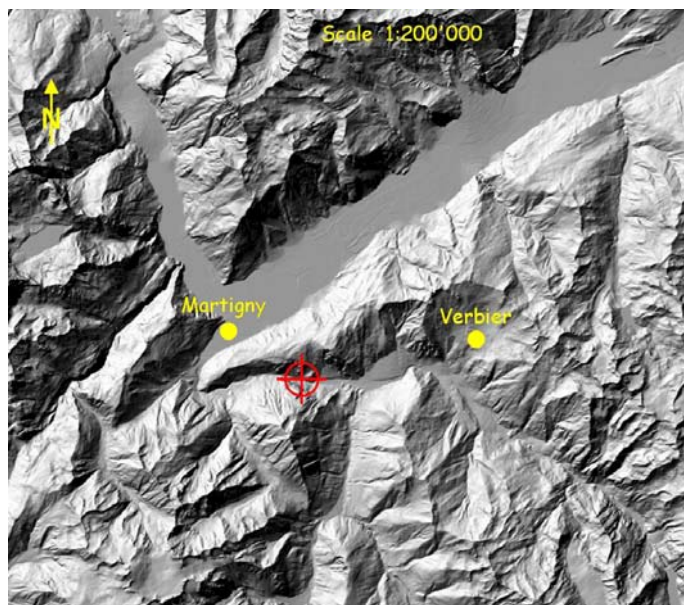


### 6.2.3 3D modeling of geologic structures applied in rock fall hazard mitigation: the Trappistes case study, Valais, Switzerland

Raphaël MAYORAZ (CREALP - Canton du Valais)

R. Mayoraz présentait le cas de l'éboulement des Trappistes, auquel diverses technologies abordées dans le projet ont été appliquées. Ont également participé à ce travail Olivier Besson (Bureau d'ingénieurs Pascal Tissières, Martigny, Suisse) et Leandro Bornaz (Politecnico di Torino, Dipartimento di georisorse et territorio, Italie) qui a réalisé le Laser Scan.



Localisation de l'éboulement des Trappistes

Le site se trouve entre Martigny et Verbier, sur la route du Grand Saint Bernard, qui assure la liaison avec la Vallée d'Aoste. Cet axe de communication a une grande importance économique : entre 30 000 et 40 000 personnes sont présentes dans ce secteur à Pâques et à Noël. La route, la voie ferrée (en tunnel) et une conduite d'eau passent sous un éperon rocheux à Trappistes. Une galerie a été construite pour protéger la route des avalanches qui descendent du flanc sud (photo ci-dessous).



Eperon rocheux du site des Trappistes sur la route du Grand Saint Bernard

Lors de l'événement du 29 nov. 2003, environ 600 m<sup>3</sup> de l'éperon rocheux sont tombés sur la route, tuant un automobiliste qui passait dans la galerie (voir photos juste après l'accident : [diapos 4 à 7](#)).

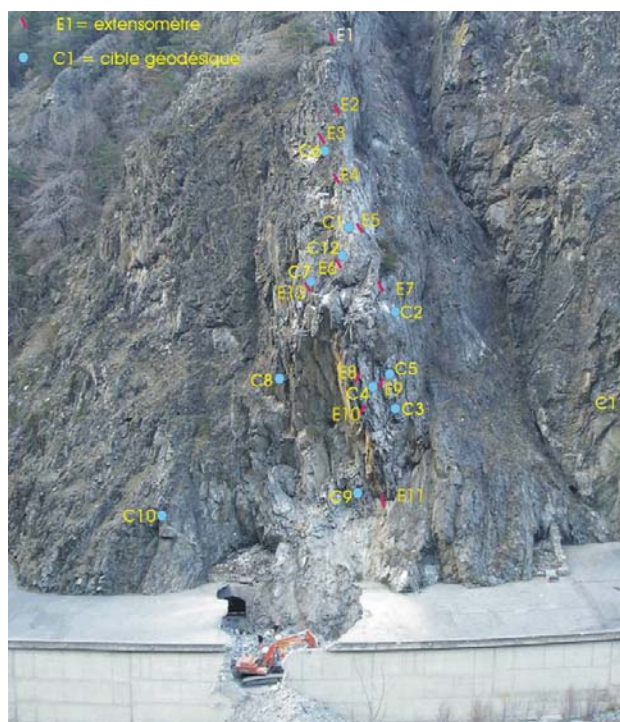


Effet de poinçonnement sur la galerie lors de l'éboulement du 29 nov. 2003

Le bloc principal (environ 100 m<sup>3</sup>) a coupé le béton de la galerie sur 4 m de haut, avec un effet de poinçonnement dans la structure (photos ci-dessus). Une vue de la zone de rupture met en évidence le contour de la niche d'arrachement ([diapo 7](#)).

#### Intervention d'urgence :

Une auscultation du site a été menée pour évaluer le risque de nouvelles chutes de blocs, afin de décider si l'on osait laisser les machines aller au-dessous pour rouvrir la route. Des points de mesures manuelles géodésiques et extensométriques ont été posés.



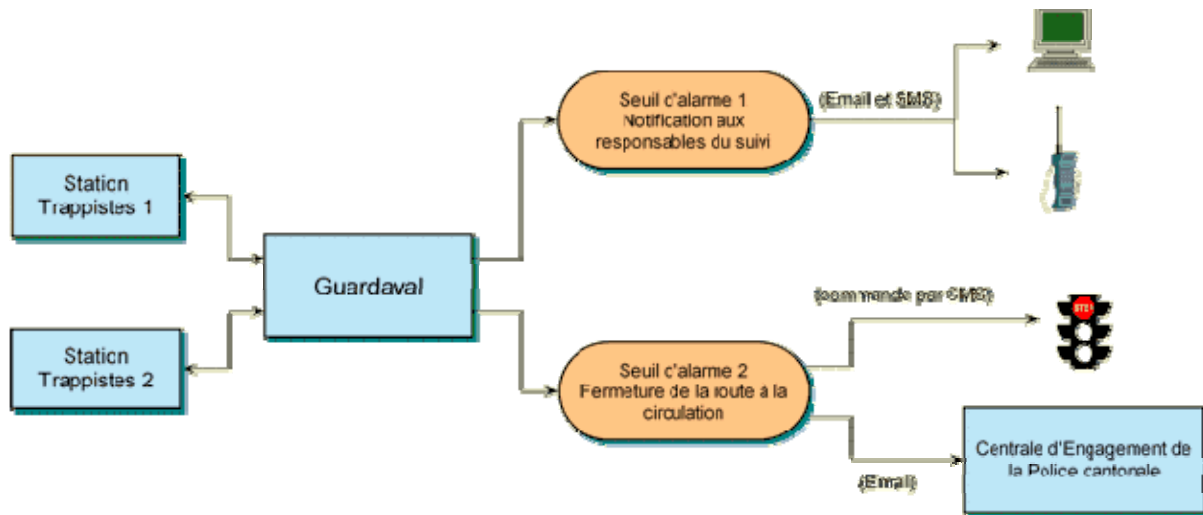
#### Système d'alarme automatique à deux niveaux :

⇒ **Niveau 1 : Alerte** (valeur seuil = 0.4 mm/h.)

- Notification automatique par SMS et e-mail aux responsables chargés du suivi (géologue cantonal et gestionnaires des routes).

⇒ **Niveau 2 : Alarme** (valeur seuil = 0.8 mm/h.)

- Fermeture à la circulation de la galerie par mise au rouge automatique du feu de signalisation via le système AUTOCALL Mobile (activation par SMS) ;
- Mobilisation de la Centrale d'Engagement de la Police via notification e-mail générée automatiquement par Guardaval (extensomètre + station émettrice : cf. [diapo 9](#)).

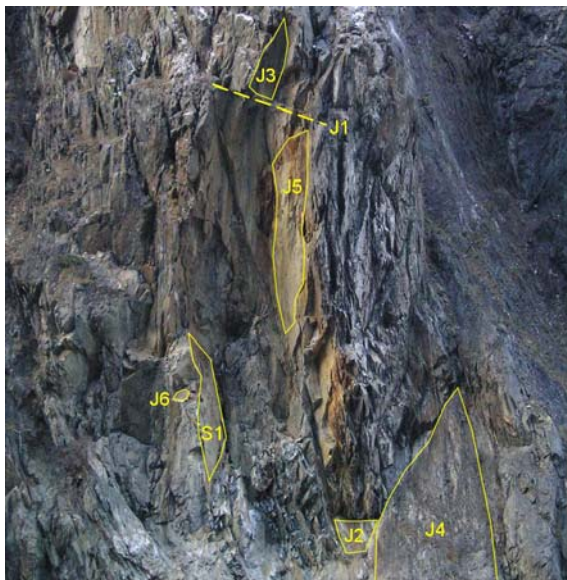


Système de surveillance Guardaval

En raison de légers défauts de fabrication, le feu rouge s'est allumé 2 ou 3 fois par erreur, mais part ça, ce système ne pose pas de problème particulier.

Suite à l'éboulement, une énorme pression économique s'est manifestée pour rouvrir la route. Grâce au système de surveillance, les techniciens en charge du site étaient suffisamment confiants pour procéder à sa réouverture. Il fallait ensuite réparer la galerie et évaluer le risque potentiel de nouvelles chutes de blocs ou d'éboulements importants. Pour ce faire, une analyse structurale et géomécanique a été entreprise.

#### Etude structurale :



#### Station n° 1 (centre galerie) :

Roche : gneiss et schistes cristallins

#### Discontinuités :

S1: 145/70

J1: 065/60

J2: 180/65

J3: 335/65

J4: 255/60

J5: 095/80

J6: 010/20

#### Dièdres principaux :

S1 – J2: 184/65

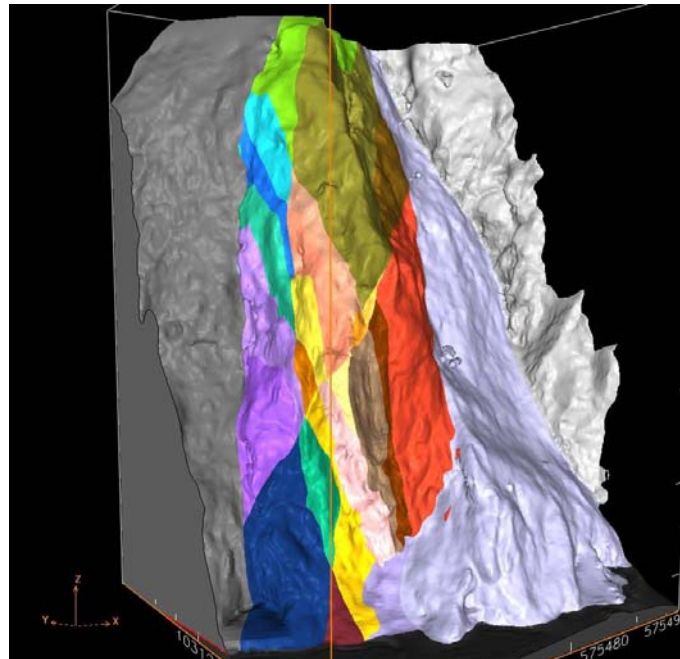
S1 – J4: 209/50

J2 – J4: 225/56

L'étude a mis en évidence divers plans de fracturation. Le stéréogramme (ci-dessous) montre que les blocs peuvent tomber vers le sud, sur la galerie. Elle a aussi montré la présence de dièdres qui permettent le décollement et/ou le basculement de blocs, avec un système plutôt en basculement (mais des discussions ont porté sur la question de savoir s'il ne s'agissait pas plutôt d'un glissement le long de la discontinuité J2, où a été propulsé le gros bloc de 100 m<sup>3</sup>).



L'intersection du volume avec ces différentes fractures selon une coupe horizontale met en évidence l'agencement structural de ces fractures (*diapo 20*). Pour ce genre de manip, il importe de bien contrôler l'extrapolation en minimisant l'écart avec la réalité de terrain. Ces traitements permettent de déterminer des 'blocs faillés' auxquels on donne des couleurs pour les visualiser (ci-contre) et pour lesquels on évalue les volumes en jeu.



Différents cas de figure ont été déterminés (*diapos 21 à 26*) depuis la chute de petits blocs (100 litres) jusqu'à l'effondrement du pilier dans son ensemble, en passant par la chute de blocs de taille moyenne (de l'ordre de 20 m<sup>3</sup>).

Pour évaluer la dangerosité d'un éboulement de grande ampleur (scénario I), on a analysé la forme des fractures en profondeur. Pour cela, on a enlevé la partie qui pourrait tomber afin de voir sur quoi elle repose. Les vues produites selon cette méthode illustrent les plans de glissements possibles avec l'intersection des fractures. Les géomécánicos en ont déduit que l'assise était bonne et le danger relativement faible. Le volume total des compartiments rocheux est évalué à 12 000 m<sup>3</sup>. Un autre scénario prenant en compte une rupture selon 7 fractures (scénario II) conduit à un volume total de 5500 m<sup>3</sup>.

Une simulation dynamique est en cours de réalisation (Iris Voyat) et permettra de comparer les résultats avec cette approche relativement classique pour déterminer la dangerosité.

#### Conclusions de l'étude structurale et géomécanique :

##### Eboulements majeurs (> 100 m<sup>3</sup>)

- Degré de risque : faible ;
- Solution : poursuite de la surveillance (monitoring) comme mesure de protection.

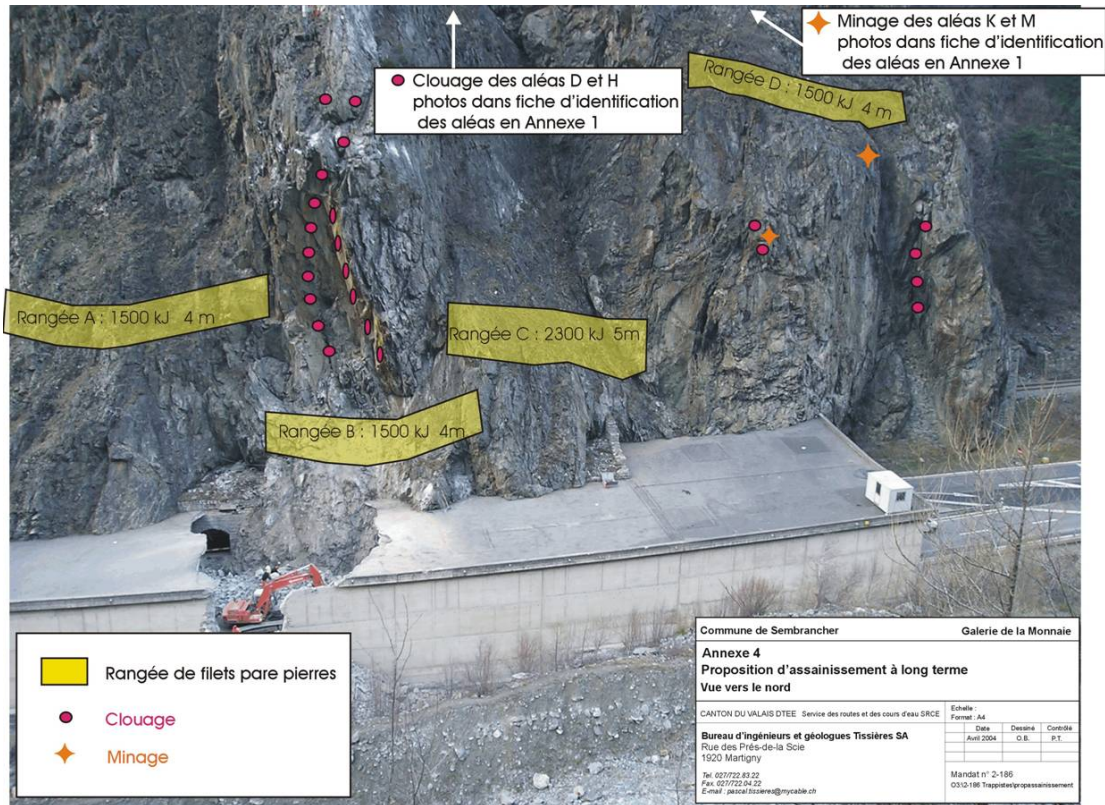
##### Chutes de blocs moyens (10 m<sup>3</sup> – 100 m<sup>3</sup>)

- Degré de risque : dangerosité moyenne sur la cicatrice d'arrachement ;
- Solution : stabilisation des blocs avec des ancrages.

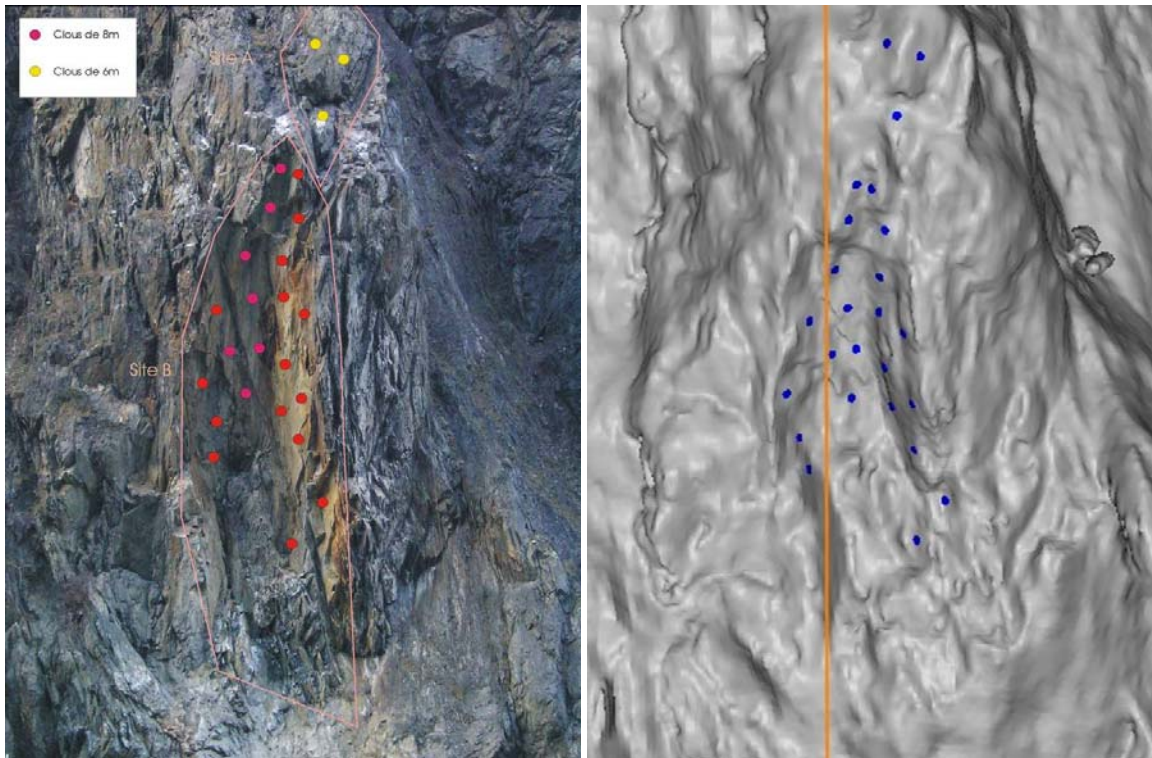
##### Chutes de petits blocs (< 10 m<sup>3</sup>)

- Degré de risque : dangerosité élevée à peu près partout ;
- Solution: purges en falaise, minages et pose de filets.

La photo ci-dessous présente un résumé des travaux entrepris sur cette paroi rocheuse : ancrages, nettoyage général et pose de filets.



Le principe de mise en place des ancrages consiste à retenir les compartiments dans les deux sens le plus perpendiculairement possible aux fractures (*diapo 29*). Pour simplifier l'analyse, les disques ont été 'posés' directement sur le modèle 3D, puis l'on est 'parti' perpendiculairement à la topographie sur 8 ou 10 m. L'orientation des ancrages a ensuite été corrigée en fonction des besoins pour obtenir un positionnement correct (figure ci-dessous).



Positionnement des ancrages sur le modèle 3D

L'intérêt majeur est d'obtenir directement les coordonnées, la profondeur, l'inclinaison et l'orientation des ancrages avant de les transmettre à l'entreprise qui faisait les forages (*diapos 31 à 35*).

La pose des ancrages (*diapo 36*) a été particulièrement difficile, notamment sur les parties en surplomb. Les éléments ont été amenés à l'aide d'un hélicoptère.

La galerie désormais protégée des chutes de blocs par des filets (*diapo 37*) a été refaite avec le dimensionnement initial, calculé pour protéger la route des avalanches et non des chutes de blocs, car pour la même énergie, le coût de réalisation d'une galerie est beaucoup plus important que celui des filets. De même, l'option de creuser un nouveau tunnel pour la route a été écartée. Il a été évalué comme 'raisonnable' d'intervenir de manière ponctuelle. Les techniciens espèrent qu'un événement comme celui de 2003 ne se reproduira pas, ou qu'ils seront capables de l'anticiper grâce au système de surveillance mis en place.

Cependant il convient de rester modeste face au risque et de prendre en compte le risque résiduel. Celui-ci relève de la responsabilité des personnes qui ont procédé aux choix des interventions réalisées.

#### **Discussion (12) – Technologies innovantes et surveillance des mouvements de terrain (1)**

**Elena Rabbi** (Geo data, Turin) : « Nous avons travaillé sur quelque chose de similaire en Italie et je voudrais connaître quelques détails. Quelles sont les dimensions de la paroi des Trappistes ? Quelle est la quantité de données relevées par le LIDAR ? Combien de familles de fractures avez-vous retenu ? ».

**R. Mayoraz** : « La paroi sur laquelle on a fait le relevé Laser Scan mesure environ 50m de haut. La niche d'arrachement mesure 25 à 30m de haut sur environ 10m de large. Environ 4,5 millions de points ont été relevés au Laser Scan, selon 3 angles de vue, puis un semi de points x, y, z a été reconstitué, à partir desquels un logiciel a permis de reconstituer une surface tridimensionnelle. Nous avons retenu 4 familles de fractures.

Notre démarche est très différente de l'approche 'RésoBlok', dans laquelle on ne retient qu'une seule famille à partir de laquelle on sort plusieurs fractures qui relèvent d'une interprétation du stéréogramme. Dans notre cas, chacune des fractures réelles observées a été introduite dans le modèle. On ignore des fractures qui existent certainement mais toutes les fractures prises en compte existent bel et bien sur le terrain.

**E. Rabbi** : « Le levé LIDAR s'est-il appuyé sur le relevé géostructural ? »

**R. Mayoraz** : « Oui. Pour déterminer les fractures qu'on allait retenir, on s'est basé sur les observations de terrain. En observant la surface 3D du modèle, on peut très bien mettre en évidence des structures avec l'ombrage, etc. ».

**E. Rabbi** : « Pour notre part, nous avons suivi à peu près la même méthode avec le LIDAR, et notre partenaire qui n'est pas expérimenté dans ce domaine nous a dit que le nombre de familles que nous avons retenues n'étaient pas représentatif de la paroi. Nous sommes donc en train de voir s'il est possible de sortir d'autres données du relevé LIDAR et du levé structural que nous avons effectué. La paroi que nous étudions mesure environ 1 km de long avec un maximum de 195m de haut. Nous avons produit environ 22 millions de points, puis reconstitué un modèle 3D et nous avons effectué une trentaine de profils structuraux. Mais le modèle n'a pas été jugé assez représentatif pour décrire la paroi et pour arriver à une évaluation du risque ».

**R. Mayoraz** : « La surface que je vous ai montrée n'est pas idéale car elle a tendance à arrondir les angles. Il faut donc avoir un petit peu l'habitude de la regarder pour ne rien oublier. Mais quand on dispose d'une bonne observation de terrain avec plusieurs photos, on peut toujours comparer le modèle avec les photos. On pourrait aussi faire de l'image solide, qui donne de très bons résultats. A mon avis, faire des populations de fractures où chacune d'entre elles est bien déterminée et bien

positionnée a beaucoup plus de sens que de générer un nombre déterminé de manière aléatoire de fractures avec une inclinaison donnée. Je suis un peu étonné que votre partenaire ne croie pas en cette approche parce qu'à mon avis, c'est celle qui est la plus proche de la réalité de terrain.

**Léandro Bornaz** (Politecnico de Turin) : « Je pense que plus que le nombre de points, c'est la précision du Laser Scan et la densité de points sur la falaise qui sont importants, parce que ce sont les paramètres important pour comprendre les détails.

Avec un modèle à 4 millions de points et un autre à 2 millions de points, on a à la fin pratiquement 1 point par centimètre ».

**E. Rabbi** : « Nous on a des falaises de grande ampleur et on ne fait des mesures tous les centimètres que sur des surfaces échantillons. A ce niveau là on n'a fait qu'un relevé partiel de la paroi ».

**R. Mayoraz** : « Iris Voyat a travaillé sur des falaises de plus grande ampleur et ça marche très bien aussi ».

**I. Voyat** : « Nous avons fait ensemble le travail dont parle Elena avec le Politecnico de Turin. Nous avons ensuite appliqué le modèle solide avec L. Bornaz. Les familles de fractures qui en ont été sorties étaient tout à fait comparables avec les familles relevées sur le site. C'est un autre code de calcul que Léandro a mis au point, mais il repose sur un concept similaire ».

**R. Mayoraz** : « Concernant la représentativité des données sur les fractures observées dans un tel contexte géologique, avec des gneiss très schisteux, on ne peut pas prendre en compte une densité de fractures donnée, les 'scan lines' ne marchent jamais... On observe de fortes concentrations de fractures dans certaines zones et pas dans d'autres. Il est donc préférable de s'en tenir aux observations de terrain et ne pas commencer à inventer des fractures là où l'on pense qu'il pourrait y en avoir. Il y en a déjà bien assez sur le terrain. La situation peut être différente dans d'autres types de lithologie, mais dans ce cas, on avait une très bonne observation de terrain et c'était bien suffisant ».

**C. Delacourt** : « Quand on commence à travailler avec des données de type LIDAR, qui sont échantillonnées de façon irrégulière de par la topographie, à partir du moment où l'on représente les données par interpolation et qu'on essaie de remonter à des objets discontinus, on est toujours confronté au problème de savoir si l'interpolation utilisée est la bonne. On sait qu'il y a des zones d'ombre. Vous avez effectué le relevé à partir de 3 points de prise de vue, mais ça n'empêche pas qu'il y ait encore des zones d'ombre.

Il n'est pas toujours évident de travailler sur des données LIDAR avec des données qui sont interpolées sans connaître la densité des mesures. Actuellement, on bénéficie d'un certain nombre de techniques qui viennent de l'architecture (image solide...) et qui justement ne travaillent pas sur des données interpolées. A mon avis, ces approches sont intéressantes pour travailler sur les familles de fractures ».

**I. Voyat** : « Pour répondre à Raphaël, on connaît le problème de la variabilité du degré de fracturation, avec des zones beaucoup plus fracturées que d'autres comme on peut l'observer par exemple dans des carrières de marbre. Il est tout de même possible de modéliser cette variabilité. je trouve qu'il est quand même important d'avoir des outils qui permettent d'insérer dans le modèle les fractures les plus importantes d'une façon déterministe, en cherchant des outils pour comprendre leur répartition en profondeur, par exemple avec le radar ou avec des forages, en tout cas si possible avec des observations, et de modéliser la génération stochastique des familles. L'important est de bien caler dans un modèle à blocs la distance entre familles de fractures, même s'il est vrai qu'on ne peut pas simuler des fractures avec des distances centimétriques ».

**Franck Compagnon** : « Juste une remarque concernant Christophe Delacourt : je voudrais des précisions sur la synthèse qui a été faite à l'échelle de la vallée de la Tinée et de la vallée de l'Ubaye, où un certain nombre de glissements de terrain ont été identifiés. Sur quelle période ce travail a-t-il été fait ? Je suis surpris parce qu'il y a d'autres glissements dans cette zone, qui n'ont pas été signalés ».

**C. Delacourt :** « L'étude que j'ai montré repose uniquement sur 2 images SPOT qui ont été acquises à 1 an d'intervalle. Typiquement, avec la résolution des images SPOT, on n'arrive à détecter qu'une certaine gamme de glissements de terrain. Les 5 glissements qu'on a détectés ont globalement des vitesses journalières d'ordre centimétrique. Evidemment, on est passé au travers de ceux qui sont beaucoup plus lents ou beaucoup plus rapides ».

**F. Compagnon :** « Je parle de glissements existants dans cette zone avec des vitesses de l'ordre du cm/jour également ».

**C. Delacourt :** « Dans ce cas, avec des vitesses de l'ordre du cm/jour avec un mouvement continu à l'échelle annuelle, vu qu'on a des images avec une résolution de 2,5m, si le glissement est supérieur à 20m, on doit le détecter. Dans cette étude, on s'est intéressé aux mouvements de terrain de très grande ampleur. Nous n'avons pas vérifié dans le détail s'il y avait d'autres glissements que les 5 sur lesquels nous avons focalisé ».

**Luca Pitet :** « Une question pour F. Rinaudo et C. Delacourt : selon vous, quelles sont les technologies innovantes qui vont le plus évoluer dans le futur pour la surveillance des zones de montagne ? ».

**C. Delacourt :** « Si l'on se réfère au dernier congrès sur la question, les réflecteurs permanents ont l'air d'avoir le vent en poupe. Malheureusement, pour les mouvements gravitaires qui nous intéressent en contexte montagneux, il n'y a pas eu de résultat flagrant et évident. Cette technique est à mon avis extrêmement puissante puisqu'on mesure des mouvements de l'ordre du mm ou du dixième de mm. ça marche extrêmement bien sur les villes ou sur les zones montagneuses au-dessus de la limite de végétation. L'effort à faire est de tester ce type de méthodes dans des contextes un peu plus difficiles. Les dernières études montrent que toutes ces techniques marchent de façon ponctuelle dans les cas les plus faciles. Actuellement, on est en train de travailler sur des cas un peu plus complexes, avec des pentes plus importantes, avec des cinématiques qui sont différentes, des mouvements en blocs plutôt que des mouvements généralisés.

Chaque technique a montré qu'elle était utilisable et très utile dans un contexte particulier et l'on est en train de les tester pour voir quelles sont les limites ultimes de ces techniques dans d'autres contextes. Une des applications possibles est d'utiliser le LIDAR en combinant son information altimétrique en faisant juste du différentiel avec l'information propre de l'image, mais cette technique est très coûteuse. Un des défis va donc être d'appliquer plusieurs techniques sur un même site et de trouver la technique adéquate sur un site particulier. Actuellement, on ne peut pas dire quelle est la meilleure technique de télédétection de manière générale. On n'en est pas encore à une technique de surveillance efficace et opérationnelle ».

**F. Rinaudo :** « La conclusion de Christophe est correcte : pas de méthode unique qui puisse sortir du lot et servir de manière générale. C'est un ensemble de techniques associées qu'il faut utiliser...La technique SAR dans certaines conditions très particulières peut servir pour déclencher une alarme. On ne peut pas donner d'élément quantitatif : Avec une résolution de 25m on ne peut pas faire, avec une résolution de 10 × 10m à, on ne sait pas où se trouve le point central et on n'a pas de mesures qui ensuite puissent servir.

Si l'on a besoin d'une connaissance de la géométrie, on peut utiliser la technique de la photogrammétrie ou du LIDAR, ou un mélange des deux, ou encore avec des prises de vue par hélicoptère. On peut prendre plusieurs images, les stacker (addition) et en faire ce qu'on veut. Puisque cette technique peut être utilisée pour d'autres applications, on l'amortit rapidement. Ça peut être l'élément principal de tous ces systèmes de mesure intégrée. C'est une bonne idée de combiner les techniques, mais il importe de se concentrer sur les marges d'erreur

Pour les applications qui nous intéressent, l'aspect le plus important n'est pas en soi la résolution ni la précision mais la tolérance, c'est-à-dire la marge d'erreur. Comme le disait Christophe en parlant des images satellitaires, avec une résolution d'1m, la précision est d'1,20-1,50m (1-1,5 pixels) et la tolérance est quant à elle de 4,5m. Ce que les utilisateurs appellent la précision, c'est ce que nous appelons la tolérance d'un point de vue statistique. De ce point de vue, les techniques métriques

risquent d'être complètement en dehors de ce qu'on recherche parce qu'elles ont des marges d'erreur de plusieurs mètres. Il faut aller vers des techniques décimétriques qui vont donner des marges d'erreur de 30 cm, nécessaire pour des applications géotechniques. Après ça, on a des techniques millimétriques qui sont du ressort du suivi en continu ou de la surveillance et qui, comme l'a déjà dit Raphaël Mayoraz. Sur tous ces systèmes de mesure, il faut donc faire attention à ce qu'on dit.

Une autre question est de savoir si telle ou telle donnée manque, est-ce que ma conclusion tient toujours ? Par exemple, on peut élaborer les plus belles théories mais si les données sont faussées, la théorie s'effondre. »

**C. Delacourt :** « Si l'on veut développer des systèmes de surveillance, il apparaît clairement que les systèmes optiques (à capteur passif) sont toujours limités par la couverture nuageuse et le brouillard. Si l'on souhaite disposer d'un système de surveillance utilisable quelles que soient les conditions météo, il vaut mieux s'orienter vers un système comme le radar (capteur actif) qui lui, fonctionne de jour comme de nuit, par tout type de temps ».

**I. Voyat :** « J'ai deux questions : j'ai entendu parler d'une technique de mesure LASER par hélicoptère pour laquelle il n'est pas besoin de fixer le LASER à l'hélicoptère, par exemple pour la détection des parois rocheuses. Quelle est la tolérance de ce genre de mesures ? Autre question : Je suis d'accord sur le fait qu'une chose est de relever, l'autre de surveiller. Dans le cas d'un laser installé sur un hélicoptère, est-ce que c'est vraiment un problème de retrouver les points fixes ? Avec quelle tolérance peut-on superposer deux MNT pris à des moments différents ? Quels résultats peut-on obtenir ? ».

**F. Rinaudo :** « Pour la 1<sup>ère</sup> question, ça suppose d'utiliser les nouveaux GPS cinématiques. C'est encore un système expérimental qui est développé en Suisse à l'Université de Zürich. La tolérance semble principalement liée à celle des GPS cinématiques et l'on arrive à une tolérance d'environ 10 cm. Avec les nouveaux systèmes en cours de développement comme le GPS 'virtuel' sur lequel on travaille actuellement, on arrivera à améliorer encore un peu cette précision. Dans le futur, le système Galileo va permettre d'abaisser la précision absolue au-dessous des 10-15cm actuels. La précision relative entre des points qui sont reconnus régulièrement va atteindre quelques centimètres. Pour ce qui concerne la 2<sup>ème</sup> question, si l'on effectue la soustraction entre deux MNT d'une précision de 10 cm, du point de vue théorique, on somme les variances et on a une précision finale de 'racine de 2'  $\times$  10 cm. Assembler revient toujours à dégrader la précision.

Il faut dire que ce raisonnement porte sur les valeurs absolues. Pour ce qui est des valeurs relatives basées sur des points fixes qui par chance ne relèvent pas de nous topographes mais de vous, géotechniciens, c'est vous qui nous dites à quels points nous fier. C'est la nécessité qu'on a de travailler ensemble. Nous avons l'œil pour identifier les points fixes par rapport à des points mobiles.

Ce que je constate, c'est que le choix des points fixes sur lesquels on se base pour assembler les MNT est plus du ressort des géotechniciens que des topographes. Ce sont les géotechniciens et les géologues qui peuvent nous dire 'ce qui bouge et ce qui ne bouge pas'.

Puisque les mesures ne sont jamais précises, on peut toujours dire que 'tout bouge'. Si physiquement vous me dites 'ce point ne bouge pas', alors je fixe la statistique de mon modèle et je peux faire mon MNT. Avec les modèles statistiques sur les écarts locaux mesurés basés sur des points fixes bien identifiés, les erreurs relatives descendent jusqu'à quelques cm... »

**Pascal Perrotin :** « Sur la galerie des Trappistes : Quelle est la méthode de dimensionnement qui a été utilisées. Quelles sont les dimensions de cet ouvrage et l'épaisseur de la dalle de béton ? ».

**J.-D. Rouiller :** « Ce qu'il faut savoir, c'est que ce n'était pas une galerie pare pierres mais une galerie pare avalanche. Périodiquement, une avalanche descendait du couloir sur le versant en face et terminait sa course sur la falaise et sur la route. C'est le mur latéral de cette galerie qui est renforcé contre des sollicitations avalancheuses, mais pas la dalle qui n'est là que pour protéger les véhicules de la pluie quand ils sont dans la galerie. Il y a donc 40cm de béton légèrement armé mais qui n'est pas une protection contre une force quelconque... ».