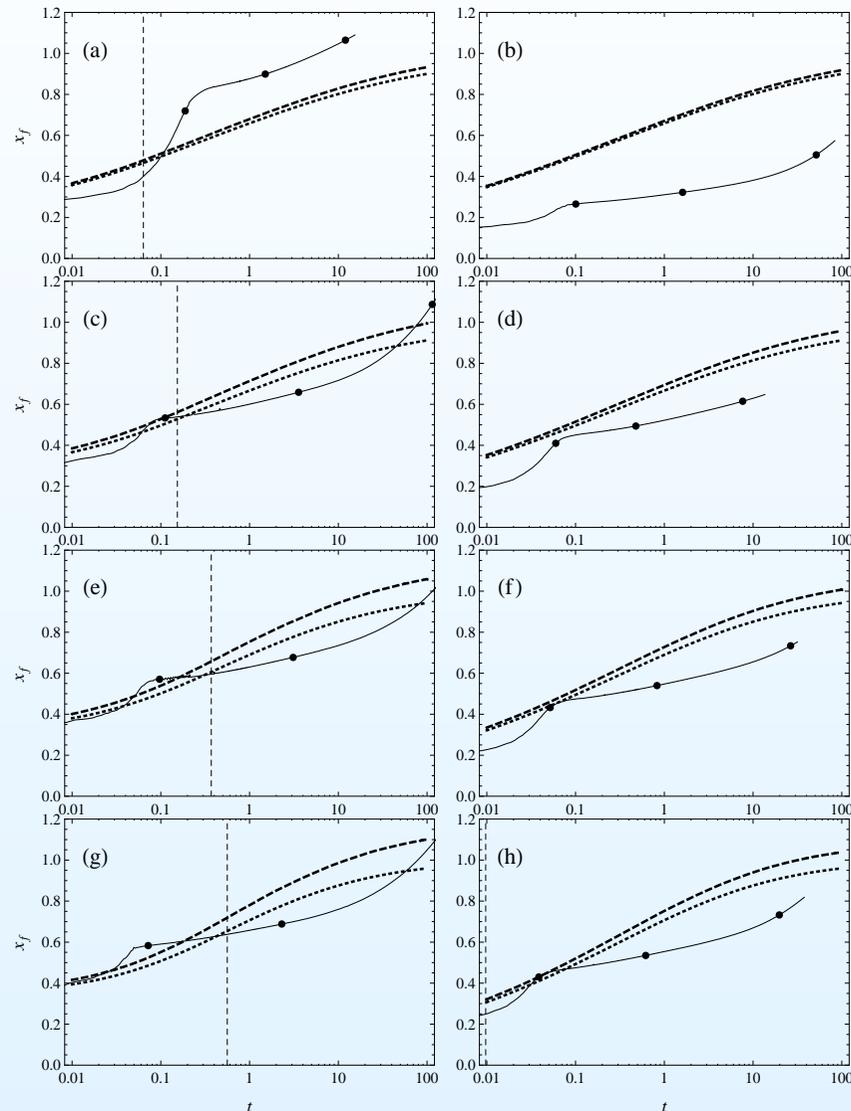
Application aux avalanches viscoplastiques (1)

Les mêmes techniques peuvent être employées pour les matériaux viscoplastiques.



Évolution de la position du front pour $\theta = 24^\circ$. Expériences avec du Carbopol à des concentrations différentes. Courbes tiretées : prédiction d'un modèle théorique à l'ordre 0 (équation de convection-diffusion non linéaire).

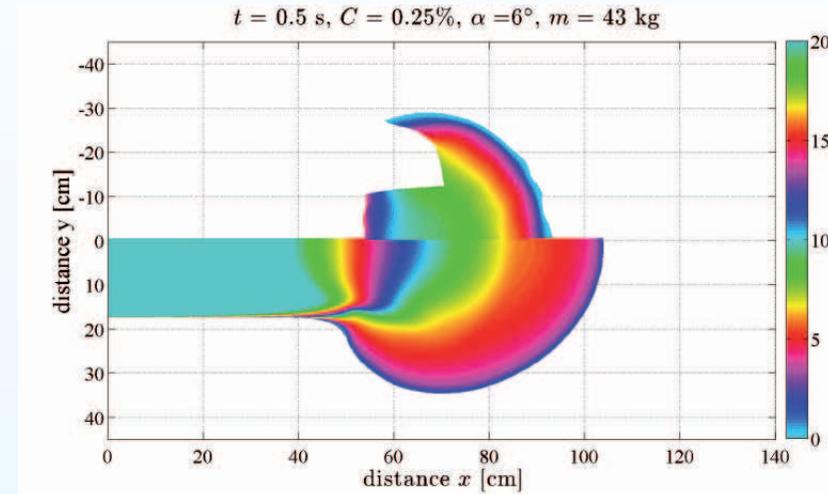
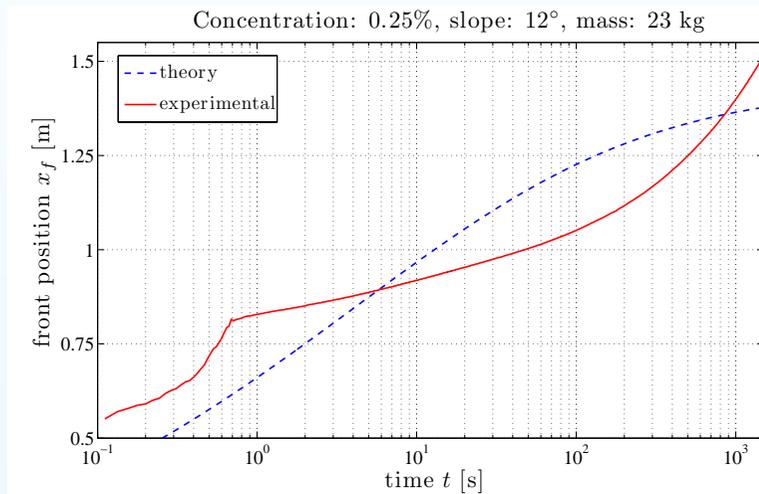
Application aux avalanches viscoplastiques (2)



Évolution de la position du front pour $\theta = 12^\circ$. Expériences avec du Carbo-pol à des concentrations différentes. Courbes tiretées : prédiction d'un modèle théorique à l'ordre 0

Simulation numérique des écarts parfois substantiels

Fluide : Carbopol



À droite, comparaison entre modèle théorique (Saint-Venant) et données expérimentales ; à gauche : comparaison entre données et simulations obtenues avec un solveur 3D de Navier-Stokes généralisé (NaSt3D, Université de Bonn, extension par Martin Rentschler).

Conclusions

- Plus d'un siècle de recherches... Un accroissement constant des connaissances. La Suisse a eu un rôle de pionnier qui a influencé la gestion des risques à l'échelle de la planète.
- 1,5 milliards de francs investis en protection depuis 1951 par la Confédération et les cantons. Un budget fédéral d'entretien (forêt, claies, etc.) conséquent : 16 Mio/an.
- Hiver 1999 : malgré l'état d'urgence et des avalanches extrêmes causant 17 victimes (plus de 70 à l'échelle des Alpes), février 1999 a montré l'efficacité de la stratégie de protection : zonage, forêt, et ouvrages de génie civil. 300 Mio de dommages, sans doute le double en pertes économiques.
- Localement des problèmes sérieux : paravalanche mal conçu ou bien phénomènes extrêmes ?

Conclusions

- Des outils toujours plus perfectionnés : modèle numérique, carte numérique (SIG).
- Catalogue de techniques de protection plus vaste. Mais des coûts de protection toujours plus élevés. 1 kg d'explosif : quelques francs. 1 Sprengmast (Wyssen) : 130 kFS...
- Un changement progressif des mentalités et de la réglementation : avalanche comme fatalité ? Responsabilité ? Risque accepté (sur-avalanches, avalanche centennale) ? Risque résiduel ?
- De façon générale, protection et pérennisation du patrimoine construit : importance de la formation/sensibilisation des architectes et des ingénieurs. Un modèle suisse ?

Perspectives

- Une demande croissante : augmentation du trafic et volonté d'ouverture des routes.
- Urbanisation dans des secteurs exposés : peut « habiter la menace » (Inès Lamunière)? Concevoir des structures habitables. « Un terrain exposé n'est pas un terrain à bâtir » dit pourtant la Confédération.
- Formation des professionnels : généraliste ou spécialiste?
- Savoir-faire dans la gestion des crises. Information et responsabilité des décideurs : cas d'Évolène (André George) et Chamonix (Michel Charlet).
- Poids des modèles numériques et rôle de l'expert.
- Suivi en temps réel : *Swiss Experiment* et *Sensorscope* (<http://sensorscope.epfl.ch>).

Quelques ouvrages

- « Guide Neige et Avalanches » C. Ancey (coord.), Édisud, Aix-en-Provence, 1996 (en ligne sur www.toraval.fr).
- « Dynamique des avalanches » C. Ancey, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 2006.
- « Habiter la Menace » Inès Lamunière, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 2006.
- « Les neiges labiles » Raphaël Rabusseau (et Pascal Delvaux), Presses d'Histoire Suisse, Genève, 2007.
- « der Lawinenwinter 1999 » (collectif) Schnee- und Lawinenforschung, Davos, 2000.

En savoir plus : <http://lhc.epfl.ch>