

Avalanches et construction en montagne : cas des refuges de haute montagne



UMR IGE
(UGA, CNRS, INRAE, IRD, G-INP)

INRAE



UGA
Université
Grenoble Alpes

thierry.faug@inrae.fr



Nicolas Eckert, Florence Naaim-Bouvet, Xavier Ravanat, Mohamed Naaim (refuge du Pavé)
Nicolas Eckert, Florence Naaim-Bouvet, Xavier Ravanat, Emmanuel Thibert (refuge des Sarradets)

Contexte

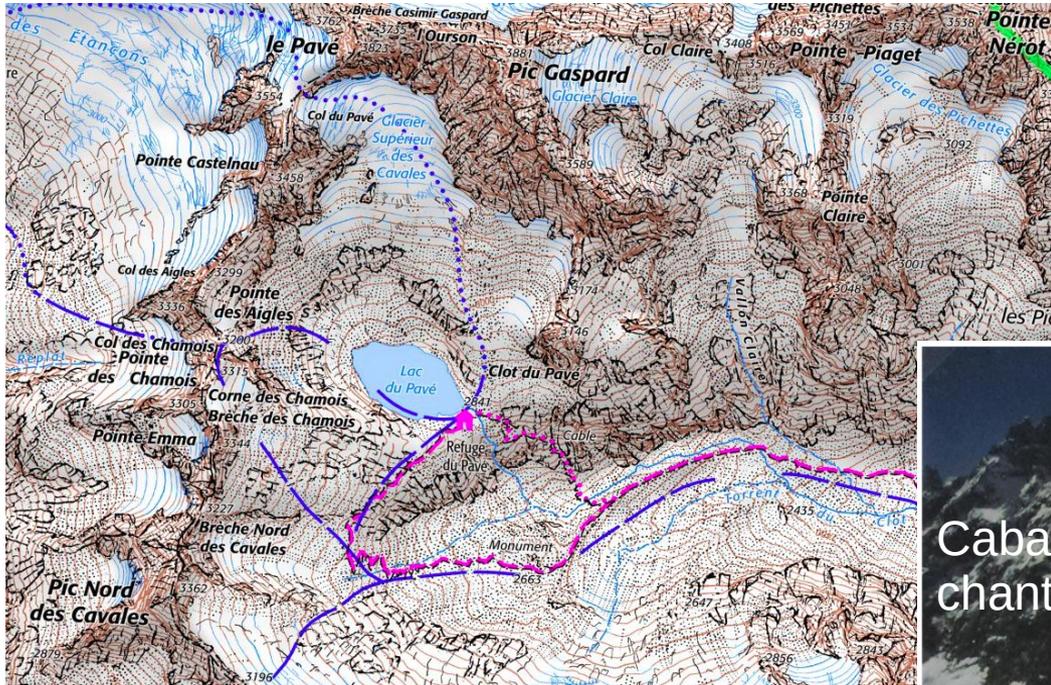
- Exposition des **refuges de haute montagne** à l'aléa '**avalanche de neige**' (exposition à de multiples aléas naturels autres que la neige et les avalanches).
- Cas des refuges FFCAM du Pavé (Alpes ; <https://refugedupave.ffcam.fr/>) et des Sarradets (Pyrénées ; <https://refugebrechederoland.ffcam.fr/>)
- Dans le cadre de **travaux d'expertise** à l'interface recherche–ingénierie paravalanche :
 - demande initiale d'un **commanditaire** : FFCAM pour le cas du refuge du Pavé, expert judiciaire pour le cas du refuge des Sarradets,
 - si oui, reformulation de la demande en fonction des connaissances scientifiques disponibles → objectif de **mettre en œuvre les derniers développements et outils scientifiques**, avec des contraintes coût & temps (tutelle INRAE : contrat de service de recherche + *certification ISO 9001**).

**pour l'ensemble de son système qualité d'expertise ayant trait à la gestion des risques gravitaires en montagne (avalanches de neige, chutes de blocs, laves torrentielles...) et des ouvrages hydrauliques (barrages, digues...).*

Plan de l'exposé

- Contexte : refuges de haute montagne exposés aux avalanches de neige
- Présentation des deux sites étudiés (localisation géographique + bref historique des avalanches) :
 - **refuge du Pavé** dans le secteur du lac du Pavé (massif des Ecrins, Alpes) : nouveau refuge inauguré le 27 août 2024, cabane de chantier faisant office de refuge depuis 1971.
 - **refuge des Sarradets** dans le secteur de la **brèche de Roland** (Pyrénées) : refuge inauguré en 1956, travaux d'extension et de modernisation débutés en 2016.
- Méthodologie générale et principaux résultats : (i) **zones de départ** des avalanches, (ii) **hauteurs de neige**, (iii) **dynamique et emprises** des avalanches, (iv) **pressions d'impact** sur les enjeux (ici les refuges), (v) **protection** paravalanche.
- Discussion & conclusion

Refuge du Pavé (FFCAM)



- massif des Ecrins (Alpes)
- à **2841 m** d'altitude



Refuge en construction
détruit en 1971

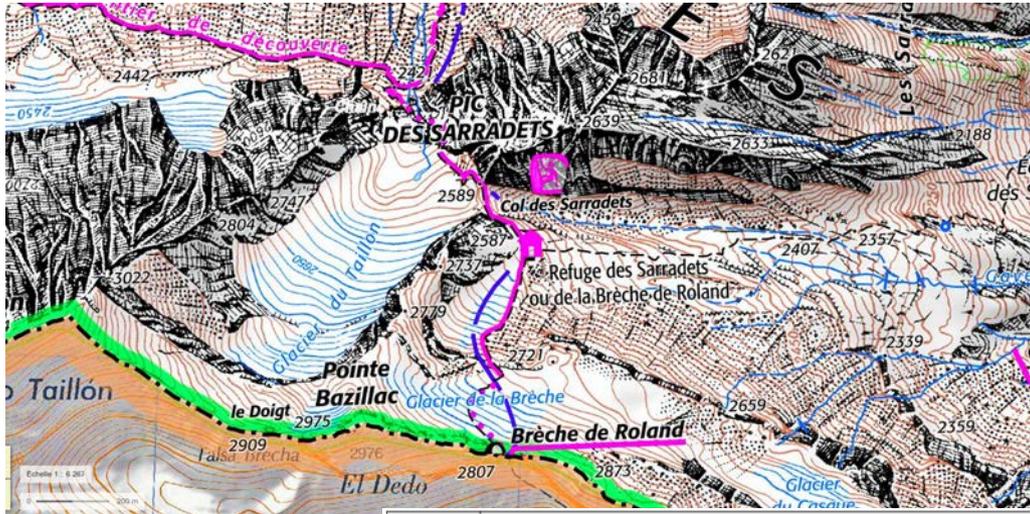


Cabanes de
chantier

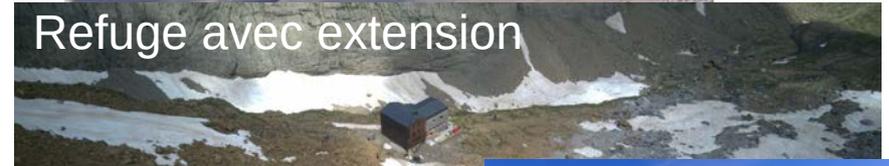


1979
↓
Une cabane de
chantier
renversée en
1979

Refuge des Sarradets (FFCAM)



Refuge avant extension



Refuge avec extension



Avalanche 2019

- Pyrénées
- surplombe le cirque de Gavarnie
- à **2587 m** d'altitude.

Année	Observations post-événement, dégâts
1980	Angle sud-est en béton de la terrasse cassé.
1986 ?	Panneaux solaires installés à plusieurs mètres du sol contre la façade sud arrachés et emportés plus en aval dans la pente.
1994	Porte d'entrée en bois enfoncée, rez-de-chaussée du refuge rempli de neige compacte.
2010	Palettes en bois placées sur le toit de l'ancien sas d'entrée du refuge emportées et retrouvées plus en aval.
2019	Façades sud et angle sud-ouest de l'extension du refuge en construction endommagés (sur toute la hauteur du nouveau bâtiment): arrachement de panneaux d'acier Corten, enfoncement de volets en acier et des huisseries. Plusieurs niveaux du nouveau bâtiment remplis de neige, avec menuiseries, cloisons intérieures et nombreux équipements cassés ou déplacés.

Méthodologie générale

Prévention - long terme
(cartographie, zonage, protection)
≠
Prévision

(1) **Zones de départ** des avalanches (surface).
Zones de reprise de la neige par l'écoulement.

(2) **Hauteurs de neige** (chute de neige, neige fraîche, totale au sol) dans les zones de départ des avalanches. Et dans les zones d'écoulement (reprise de la neige par l'écoulement).

(3) **Dynamique** (dense, aérosol, qualité de la neige, etc.) **des avalanches** :
- **emprises** des avalanches
- **pressions** des « écoulements libres » (scénarios u et h)

Calcul des avalanches denses :
- modèle analytique (CM),
- simulation CM stochastique
- modèle Saint-Venant
- ...

Rhéologie de Voellmy enrichie (cohésive) :

$$\tau_b = \left(\tau_c + \mu \rho g_z h + \frac{\rho g}{\xi} |\bar{u}|^2 \right) \frac{\bar{u}}{|\bar{u}|}$$

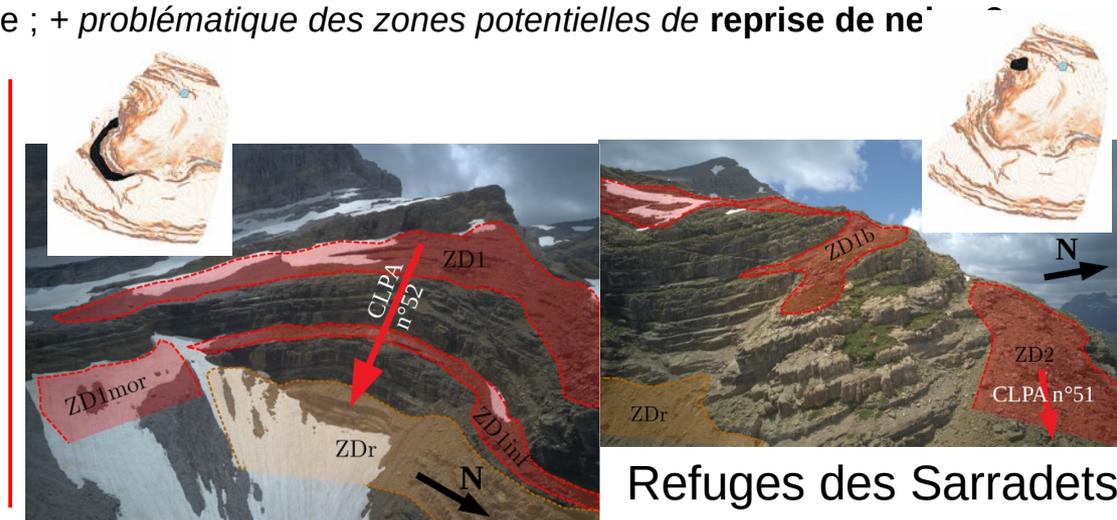
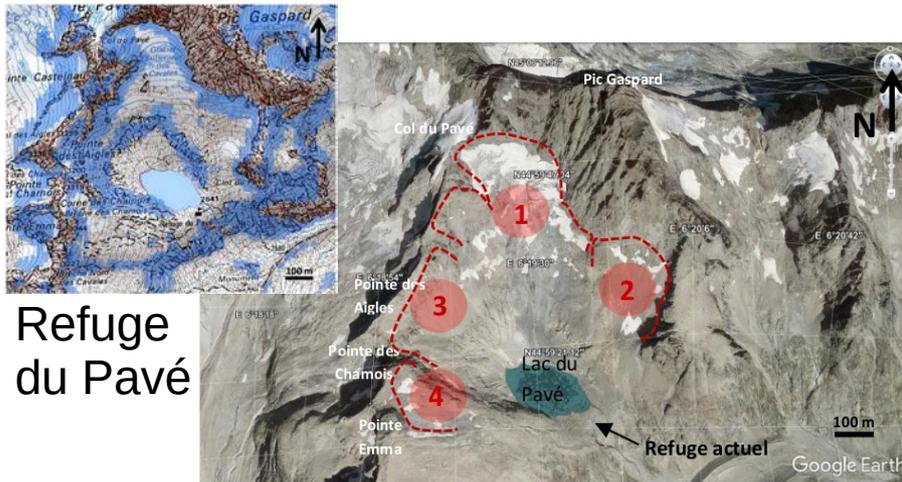


Calcul des ressauts normaux et obliques

Croisement avec les enjeux ?
Si oui :
(4) **pression d'impact** ?
(5) **protection** paravalanche ?

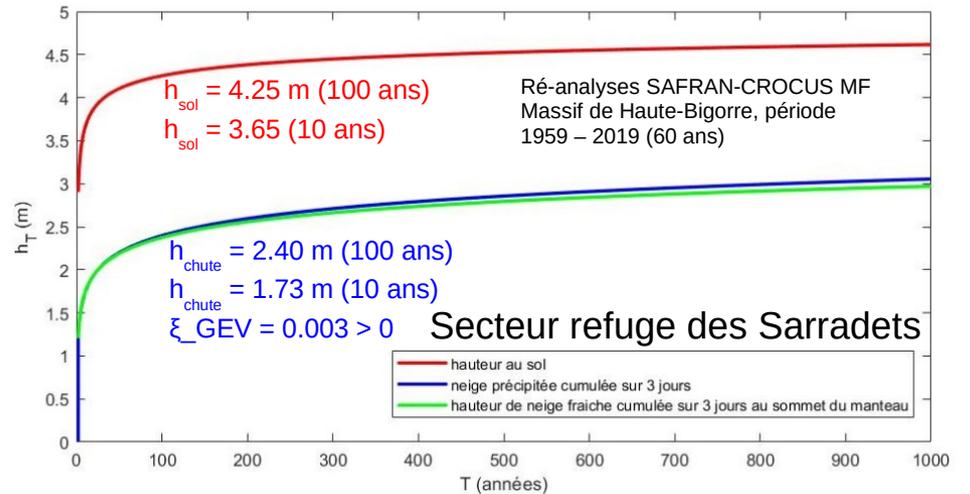
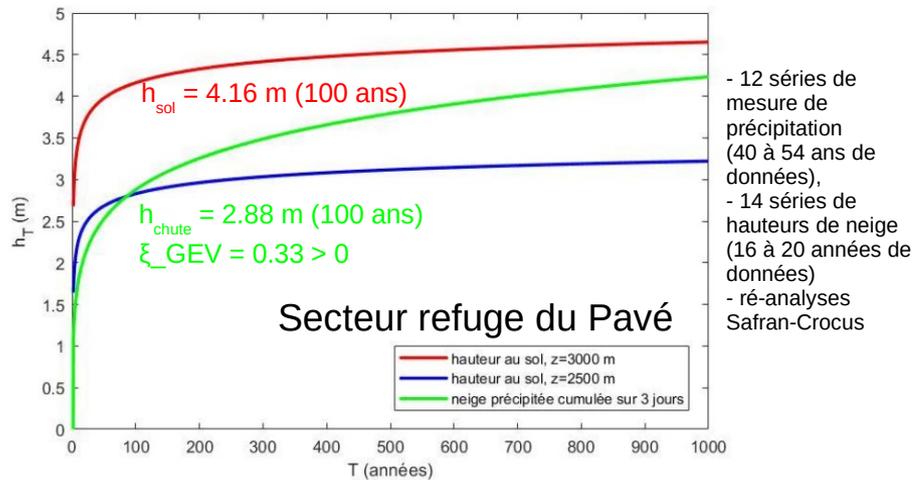
(1) zones de départ des avalanches

- Chaque site est spécifique : **cartographie et approche géomorphologique + visite(s) de terrain** dans des zones d'accès difficile (intérêt des vols **drone** ; + *trajectoires des avalanches : point de vue depuis la ZD, en direction de l'enjeu*) + CLPA dans le cas du refuge des Sarradets.
- Méthodes automatiques objectives [Maggioni & Gruber, 2003 ; thèse de C Duveillier, 2023] ; approches large échelle, question aiguë du 'downscaling' pour un site donné (= un ou quelques couloirs d'avalanche menaçant un refuge) ?
- **Emprises de zones de départ potentielles cohérentes avec des hauteurs de neige (T élevées)** → avalanche menaçant une construction/un bâtiment tel qu'un refuge ; surfaces bien plus grandes que la surface des plaques déclenchées dans le cadre de la pratique récréationnelle ; + *problématique des zones potentielles de reprise de ne*



(2) hauteurs de neige

- Données disponibles :
 - **réanalyses SAFRAN-CROCUS produites par Météo-France** par massif, exposition et bande d'altitude (voir par ex. [Vernay et al 2022]) ; différentes hauteurs de neige considérées : hauteur totale de neige au sol (scénario neige chaude/humide), chute de neige cumulée sur 3 jours et hauteur de neige fraîche sur 3 jours (scénario neige froide/sèche).
 - **séries de mesure issues de stations à proximité** (station Nivose en haute montagne, précipitations) ; question de l'extrapolation en fonction de l'altitude si postes bien plus bas en altitude que le secteur étudié : gradients linéaires [Gaume et al 2013] ?
- Ajustement d'une loi généralisée des valeurs extrêmes (à 3 paramètres : position μ_{GEV} , dispersion σ_{GEV} , forme ξ_{GEV})

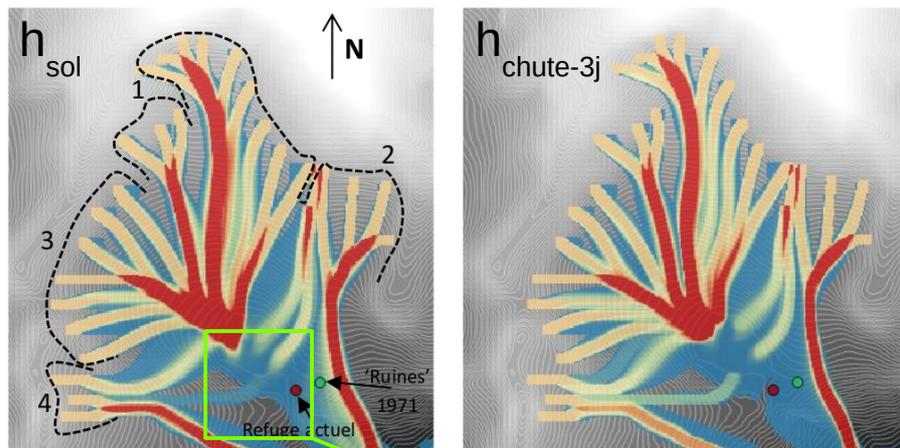


- Des verrous : période de retour associée à la hauteur de neige MAIS quid des autres variables ? contexte stationnaire ?

(3) dynamique des avalanches

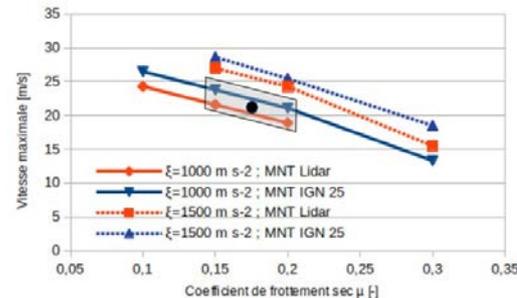
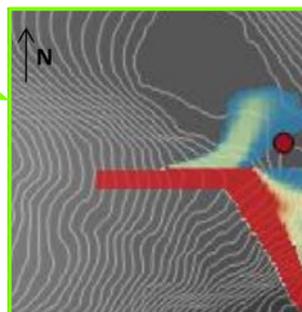
- Données historiques: emprise des avalanches (contours des dépôts, dégâts laissés par l'avalanche) : **très peu de données en contexte de haute montagne !**
- **Simulations de scénarios d'avalanche** sur la base de modèles plus ou moins sophistiqués :
 - solutions analytiques basées sur : modèle centre de masse (CM), loi d'échelle [Gauer, 2018]
 - simulations numériques basées sur : modèle centre de masse stochastique (CM stochastique), modèle Saint-Venant (SV), d'autres modèles développés (MPM récemment),
 - en général : fermeture des modèles pré-cités par une loi rhéologique pour la neige en écoulement basées sur le modèle de Voellmy.
- Calcul des **emprise des avalanches** avec en inputs : surfaces de départ (ou point de départ dans le cas CM) + hauteur de neige mobilisée (égale ; ou minorée : facteur de pente [Salm et al 1990]) dans la zone de départ → volume d'avalanche (SV).
- Accès aux grandeurs de l'écoulement dans les emprises (CM : distance d'arrêt) : **épaisseurs** (= input pour CM) et **vitesses des écoulements**, et notamment au niveau des **enjeux** (→ calcul des pressions d'impact).
 - **Refuge du Pavé** : possibilité de localiser à un autre endroit (dans le secteur du lac du Pavé) → identification de la localisation « la moins mauvaise » en terme de risque avalanche.
 - **Refuge des Sarradets** et son extension : bâtiments déjà en place → quantifier la dynamique de l'avalanche au niveau de l'enjeu et estimer les niveaux de pression d'impact.

(3) dynamique des avalanches



Refuge du Pavé

Simulations CM stochastique
 → mise en évidence d'une zone moins exposée que l'emplacement de la cabane de chantier
 → aléa pointe Emma : $u = 25.8 \text{ m/s}$
 ($Fr = u / (gh \cos \theta)^{1/2} \sim 5$)

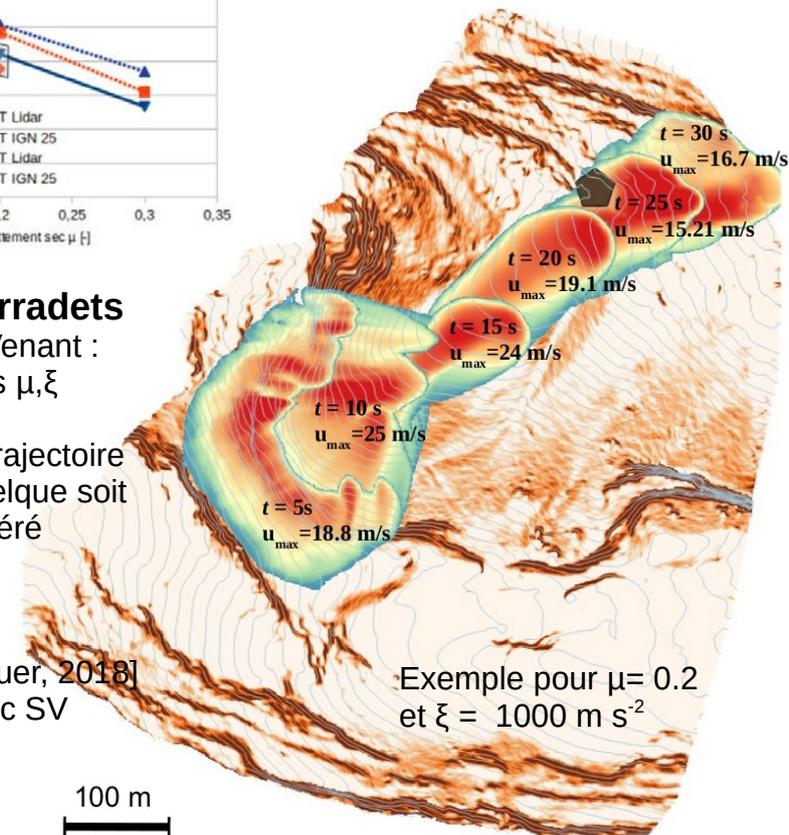


Refuge des Sarradets

Simulation Saint-Venant :

- plusieurs couples μ, ξ
- effet du MNT
- refuge dans la trajectoire de l'avalanche quelque soit le scénario considéré

- + Simulations CM stochastique
- + loi d'échelle [Gauer, 2018]
- cohérentes avec SV



$$\tau_b = \left(\tau_c + \mu \rho g_z h + \frac{\rho g}{\xi} |\bar{\mathbf{u}}|^2 \right) \frac{\bar{\mathbf{u}}}{|\bar{\mathbf{u}}|}$$

(4) pressions d'impact

- **Pression des « écoulements libres »** ; rôle du nombre Froude (régime gravitaire, régime inertiel, régime intermédiaire) :

$$P_{el} = \frac{1}{2} \rho u^2 + \rho g h \cos \theta$$

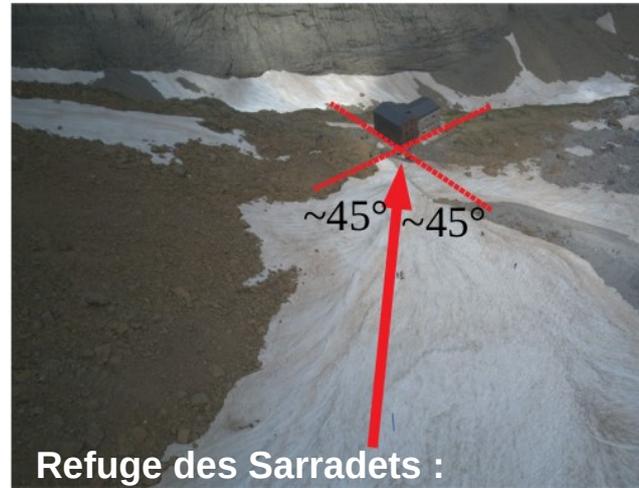
- Passage à la **pression d'impact** : caractérisation des coefficients C_x (analogie mécanique des fluides) et k (analogie d'un coefficient de poussée des terres en mécanique des sols) ?

$$P_{el} = C_x \frac{1}{2} \rho u^2 + k \rho g h \cos \theta$$

- Verrous scientifiques : prise en compte de **processus mécaniques complexes** (zones mortes, ressauts, jets granulaires/diphases, etc.) lors de l'interaction de l'écoulement avec l'enjeu qui « fait obstacle » à l'écoulement (ici le refuge et/ou la structure de protection).
- Valeurs retenues pour les cas des refuges du Pavé et des Sarradets (différents choix/scénarios) :
 - **refuge du Pavé** (dense/pointe Emma) : scénario étrave (~100 kPa) vs. scénario « remblais paravalanches » (de ~50 kPa sur les cinq premiers mètres du remblai après la rupture du pente à ~20 kPa sur la toiture du refuge).
 - **refuge des Sarradets** (dense/cirque principal CLPA n°52 ; angle sud-ouest) : scénario refuge avec extension (~70 à ~110 kPa) vs scénario ancien refuge (diminution significative de $C_x \rightarrow 1.5$ à valeur voisine de 1).

(5) besoins/solutions de protection

- La meilleure protection : un bon zonage mais protection paravalanche nécessaire si enjeux dans les emprises : souvent le cas pour les refuges de haute montagne !
- Contraintes et solutions de protection préconisées.



- problématique de la nouvelle extension,
- amplification de la pression d'impact (notamment angle sud-ouest),
- besoins de protéger/renforcer l'extension réalisée.



Discussion & conclusion

- Refuges de haute montagne :
 - Contexte d'enjeux fortement exposés aux avalanches de neige (en période hivernale) → nécessité de protection permanente (bâti)
 - Partie du bâtiment en refuge d'hiver (non gardée mais ouverte en période hivernale) : mesures de protection permanente vs. gestion temporelle du risque en période hivernale ?
 - Très peu de données :
 - hauteurs de neige → intérêt majeur des ré-analyses SAFRAN-CROCUS MF
 - historique des avalanches (trajectoires et dépôts) → intérêt majeur des modèles de propagation d'avalanches développés
- Plusieurs exemples de verrous scientifiques à chacune des étapes :
 - zones de départ des avalanches : méthode automatisée à l'échelle du couloir ?
 - hauteurs de neige : contexte instationnaire [thèse E. Le Roux, 2022] ? prise en compte du TNV ?
 - modélisation des avalanches : rhéologie en fonction de la qualité de la neige (transition de régime) ? prise en compte des processus de dépôt/érosion ?
 - calcul des pressions d'impact ; connaissance et modélisation des interactions écoulements/obstacles (exemple : calcul de ressauts granulaires normaux et obliques) ?
 - approche « aléa centrée » (dans les cas présentés : refuges de haute montagne) vs. calcul de risque ? (quel risque accepté ?)

MERCI POUR VOTRE ATTENTION !

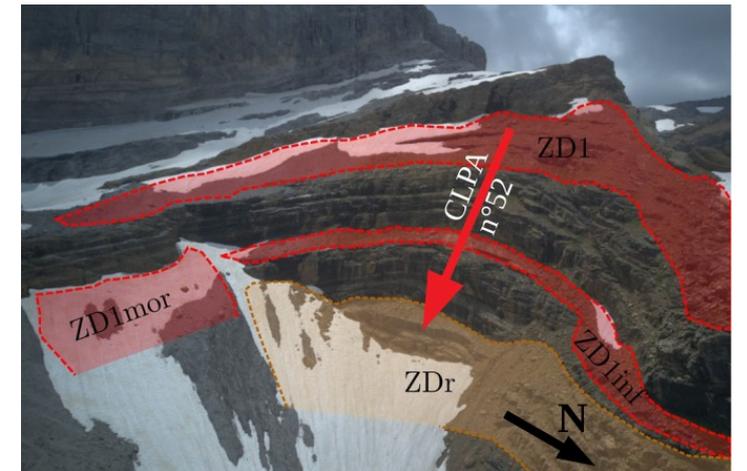
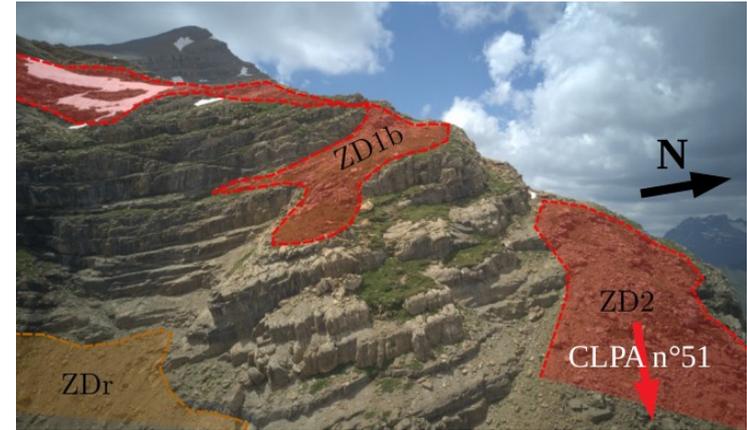
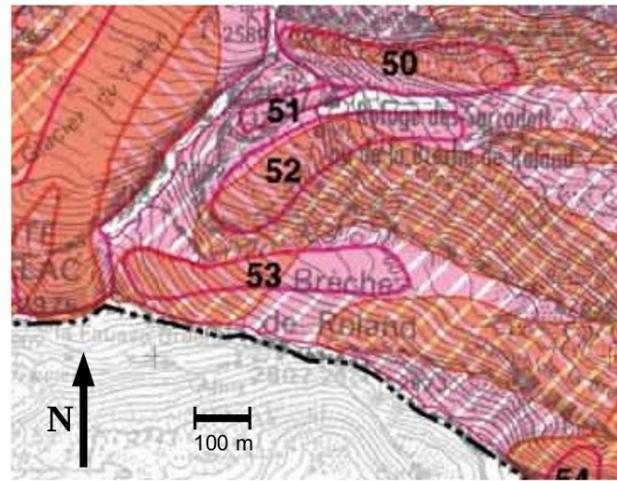
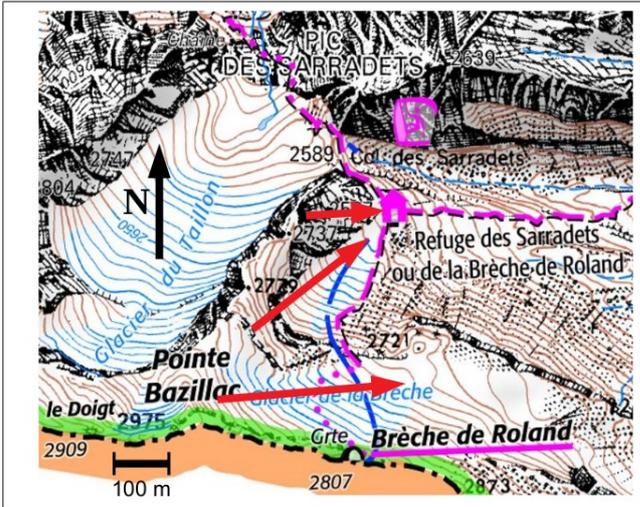


Merci à différents acteurs, outre les collègues cités en introduction qui ont contribué :

- FFCAM,
- expert judiciaire (Sarradets),
- CAF Briançon,
- gardiens de refuge,
- pratiquants de la montagne,
- etc.



Sarradets : CLPA



Sarradets : CM stochastique

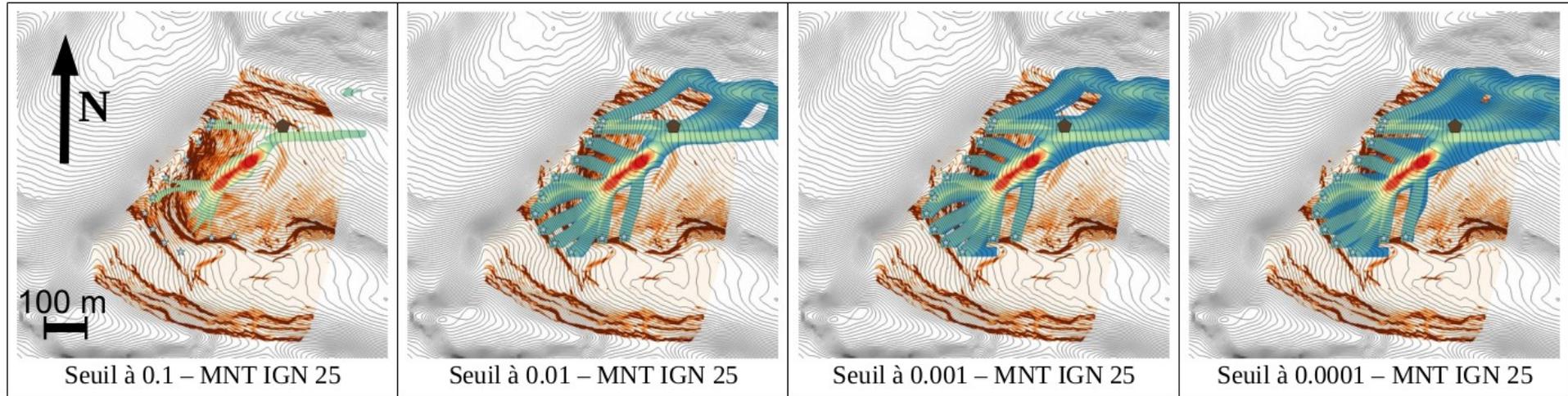


Figure 13. Emprise des avalanches calculées à partir des simulations stochastiques basées sur un modèle centre de masse (simulations CM2D) en considérant l'ensemble des points de départ de P1 à P13, pour le MNT Lidar en entrée. Le niveau de couleur indique l'aléa en termes de fréquence de passage des avalanches de faible (couleur bleue) à forte (couleur rouge). Les images de gauche à droite montrent les résultats des mêmes simulations mais en ne reportant que les avalanches dont la probabilité de passage est supérieure à une valeur seuil p qui varie de 0.1 à 0.0001 (voir texte pour explication).