

Avalanches : phénomènes et enjeux

Christophe Ancey

27 octobre 2009

● **Plan de la conférence**

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

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

- Plan de la conférence

Classification des avalanches

- **Classification des avalanches**

- Le point de vue du skieur
- Avalanche dite de *plaque*
- Avalanche dite de *plaque dure*
- Avalanche dite de *printemps* ou de *fonte*
- Le point de vue de l'ingénieur

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des 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 ?

- Plan de la conférence

Classification des avalanches

- Classification des avalanches
- Le point de vue du skieur
- Avalanche dite de *plaque*
- Avalanche dite de *plaque dure*
- Avalanche dite de *printemps* ou de *fonte*
- Le point de vue de l'ingénieur

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des avalanches

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.

- Plan de la conférence

Classification des avalanches

- Classification des avalanches
- Le point de vue du skieur
- **Avalanche dite de plaque**
- Avalanche dite de plaque dure
- Avalanche dite de printemps ou de fonte
- Le point de vue de l'ingénieur

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des 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]

- Plan de la conférence

Classification des avalanches

- Classification des avalanches
- Le point de vue du skieur
- Avalanche dite de *plaque*
- **Avalanche dite de *plaque dure***
- Avalanche dite de *printemps* ou de *fonte*
- Le point de vue de l'ingénieur

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des avalanches

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

- Plan de la conférence

Classification des avalanches

- Classification des avalanches
- Le point de vue du skieur
- Avalanche dite de *plaque*
- Avalanche dite de *plaque dure*
- **Avalanche dite de *printemps ou de fonte***
- Le point de vue de l'ingénieur

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des avalanches

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

- Plan de la conférence

Classification des avalanches

- Classification des avalanches
- Le point de vue du skieur
- Avalanche dite de *plaque*
- Avalanche dite de *plaque dure*
- Avalanche dite de *printemps* ou de *fonte*
- **Le point de vue de l'ingénieur**

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des avalanches

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

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

- **Avalanche en aérosol**
- Rôle de la reprise
- Dépôt

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions



Vallée de la Sionne (VS)

Courtoisie du SLF (Davos)

Rôle de la reprise

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

- Avalanche en aérosol
- **Rôle de la reprise**
- Dépôt

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions



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 balaie 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.

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

- Avalanche en aérosol
- **Rôle de la reprise**
- Dépôt

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

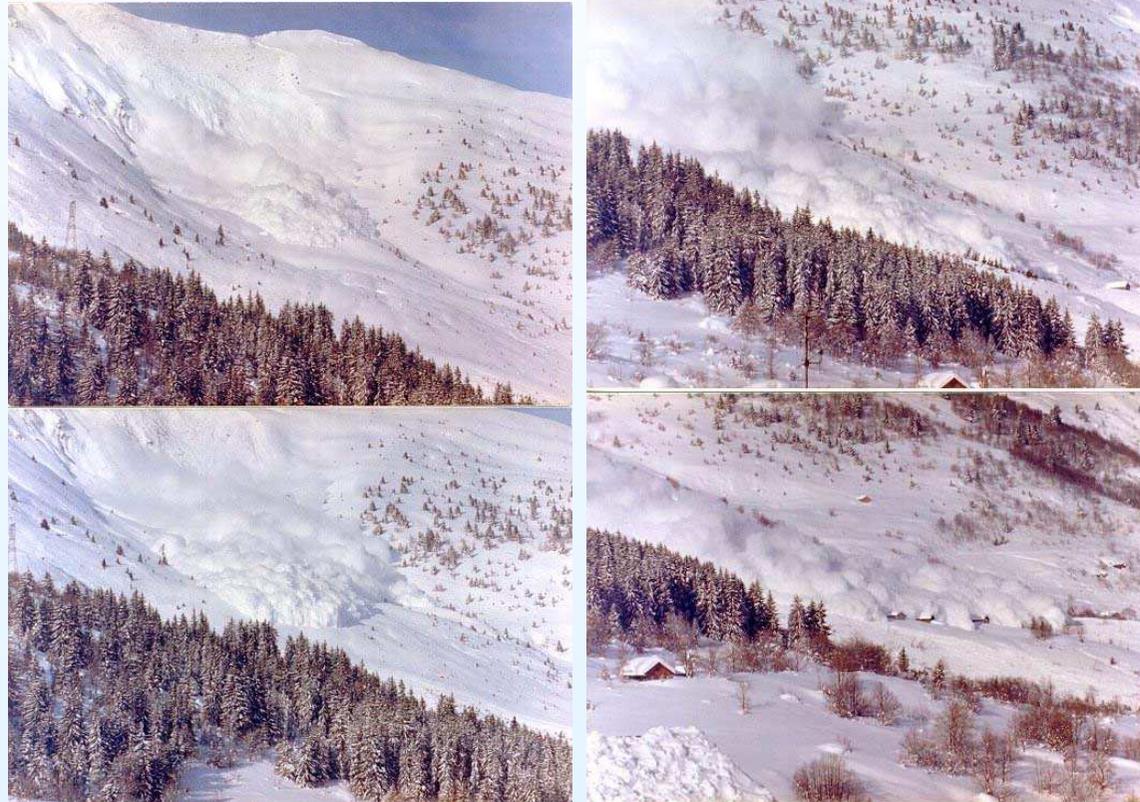
Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

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



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

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

- Avalanche en aérosol
- Rôle de la reprise
- **Dépôt**

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

Dépôt

Le dépôt varie de 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

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

- **Avalanche coulante**

- Forme des
écoulements

- Type de neige
mobilisée

- Forme des dépôts

- Étalement

- Bilan de masse

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions



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

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

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

- Avalanche coulante
- **Forme des écoulements**
- Type de neige mobilisée
- Forme des dépôts
- Étalement
- Bilan de masse

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

Forme des écoulements

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)

Type de neige mobilisée

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

- Avalanche coulante
- Forme des écoulements
- **Type de neige mobilisée**
- Forme des dépôts
- Étalement
- Bilan de masse

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

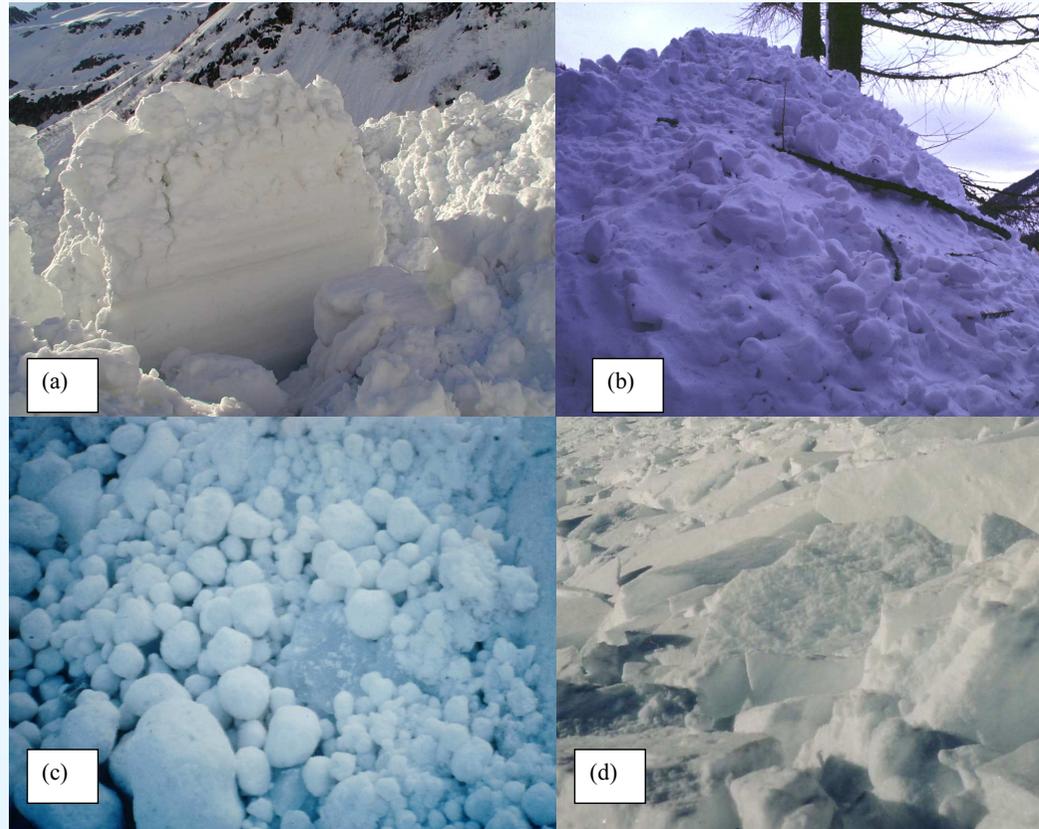
Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

Des types variables de neige mobilisée.



Forme des dépôts

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

- Avalanche coulante
- Forme des écoulements
- Type de neige mobilisée
- **Forme des dépôts**
- Étalement
- Bilan de masse

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

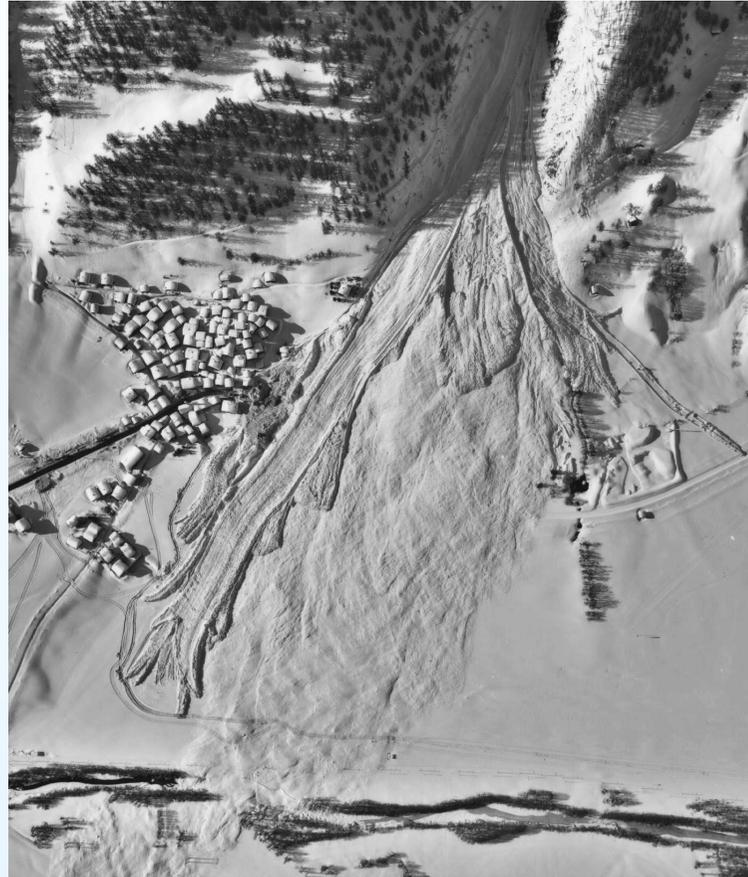
Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions



Des trajectoires/étalements très différentes selon les caractéristiques

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

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

- Avalanche coulante
- Forme des écoulements
- Type de neige mobilisée
- **Forme des dépôts**
- Étalement
- Bilan de masse

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

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.

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

- Avalanche coulante
- Forme des écoulements
- Type de neige mobilisée
- **Forme des dépôts**
- Étalement
- Bilan de masse

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

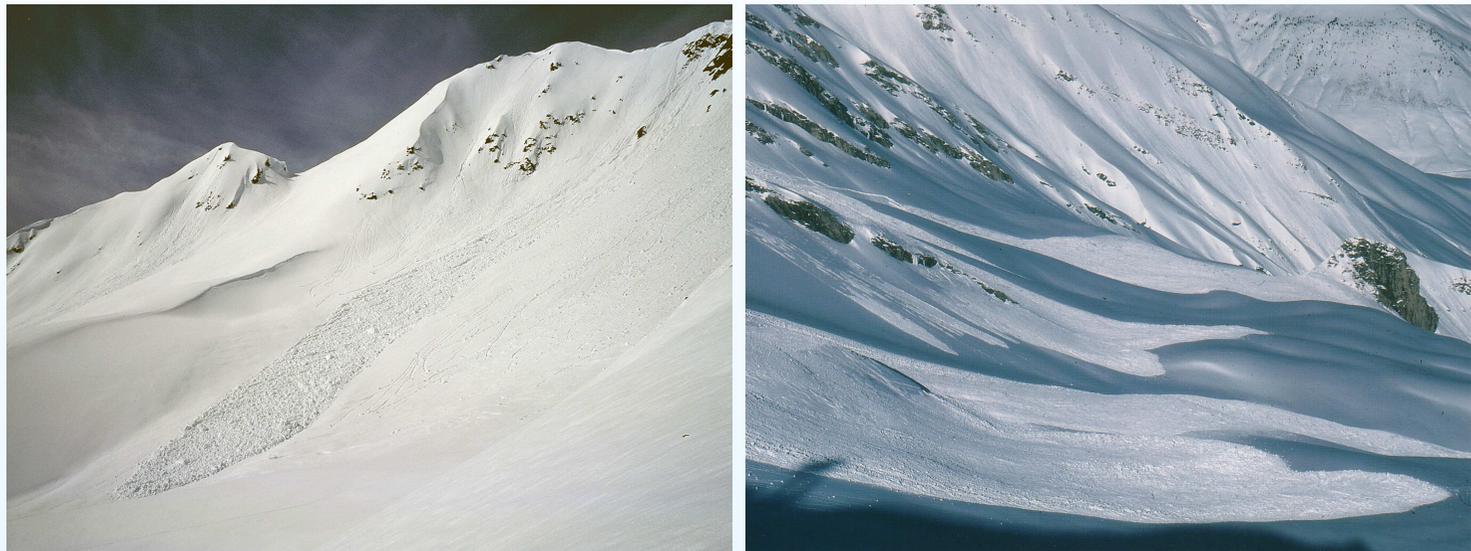
Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

Des dépôts étalés



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

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

- Avalanche coulante
- Forme des écoulements
- Type de neige mobilisée
- Forme des dépôts
- **Étalement**
- Bilan de masse

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

Étalement

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).

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

- Avalanche coulante
- Forme des écoulements
- Type de neige mobilisée
- Forme des dépôts
- Étalement
- **Bilan de masse**

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

Bilan de masse

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).

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

- **Effet d'une avalanche**
- Effet d'une avalanche en aérosol
- Effet d'une avalanche coulante

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

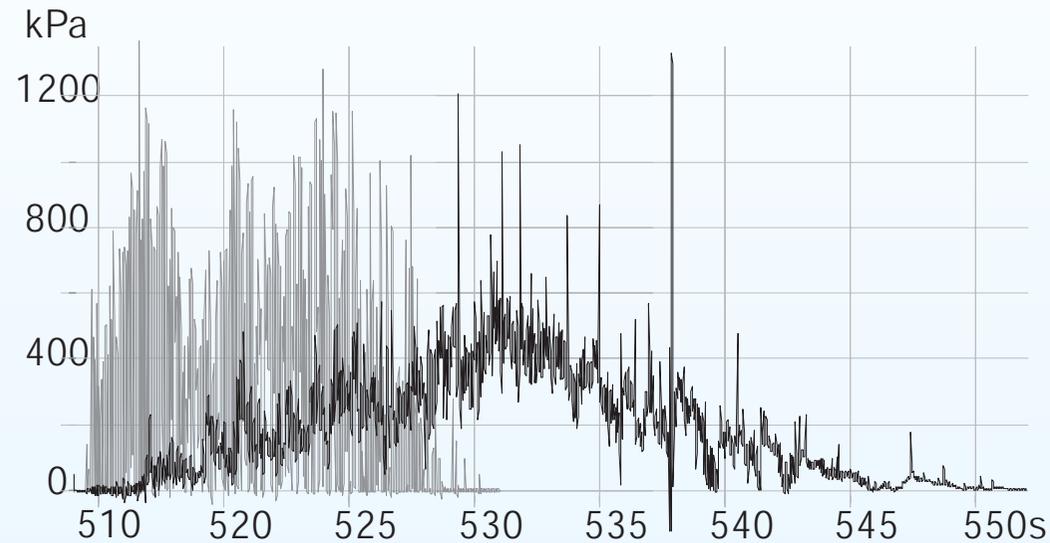
Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

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

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

- Effet d'une avalanche
- **Effet d'une avalanche en aérosol**
- Effet d'une avalanche coulante

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

Effet d'un aérosol puissant



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

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

- Effet d'une avalanche
- **Effet d'une avalanche en aérosol**
- Effet d'une avalanche coulante

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

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

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

- Effet d'une avalanche
- Effet d'une avalanche en aérosol
- **Effet d'une avalanche coulante**

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions



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

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

- Effet d'une avalanche
- Effet d'une avalanche en aérosol
- **Effet d'une avalanche coulante**

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions



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

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

- Formation d'une
avalanche

- Facteurs
météorologiques

- Exceptions

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

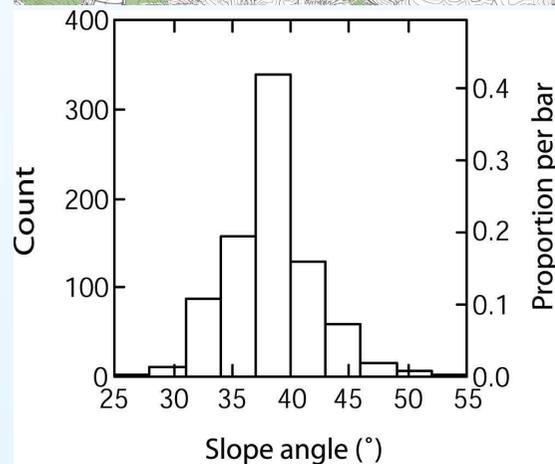
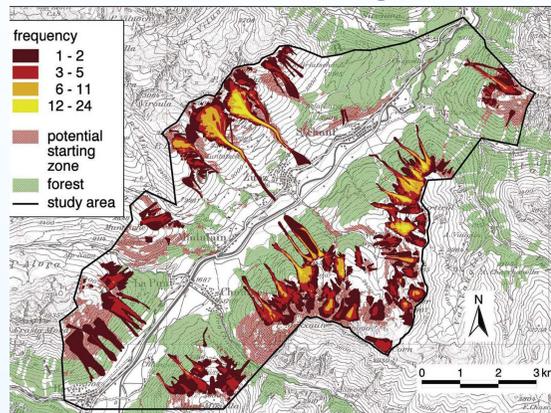
Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

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).

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

**Formation des
avalanches**

- Formation d'une avalanche

• **Facteurs
météorologiques**

- Exceptions

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

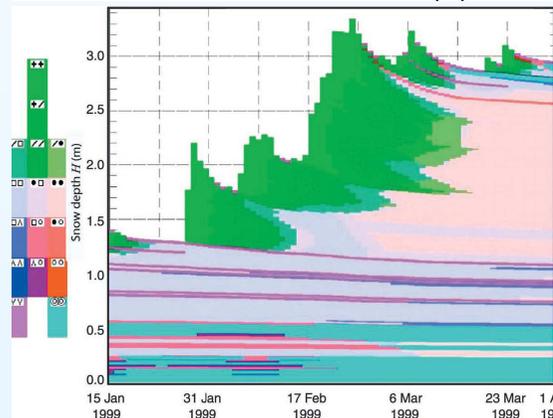
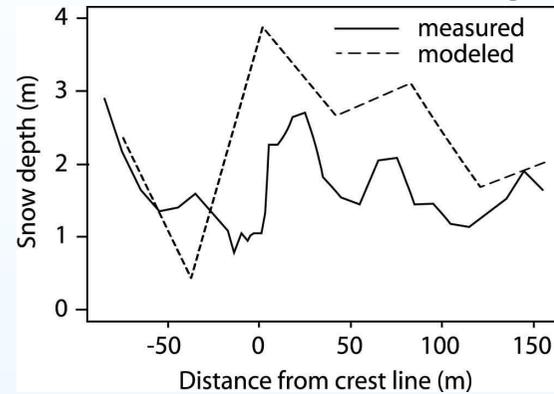
Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

Facteurs météorologiques

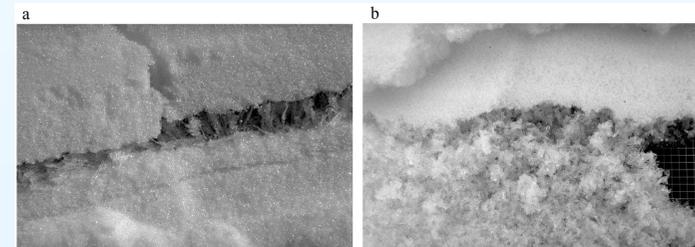
Des facteurs météorologiques favorables



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.



Exceptions

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

- Formation d'une avalanche
- Facteurs météorologiques

- **Exceptions**

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

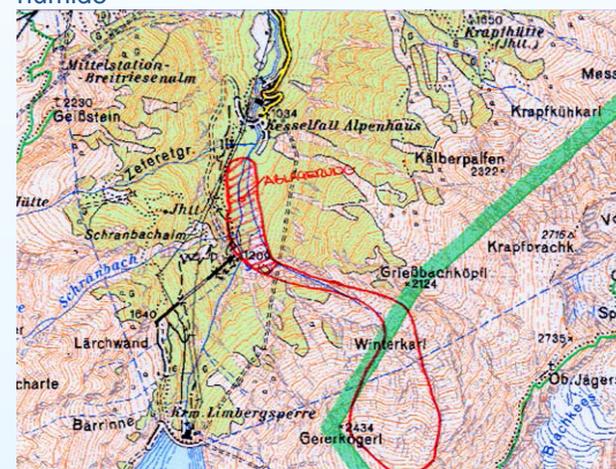
Conclusions

Les avalanches aiment les exceptions



Courtoisie Barbara Turnbull (SLF).

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



● Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

● **Avalanches du XIX^e
siècle en Suisse**

● Avalanches du XX^e
siècle en Suisse

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

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 Nesselthal 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).

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

- Avalanches du XIX^e
siècle en Suisse
- **Avalanches du XX^e
siècle en Suisse**

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

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 alpin 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 Évòlène. L'ensemble des dommages au bâti et au patrimoine dépasse les 440 Mio.

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

**Lutte contre les
avalanches**

- **Lutte contre les
avalanches**

- Une longue histoire
- Techniques de lutte
- Défense active
- Défense passive
- Zonage et
aménagement
- Bilan d'un siècle de
protections

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

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)

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

**Lutte contre les
avalanches**

- Lutte contre les
avalanches

- **Une longue histoire**

- Techniques de lutte
- Défense active
- Défense passive
- Zonage et
aménagement
- Bilan d'un siècle de
protections

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

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.

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les avalanches

- Lutte contre les avalanches
- Une longue histoire
- **Techniques de lutte**
- Défense active
- Défense passive
- Zonage et aménagement
- Bilan d'un siècle de protections

Problèmes de protection

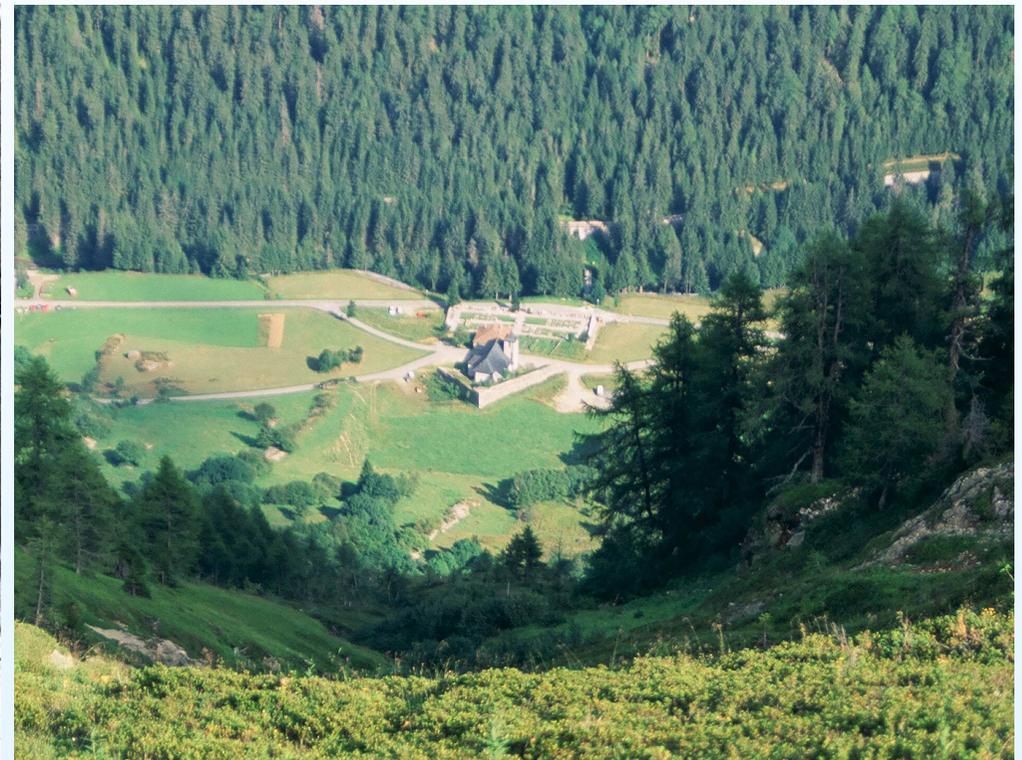
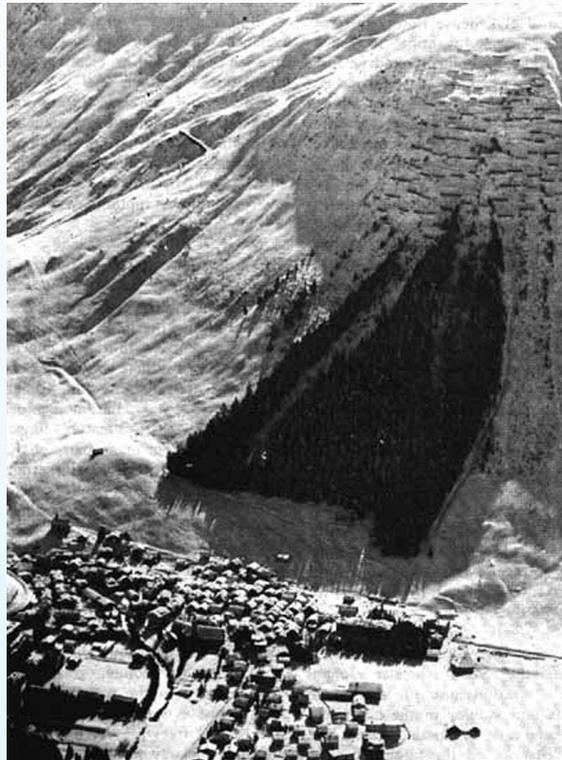
Modélisation des
avalanches

Conclusions

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)

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

**Lutte contre les
avalanches**

- Lutte contre les
avalanches
- Une longue histoire
- Techniques de lutte
- **Défense active**
- Défense passive
- Zonage et
aménagement
- Bilan d'un siècle de
protections

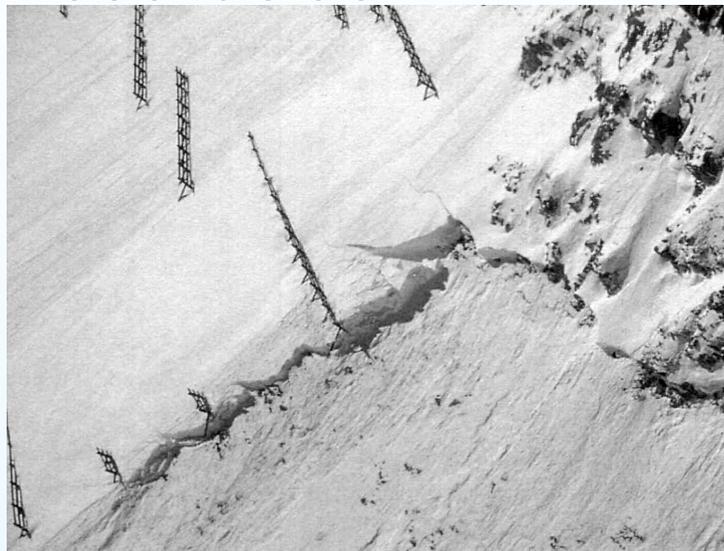
Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

Défense active

Filets et râteliers



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

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

**Lutte contre les
avalanches**

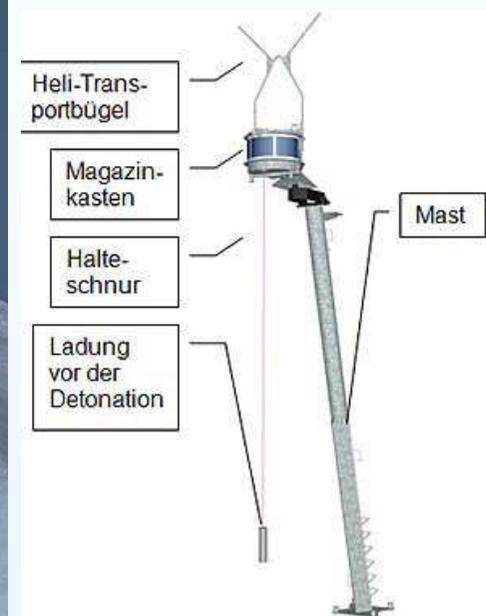
- Lutte contre les avalanches
- Une longue histoire
- Techniques de lutte
- **Défense active**
- Défense passive
- Zonage et aménagement
- Bilan d'un siècle de protections

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

Déclenchement préventif : explositif, Gazex, catex, Sprengmast



Le quotidien des domaines skiables...

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

**Lutte contre les
avalanches**

- Lutte contre les
avalanches

- Une longue histoire

- Techniques de lutte

- Défense active

- **Défense passive**

- Zonage et
aménagement

- Bilan d'un siècle de
protections

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

Défense passive

Défense passive (génie civil)



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

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

**Lutte contre les
avalanches**

- Lutte contre les
avalanches
- Une longue histoire
- Techniques de lutte
- Défense active
- **Défense passive**
- Zonage et
aménagement
- Bilan d'un siècle de
protections

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

Paravalanche de Tacconnaz : apprentis-sorciers ?



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

Zonage et aménagement

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

**Lutte contre les
avalanches**

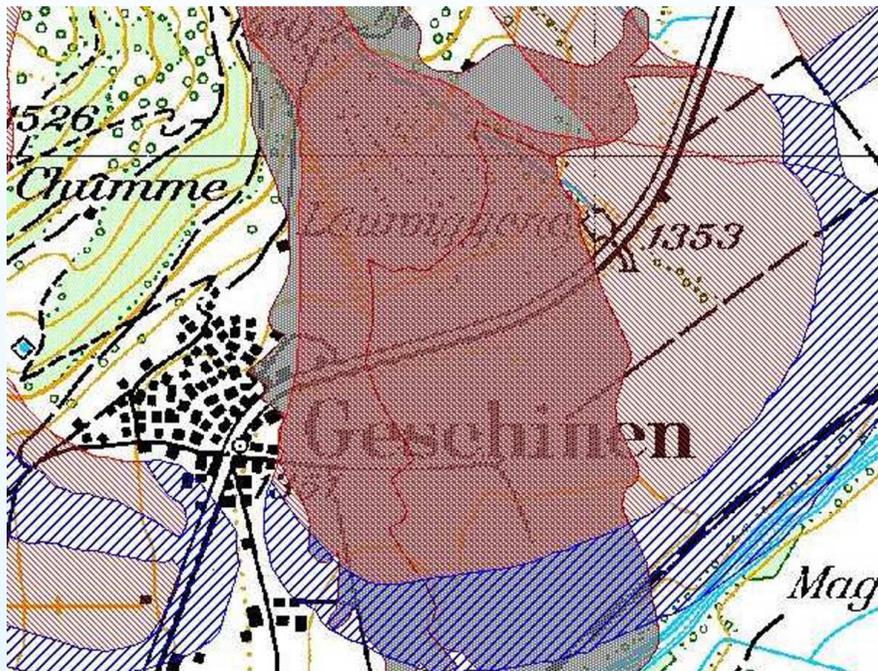
- Lutte contre les avalanches
- Une longue histoire
- Techniques de lutte
- Défense active
- Défense passive
- **Zonage et aménagement**
- Bilan d'un siècle de protections

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

Cadastre des avalanches, zonage des dangers



Plan de zonage réglementaire de Geschinen (VS).

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

**Lutte contre les
avalanches**

- Lutte contre les avalanches
- Une longue histoire
- Techniques de lutte
- Défense active
- Défense passive
- Zonage et aménagement
- **Bilan d'un siècle de protections**

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

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 ?

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

- **Défaillance de
systèmes de protection**

- Problème dans la
conception
- Enjeux de la protection
- Protection des voies de
communication

Modélisation des
avalanches

Conclusions

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).

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

- Défaillance de systèmes de protection
- **Problème dans la conception**
- Enjeux de la protection
- Protection des voies de communication

Modélisation des
avalanches

Conclusions

Problème dans la conception

Des problèmes de structure



Avalanche de Taconnaz (Haute-Savoie, 11 février 1999 et 5 avril 2006).
Mur : hauteur 7 m, épaisseur 1,5 m. Résistance : 250 kPa... en équivalent statique !

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

- Défaillance de
systèmes de protection

- **Problème dans la
conception**

- Enjeux de la protection

- Protection des voies de
communication

Modélisation des
avalanches

Conclusions



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

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

- Défaillance de systèmes de protection
- Problème dans la conception
- **Enjeux de la protection**
- Protection des voies de communication

Modélisation des
avalanches

Conclusions

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.

Protection des voies de communication

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

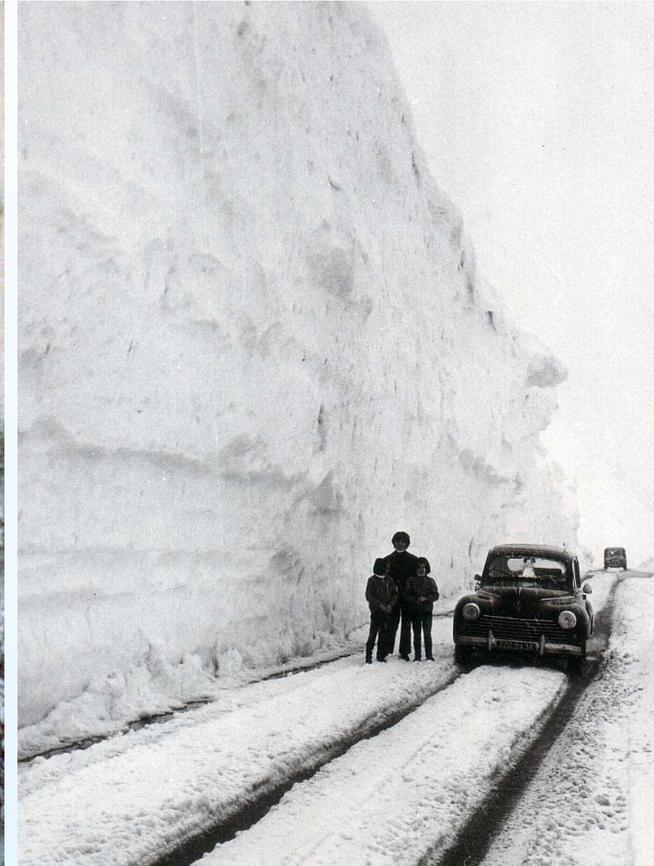
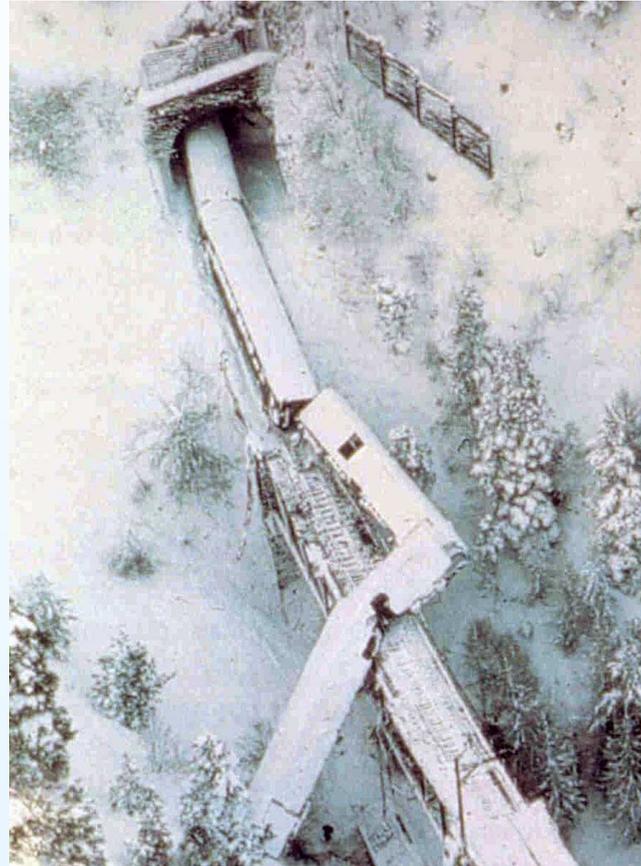
Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

- Défaillance de systèmes de protection
- Problème dans la conception
- Enjeux de la protection
- **Protection des voies de communication**

Modélisation des
avalanches

Conclusions



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

Modèles numériques

● Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

● Modèles numériques

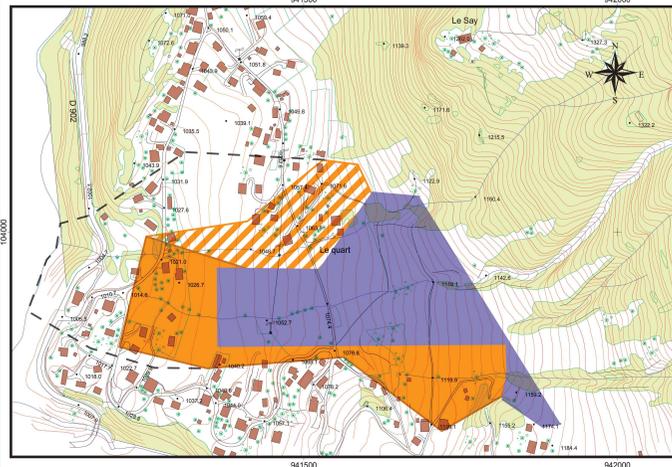
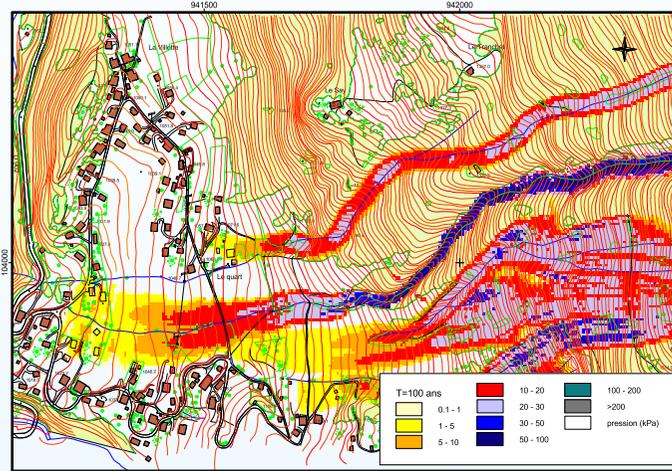
● Mesures *in situ* : la
Sionne (VS)

● Avalanches en
laboratoire

● Simulation des
aérosols

● Simulation des
avalanches coulantes

Conclusions



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 ?

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

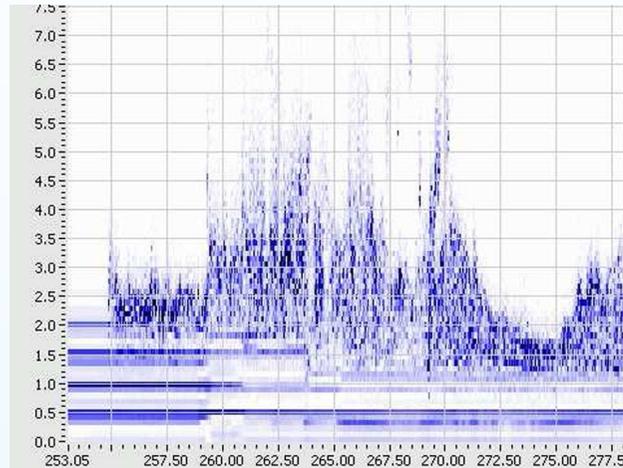
Problèmes de protection

**Modélisation des
avalanches**

- Modèles numériques
- **Mesures *in situ* : la
Sionne (VS)**
- Avalanches en
laboratoire
- Simulation des
aérosols
- Simulation des
avalanches coulantes

Conclusions

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.



- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

**Modélisation des
avalanches**

- Modèles numériques
- Mesures *in situ* : la Sionne (VS)
- **Avalanches en laboratoire**
- Simulation des aérosols
- Simulation des avalanches coulantes

Conclusions

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.

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

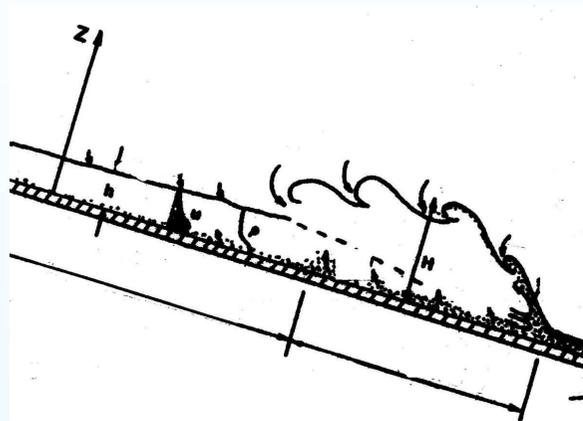
Problèmes de protection

**Modélisation des
avalanches**

- Modèles numériques
- Mesures *in situ* : la Sionne (VS)
- Avalanches en laboratoire
- **Simulation des aérosols**
- Simulation des avalanches coulantes

Conclusions

Simulation des 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.

● Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

**Modélisation des
avalanches**

● Modèles numériques

● Mesures *in situ* : la
Sionne (VS)

● Avalanches en
laboratoire

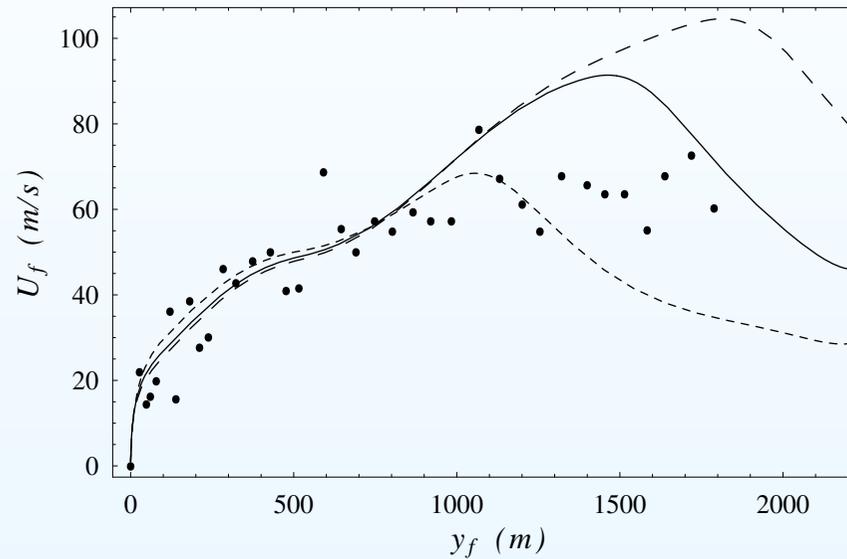
● **Simulation des
aérosols**

● Simulation des
avalanches coulantes

Conclusions

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).

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

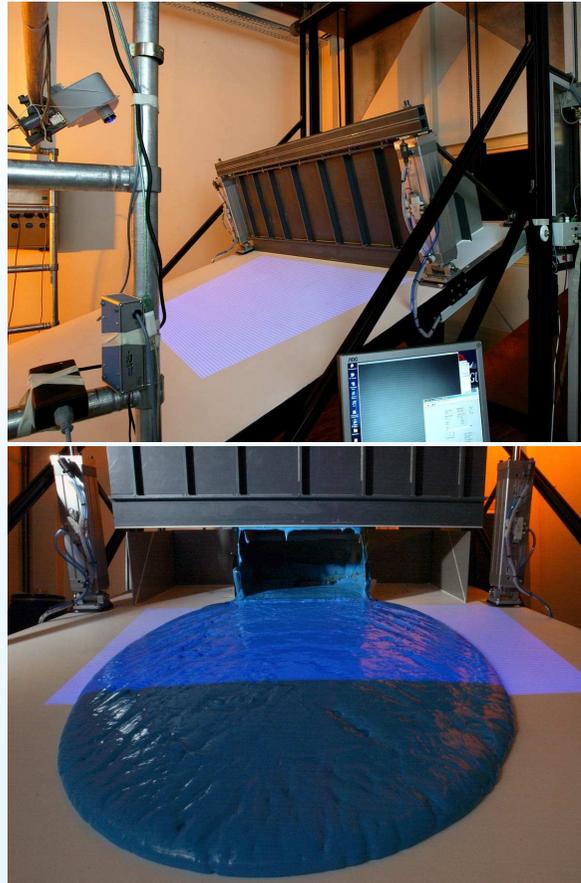
Problèmes de protection

**Modélisation des
avalanches**

- Modèles numériques
- Mesures *in situ* : la Sionne (VS)
- Avalanches en laboratoire
- Simulation des aérosols
- **Simulation des avalanches coulantes**

Conclusions

Simulation des avalanches coulantes



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.

Mesurer l'écoulement

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

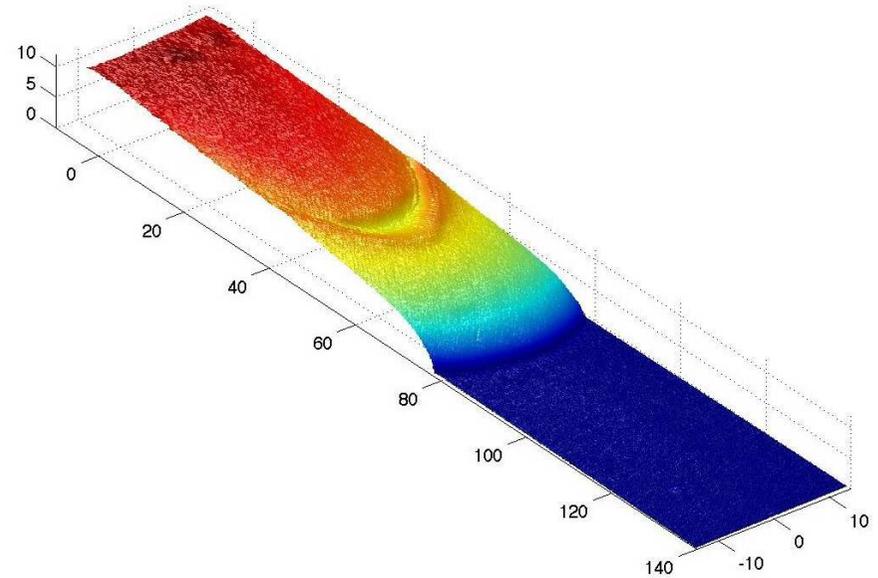
Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

**Modélisation des
avalanches**

- Modèles numériques
- Mesures *in situ* : la Sionne (VS)
- Avalanches en laboratoire
- Simulation des aérosols
- **Simulation des avalanches coulantes**

Conclusions



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

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

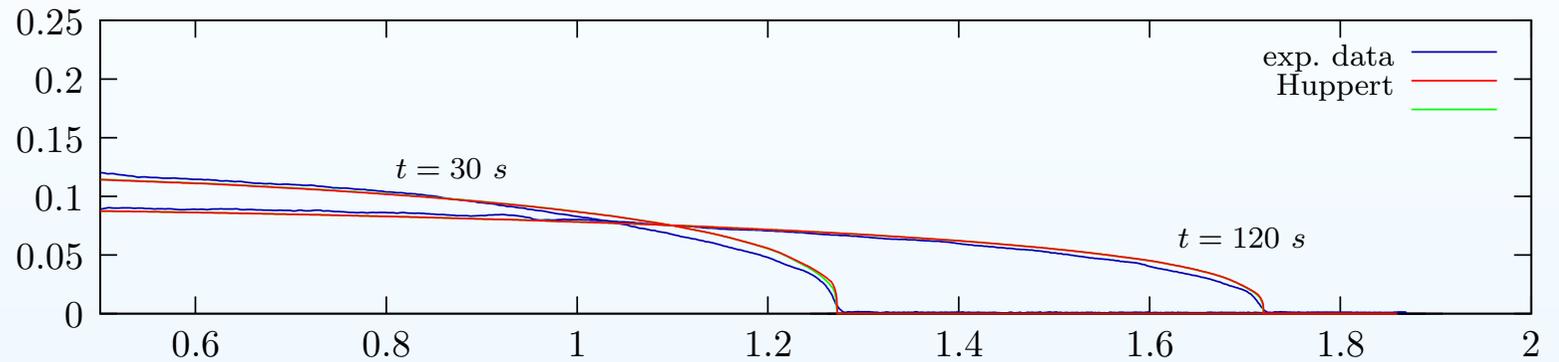
Problèmes de protection

**Modélisation des
avalanches**

- Modèles numériques
- Mesures *in situ* : la Sionne (VS)
- Avalanches en laboratoire
- Simulation des aérosols
- **Simulation des avalanches coulantes**

Conclusions

Fluide newtonien (glucose $\mu = 350 \text{ Pa}\cdot\text{s}$)



Comparaison entre modèle théorique (Saint-Venant) et données expérimentales : profils de hauteur à deux instants différents.

Mais des écarts parfois substantiels

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

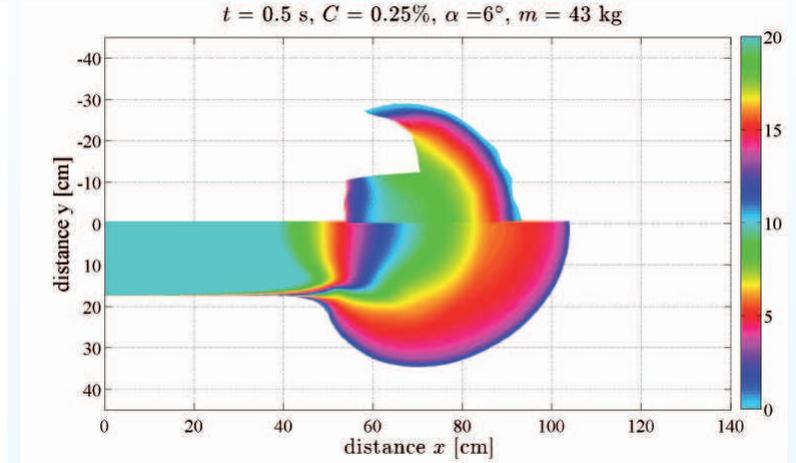
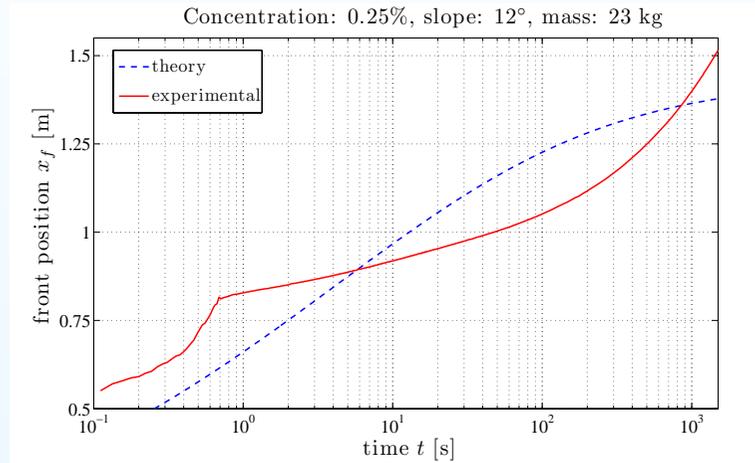
Problèmes de protection

**Modélisation des
avalanches**

- Modèles numériques
- Mesures *in situ* : la Sionne (VS)
- Avalanches en laboratoire
- Simulation des aérosols
- **Simulation des avalanches coulantes**

Conclusions

Fluide non newtonien (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.

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

- **Conclusions**
- Perspectives
- Quelques ouvrages

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 ?

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

- **Conclusions**
- Perspectives
- Quelques ouvrages

- 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

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

- Conclusions
- **Perspectives**
- Quelques ouvrages

- 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>).

- Plan de la conférence

Classification des
avalanches

Avalanches en aérosol

Avalanches coulantes

Effet des avalanches

Formation des
avalanches

Avalanches et dommages

Lutte contre les
avalanches

Problèmes de protection

Modélisation des
avalanches

Conclusions

- Conclusions
- Perspectives
- Quelques ouvrages

Quelques ouvrages

- > C. Ancey (coord.), Édisud, Aix-en-Provence, 1996 (en ligne sur www.toraval.fr).
- > C. Ancey, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 2006.
- > Inès Lamunière, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 2006.
- > Raphaël Rabusseau (et Pascal Delvaux), Presses d'Histoire Suisse, Genève, 2007.
- > (collectif) Schnee- und Lawinenforschung, Davos, 2000.

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