1. Poche d'eau du glacier de Tête Rousse (Massif du Mont Blanc) : étude de l'aléa et caractérisation du risque – Christian VINCENT (CNRS/LGGE)

Les études scientifiques menées depuis 2007 sur le glacier de Tête Rousse ont été coordonnées par Christian Vincent. Elles ont nécessité les compétences scientifiques et techniques de trois laboratoires de recherche grenoblois : le Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE), le Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie en Environnement[1] (LTHE) et le Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique[2] (LGIT).

Les études menées antérieurement sur ce glacier remontent à « la catastrophe de Saint-Gervais » survenue dans la nuit du 11 au 12 juillet 1892 [cf. *présentation de P. Chappet, p. 31*], où une gigantesque lave torrentielle a dévasté le village et les thermes de Saint-Gervais et provoqué 175 morts. C'est l'une des catastrophes d'origine glaciaire les plus meurtrières dans le monde.

La lave torrentielle à l'origine de cette catastrophe a été déclenchée par la rupture d'une poche d'eau dans le glacier de Tête Rousse, un petit glacier (< 1 km²) situé à 3200 m d'altitude sur la voie normale d'ascension du Mont-Blanc, au pied de l'Aiguille du Goûter. Sur ce glacier, les ingénieurs des Eaux et Forêts de la vallée de Chamonix avaient découvert deux cavités : l'une au front du glacier et l'autre dans sa partie médiane (Fig. 1).

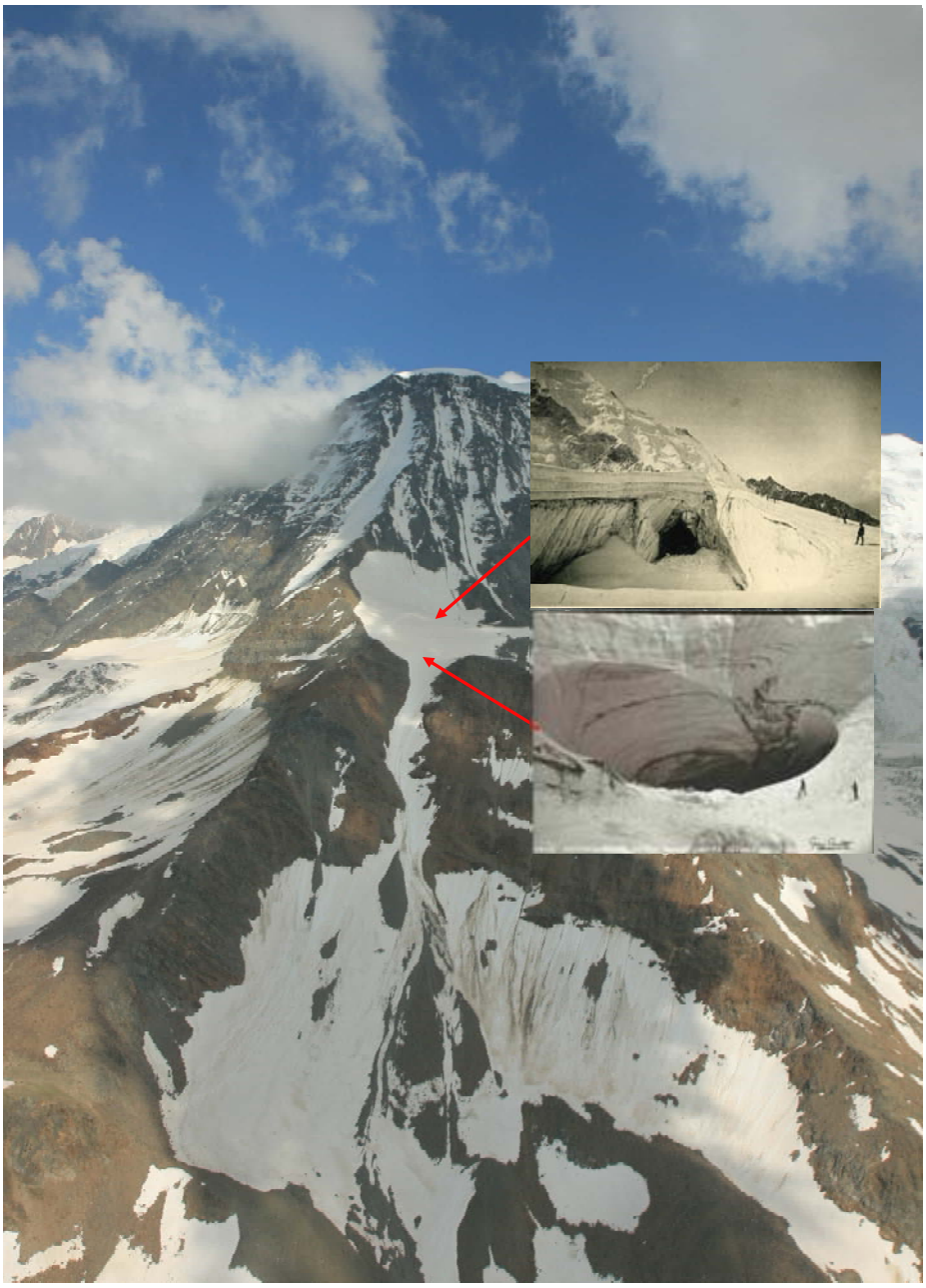

Fig. 1. Vue d'ensemble du glacier de Tête Rousse (cliché : Bruno Jourdain) et localisation des deux cavités observées à la surface du glacier suite à la catastrophe de juillet 1882 (clichés : A. Couttet)

[1] A. Legchenko et M. Descloitres
[2] S. Garambois. LGIT : désormais Institut des Sciences de la Terre (ISTerre)

Ces deux cavités, remplies d'eau avant la catastrophe, étaient reliées par un conduit intraglaciaire (Fig. 2). Sous l'effet de la pression d'eau, le bouchon de glace au front a cédé, provoquant la vidange brutale d'environ 200 000 m^3 d'eau et de glace. À Saint-Gervais, 2000 m plus bas, la lave torrentielle a déposé un volume de sédiment d'environ 1 million de m^3.

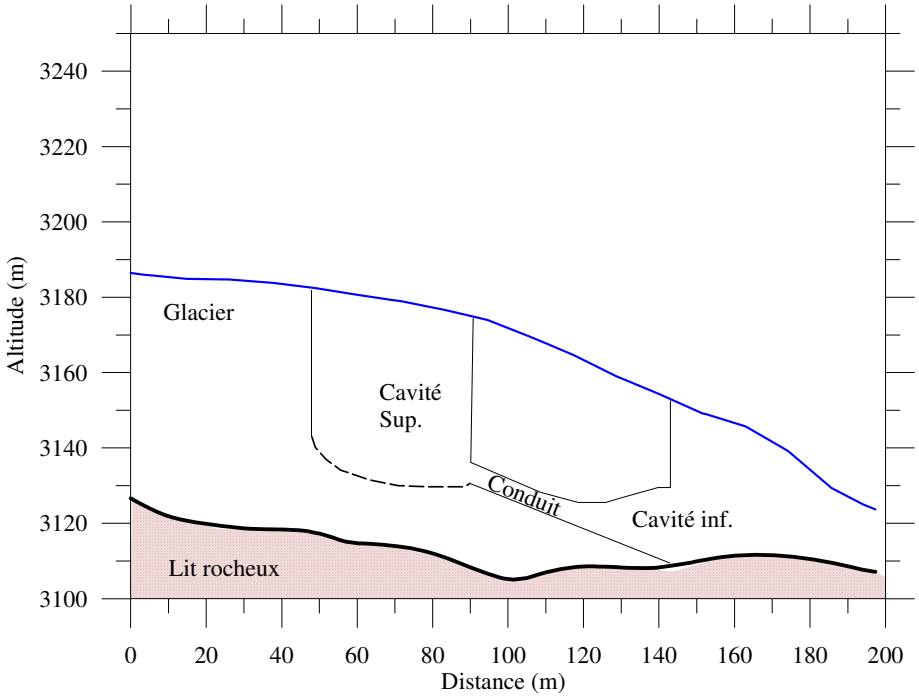

Fig. 2. Coupe longitudinale du glacier de Tête Rousse sur son lit rocheux et représentation schématique des deux cavités

De nombreuses investigations ont été menées suite à cette catastrophe dans le but de mieux comprendre et de prévenir l'accumulation d'eau à l'intérieur du glacier. Deux galeries de reconnaissance ont été creusées en 1899 et en 1904 par les ingénieurs des Eaux et Forêts (Fig. 3). La première galerie n'a pas été maintenue, son entrée ayant complètement disparu sous des éboulements rocheux. Par contre, la galerie de 1904 a été entretenue chaque année jusqu'à aujourd'hui par le service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM).

En janvier 2007, le directeur du service RTM 74 (Nicolas Karr) a demandé au LGGE de conduire une étude sur le glacier, avec pour objectif de répondre à deux questions principales :

- La galerie de 1904 dont l'entretien régulier coûte cher (et dont il fallait refaire le soutènement) présente-t-elle encore une utilité pour prévenir la formation d'une nouvelle poche d'eau ?
- Le glacier de Tête Rousse est-t-il susceptible de produire une nouvelle vidange catastrophique ?

Fig. 3. Galeries creusées en 1899 et 1904

Entre 2007 et 2008, les scientifiques ont conduit des études glaciologiques combinant des mesures topographiques de la surface du glacier et de son lit rocheux, des mesures de température, ainsi que des mesures de bilan de masse, dans le but de comprendre le fonctionnement du glacier. Ces études ont permis de livrer les conclusions suivantes :

- La galerie de 1904 est probablement inutile pour prévenir de la formation d'une nouvelle poche d'eau en raison de son emplacement par rapport au lit rocheux puisqu'elle débouche trop haut par rapport au talweg, et que la probabilité qu'une poche d'eau se forme à cet endroit est très faible (Fig. 4).

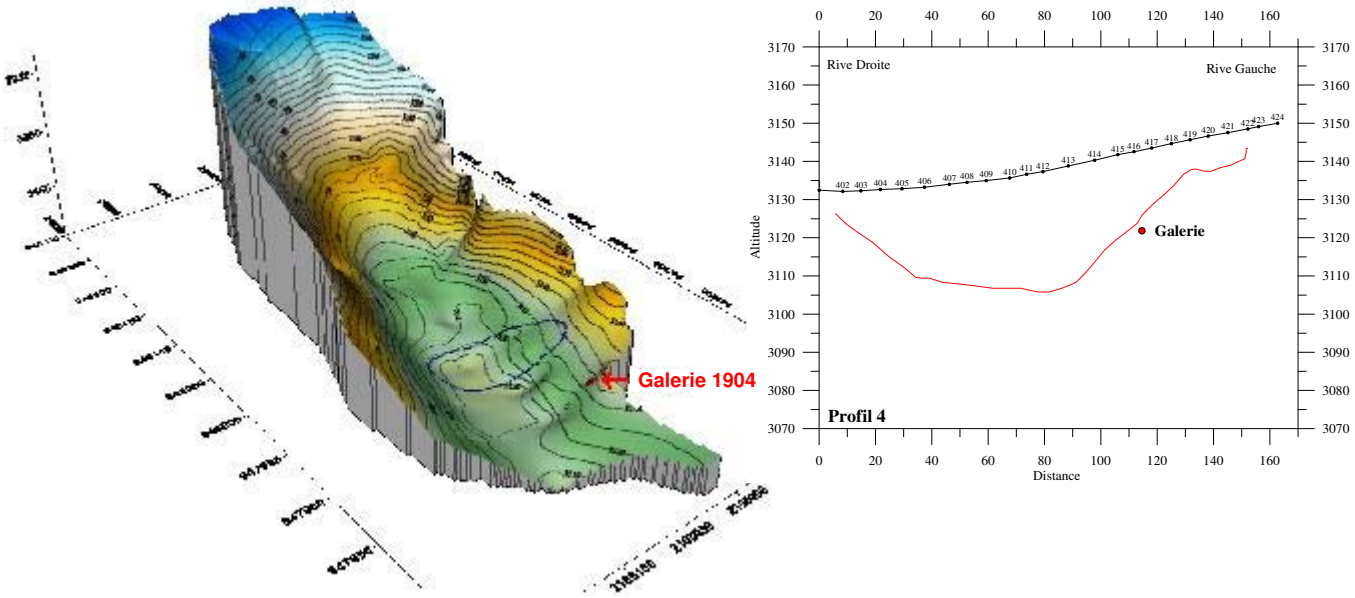

Fig. 4. Emplacement du débouché de la galerie creusée en 1904 sur le lit rocheux

- Sur les images des échos radar effectuées par le LGIT pour imager la topographie du lit rocheux, une zone d'anomalie a été détectée dans la partie médiane du glacier (Fig. 5). Différentes interprétations étaient possible pour expliquer ces nombreuses réflexions radar : (i) débris rocheux insérés dans la glace, (ii) transition entre glace froide et glace tempérée ou, (iii) présence d'eau liquide.

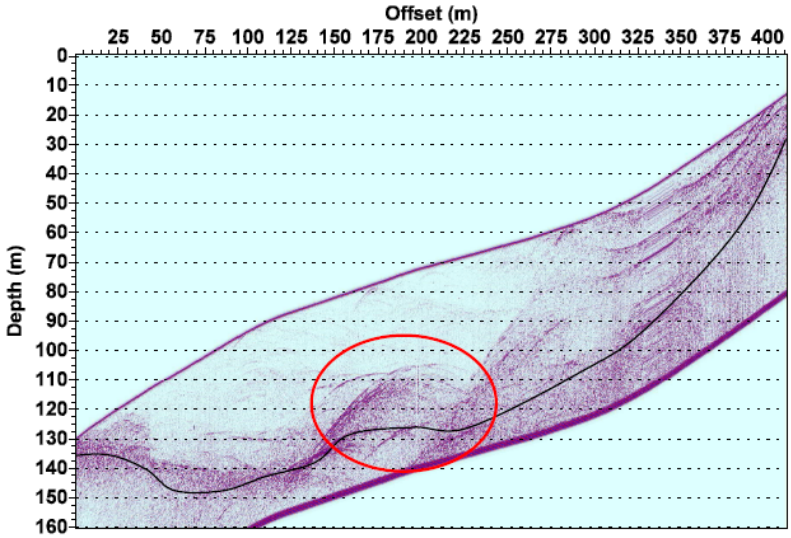

Fig. 5. Profil longitudinal : surface du glacier (trait violet), lit rocheux (trait noir) et échos radar (zones grisées)

Ces résultats ont été présentés au conseil municipal de Saint-Gervais le 4 août 2008. Parmi les recommandations faites par Christian Vincent, l'une consistait à faire réaliser des forages pour élucider cette zone d'anomalie. Mais jusqu'en septembre 2009, les scientifiques ne sont pas parvenus à obtenir de financement pour cette nouvelle étude. Un financement a finalement été trouvé via l'Université Joseph Fourier (pôle Tunes), pour faire une nouvelle prospection géophysique par la méthode de résonance magnétique des protons (RMP) en collaboration avec le LTHE.

Cette méthode permet de quantifier la concentration en eau dans le sous-sol. Elle est habituellement utilisée par les hydrologues pour détecter la présence d'eau dans le sous-sol ; ce cas était pour eux l'occasion de la tester sur un glacier, ce qui avait été très rarement fait auparavant. Le résultat de cette prospection (Fig. 6) a permis de conclure à la présence d'un volume d'eau significatif à l'intérieur du glacier, évalué à 65 000 m^3. À partir de ce moment là, « on a commencé à s'inquiéter ».

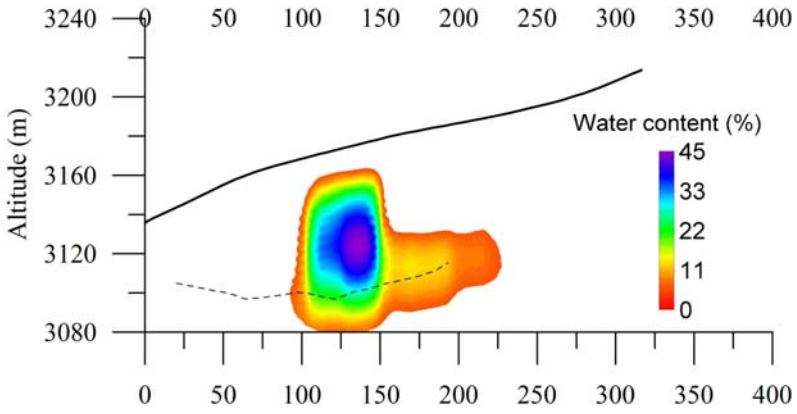

Fig. 6. Concentration en eau dans le glacier (surface en trait noir) d'après la méthode RMP

Ce résultat surprenant et inquiétant a fait l'objet d'un rapport à la préfecture de Haute-Savoie le 4 mars 2010, puis a été présenté lors d'une réunion à la préfecture le 24 mars 2010. Des propositions d'investigations supplémentaires – à effectuer avant août 2010 – ont été faites :

- Campagnes de terrain RMP et radar pour préciser la localisation du volume d'eau liquide. En effet, la méthode RMP n'avait pas permis pas de connaître la répartition exacte de l'eau ni de savoir s'il y avait une seule ou plusieurs cavités, et de cette information dépendait complètement le risque associé ;
- Réaliser des forages pour vérifier directement la présence d'eau à la base du glacier.

Ces campagnes de terrain ont été effectuées entre mai et juillet 2010. Le glacier a été quadrillé par des mesures radar effectuées selon des profils transversaux et longitudinaux (Fig. 7). Ces mesures ont confirmé la présence de l'anomalie révélant la présence d'eau au centre du glacier (Fig. 8).

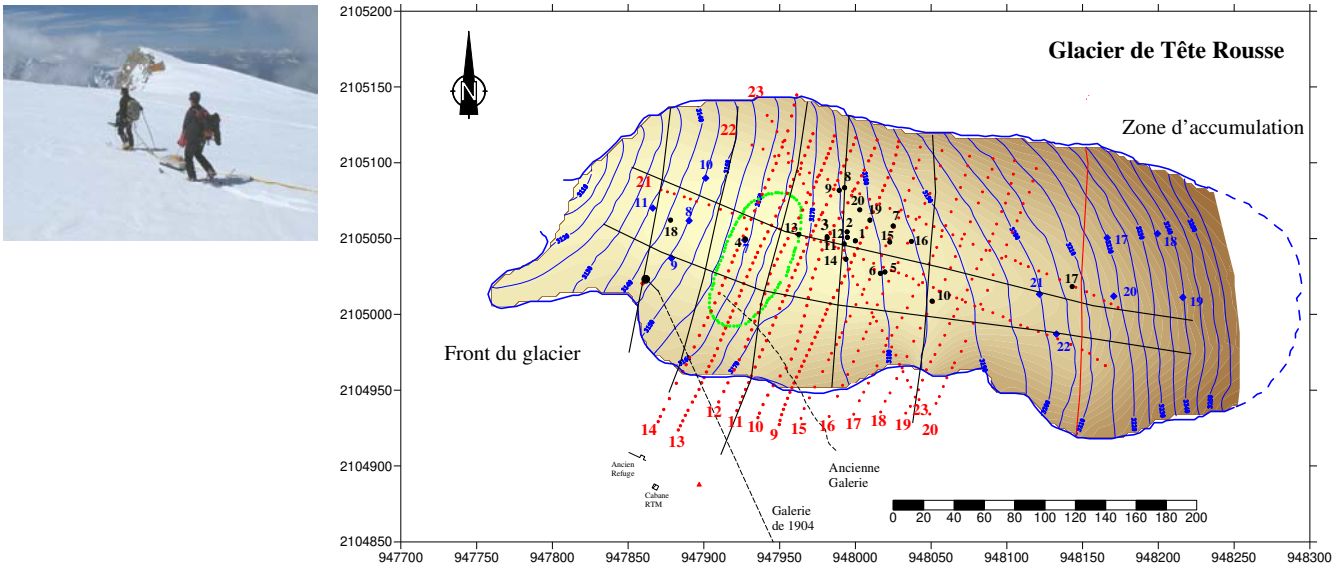

Fig. 7. Localisation des mesures radar de mai 2010 (points rouges) et des cavités observées en 1882 (en vert)

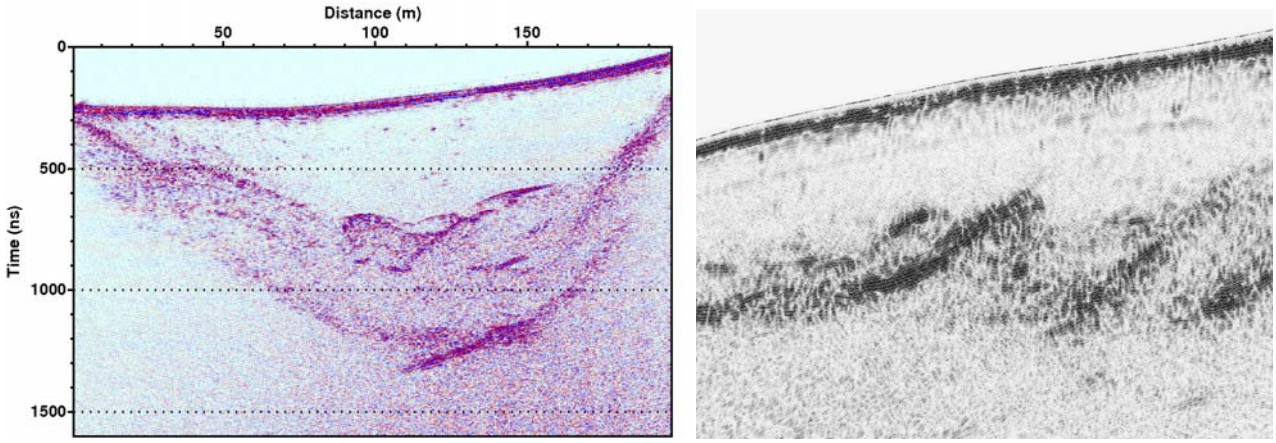

Fig. 8. Anomalies radar mesurées en mai 2010 sur des profils transversal (à gauche) et longitudinal (à droite)

Une vingtaine de forages ont été réalisés par la suite à l'aide d'une machine à forer fonctionnant à l'eau chaude. Cette machine a dû être héliportée en raison de son poids de l'ordre d'une tonne. Ces forages ont permis d'atteindre la profondeur maximale de 76 m (épaisseur de glace observée au centre du glacier). Différents capteurs ont été descendus dans ces forages : une caméra vidéo pour mettre en évidence une éventuelle cavité, des capteurs de pression et des capteurs thermiques pour mesurer la température de la glace.

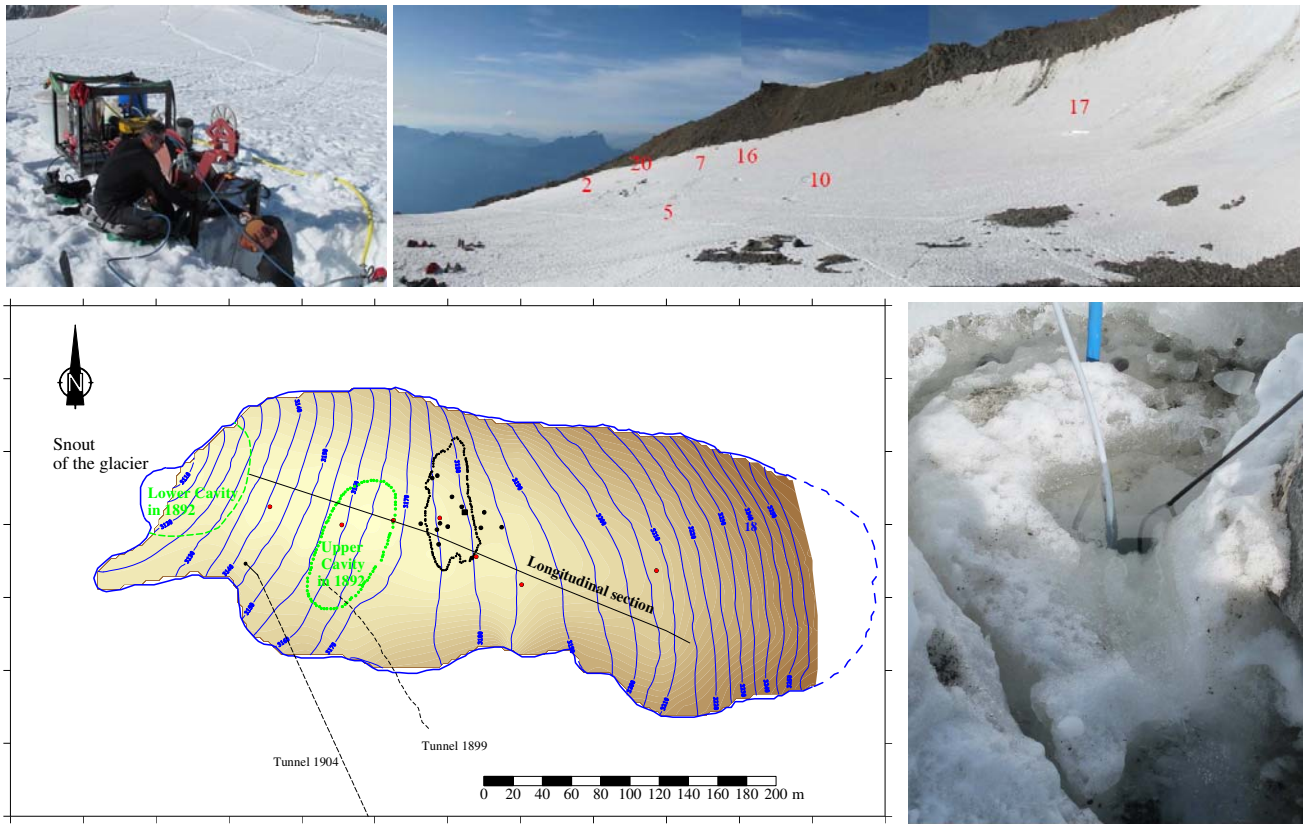

Fig. 9. Forages réalisés entre le 29 juin et le 8 juillet 2010 (points noirs sur la carte), cavités observées en 1882 (en vert) et nouvelle cavité détectée (trait noir)

Une nouvelle cavité a été détectée (cartographiée sur la Fig. 9). De l'eau a été trouvée dans 6 des forages [*cf. vidéo montrée pendant la conférence*]. La hauteur de la cavité au-dessus du lit rocheux a été mesurée dans chacun de ces forages (Fig. 10). Cette eau refoulait en surface sur certains des forages, indiquant une pression importante, supérieure au poids de la colonne de glace, ce qui montrait qu'on était dans une situation à risque et qu'on pouvait s'attendre à une vidange brutale.

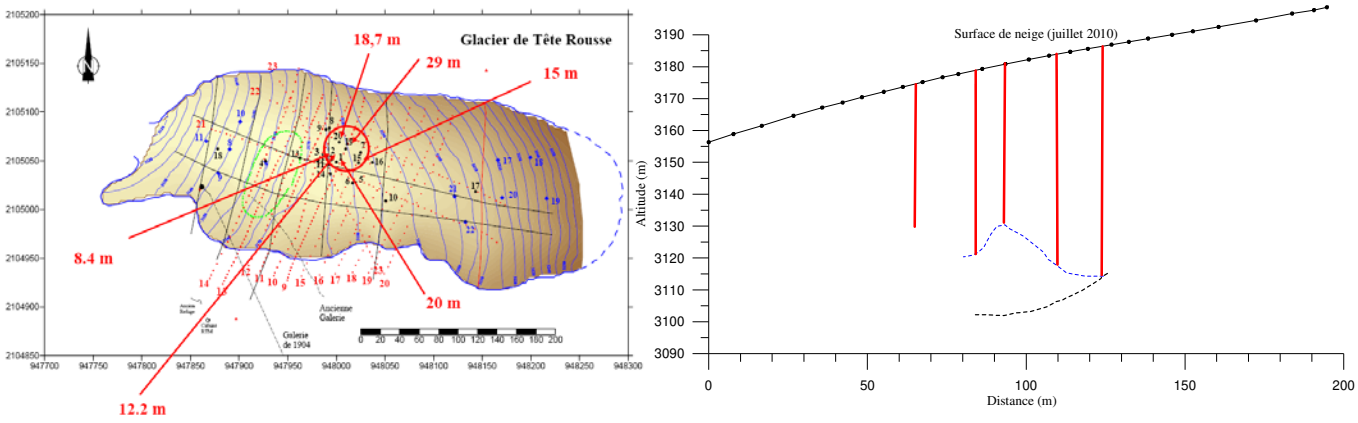

Fig. 10. Hauteurs de la cavité mesurée dans les forages au-dessus de la cavité détectée en juillet 2010

Ces nouveaux résultats ont été immédiatement consignés dans un rapport remis à la préfecture puis présentés aux autorités publiques le 13 juillet 2010. Sur proposition des scientifiques, il a alors été décidé de vidanger la cavité aussi vite possible. Cette décision a été motivée par la présence de 3000 personnes menacées dans la vallée en contrebas.

La cavité a été drainée entre août et octobre 2010 (Fig. 11). Pendant ces travaux [*cf. présentation du RTM, p. 16*], un système d'alerte a été mis en place pour permettre d'alerter la population des villages situés en aval en cas de vidange brutale de la cavité [*cf. présentation du SIDPC, p. 42*].

Fig. 11. Travaux de vidange de la poche d'eau du glacier de Tête Rousse pendant l'été 2010

Les scientifiques sont intervenus à nouveau en septembre 2010 pour répondre à la question d'un possible risque d'effondrement de la cavité pendant les travaux de vidange en raison de la diminution de la pression d'eau et lorsque la cavité serait complètement vidée. « À ce moment là on a dû faire une étude un petit peu en urgence… ».

Des mesures sonar ont été réalisées par une entreprise privée le 1er septembre pour mesurer la géométrie de la cavité, à laquelle le risque d'effondrement était totalement lié. L'image 3D qui en résulte (Fig. 26, *p. 24*) montre que la cavité présentait une hauteur de l'ordre de 30 m et une forme convexe, en amphithéâtre, « pas du tout sympathique au niveau mécanique… ».

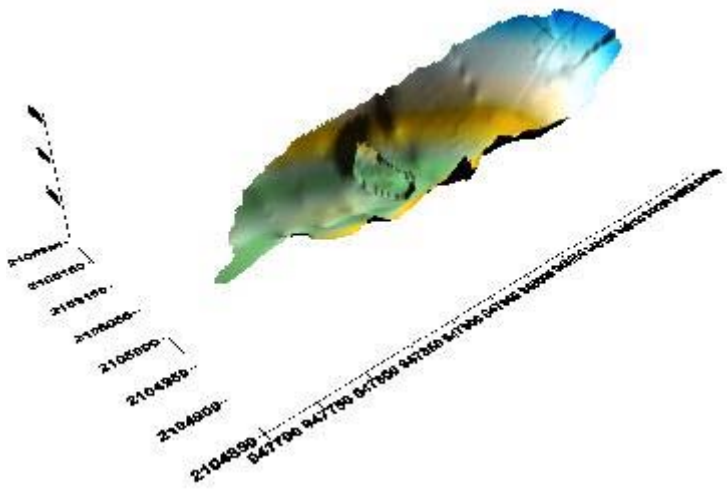

Fig. 12. Image 3D de la géométrie de la cavité obtenue par mesures sonar par rapport à celle du lit rocheux

À partir de cette géométrie (Fig. 12), les collègues mécaniciens du LGGE ont utilisé un modèle d'écoulement glaciaire qui permet de calculer les contraintes mécaniques dans la glace pour analyser la résistance de la voûte avec une cavité vide. Le résultat de cette modélisation montrait des contraintes de traction très proches de la valeur de la résistance mécanique de la glace. On se trouvait donc dans une situation préoccupante.
Cette étude a été menée en quelques jours, « c'était la grosse difficulté, puisqu'on a dû arrêter les travaux de pompage le temps de faire les mesures sonar et cette étude mécanique, avant de reprendre les travaux ».

La conclusion de cette étude était que : « le risque d'effondrement du toit de la cavité ou d'une partie du toit de la cavité, en cours de vidange, est faible mais non nul. ». Ces résultats ont été exposés lors d'une réunion à la mairie de Saint-Gervais le 8 septembre. Plusieurs mesures de précaution supplémentaires ont alors été prises, notamment concernant le système d'alerte, mais aussi sur le glacier où il a été décidé :

- de mesurer le mouvement d'affaissement de la surface du glacier, qui constituait un indice sur le risque d'effondrement. En effet, il avait été calculé que les vitesses verticales d'affaissement dues à la vidange de la cavité ne devaient pas dépasser 1,6 cm/jour, valeur limite à partir de laquelle il faudrait commencer à s'inquiéter. Des mesures supplémentaires de topographie de surface ont donc été mises en place pour mesurer l'affaissement du glacier de façon très fine (cf. Fig. 25) ;
- d'observer visuellement ce qui se passait à la surface pour repérer des fissurations.

Les travaux de vidange se sont terminés mi-octobre 2010. Suite à la vidange, des personnes sont descendues dans un trou de forage et ont fait des photographies qui ont confirmé l'importance de la cavité (Fig.13).

Fig. 13. Descente dans la cavité suite à la vidange (cliché : Pascal Tournaire)

Le danger a été écarté, mais momentanément, et pour le futur plusieurs questions se posent aux scientifiques mais aussi aux responsables de la gestion opérationnelle du risque, parmi lesquelles :

- Quelle est la cause de l'accumulation d'eau à l'intérieur du glacier ?
- Est-ce que la poche d'eau intraglaciaire va se former à nouveau ?

Les scientifiques peinent pour l'instant à répondre à toutes les questions qui se posent sur ce glacier et sur la formation de cette poche d'eau, excepté pour la première question : dans plusieurs des forages ont été installés des capteurs de température, tous les 5 à 10 m de profondeur, qui se sont montrés extrêmement utiles pour l'interprétation du régime thermique du glacier de Tête Rousse (Fig. 14) : les températures mesurées au front du glacier sont inférieures à -2°C (glace froide), alors qu'elles sont proches de 0°C au niveau de la cavité dans la partie médiane du glacier (glace tempérée) ; elles montrent également des conditions proches de la glace tempérée dans la partie supérieure du glacier.

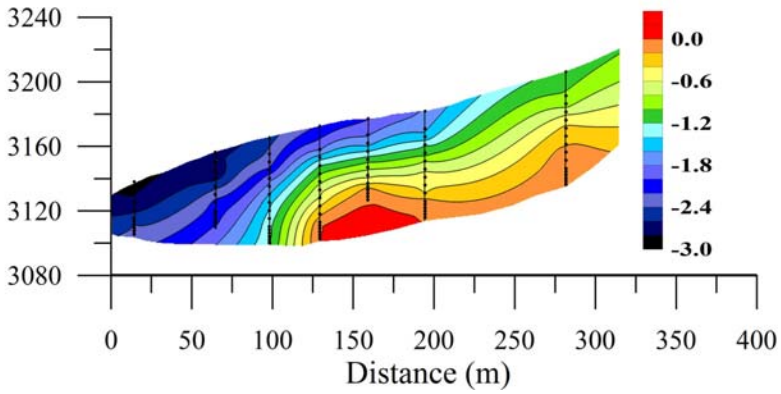

Fig. 14. Coupe longitudinale du glacier et échelle des températures de la glace

Ces observations permettent de donner une explication de la rétention de l'eau au milieu du glacier. L'eau de fonte en provenance de la surface s'infiltre dans le névé, puis dans la glace à l'amont du glacier, où celui-ci est proche des conditions tempérées. L'eau circule ensuite vers l'aval à la surface du lit rocheux dans la partie médiane du glacier, constituée de glace tempérée, et se retrouve ensuite piégée à l'arrière de la glace froide dans la partie avale du glacier, la glace froide ayant la particularité de ne pas laisser passer l'eau liquide du fait de son adhérence au lit rocheux.

La question suivante est de comprendre pourquoi le glacier présente un tel régime thermique [*cette question est abordée dans la discussion qui suit*].

Conclusions :

- La détection de cette cavité sous-glaciaire remplie d'eau constitue une première mondiale dans un glacier de montagne (il existe des cas en Antarctique où l'on a détecté des « lacs » sous-glaciaires immenses avec des méthodes de prospection sismique).
- L'accumulation de l'eau est ici d'origine thermique.
- Le rythme d'accumulation d'eau reste inconnu (c'est l'objet du prochain programme de recherche, en cours de mise en place).
- De nombreuses questions restent sans réponse et beaucoup de travail reste à faire pour y répondre.

Questions générales sur « les bonnes pratiques » correspondant à l'objectif de cette réunion :

- Une des difficultés rencontrées dans ce type de problèmes (autres cas de glaciers qui ont présentés des risques de vidange brutale : Arsine, Rochemelon) est qu'il faut réagir souvent dans l'urgence.
- Une autre difficulté pour les scientifiques, qui ont d'autres activités de recherche au sein de leur laboratoire, est de réunir différentes compétences scientifiques et d'avoir au bon moment les bons équipements (ici il a fallu mettre en place des instrumentations assez lourdes) ainsi que les personnes (disponibilités…).

- Face à un problème de risque glaciaire de ce type, qui est un phénomène rare, il est fondamental de **continuer à conduire des travaux de recherche en parallèle**. Ces recherches peuvent paraître aux gestionnaires du risque comme de la « recherche fondamentale », alors qu'il s'agit en fait de travaux de recherche pour le moyen terme. Les mesures de température sur le glacier de Tête Rousse constituent un bon exemple: quand notre équipe a équipé de capteurs de température des forages disposés sur un profil en long, cela a pu apparaître comme de la « recherche fondamentale », mais c'est bien ce qui a permis de comprendre l'origine de la rétention de l'eau, et qui va permettre, à moyen terme, de répondre à différentes questions, afin de trouver des solutions à plus long terme pour gérer ce risque.

Discussion

Pierre Ostian (journaliste, médiateur) : Vous avez souligné la nécessité de travailler à plusieurs, avec des équipes qui utilisent des méthodes différentes. Par exemple la méthode de Résonance Magnétique des Protons (RMP) qui avait été éprouvée dans d'autres circonstances a été utilisée pour la première fois en montagne. C'est donc un progrès dans vos investigations scientifiques sur les glaciers ?

Stéphane Garambois (LGIT, désormais ISTerre) : Oui, pour mes collègues qui ont utilisé la méthode RMP c'était une première. Il n'y a pas eu beaucoup d'études sur des glaciers avec cette méthode jusqu'à présent, et peu d'entres elles ont détecté de l'eau. Dans cette étude sur le glacier de Tête Rousse, ils ont été amenés à développer un modèle d'inversion 3D, un peu dans l'urgence là aussi, en 2 ou 3 mois. Il y a donc eu des progrès fondamentaux. Ce type de recherches finalisées permet donc aussi de nous faire progresser dans nos méthodes d'investigation, qui pourront être appliquées à d'autres problématiques par la suite, notamment hydrologiques.

P. Ostian : Malgré l'urgence, vous avez donc réussi à faire des investigations très originales ? Vous disiez que le principe de fonctionnement de votre laboratoire ne vous permet pas de vous libérer lorsqu'il y a une urgence comme celle-là.

S. Garambois : Oui, contrairement à Christian Vincent qui est vraiment un spécialiste des glaciers, c'est un objet assez marginal pour notre laboratoire, qui travaille essentiellement sur les risques sismiques et gravitaires ; dégager du temps pour travailler sur des sujets un peu marginaux n'est pas toujours simple. D'autre part, nous travaillons également sur d'autres projets de recherche, dont certaines missions sont prévues 1 ou 2 ans à l'avance ; nous avons des chantiers dans différents endroits du monde, et il est vrai que c'est un problème de se libérer lorsqu'on a déjà plusieurs études en cours. Je n'étais pour ma part pas toujours disponible.

P. Ostian : Effectivement, c'est une charge de travail supplémentaire qui n'était pas prévue. Une des voies d'amélioration serait donc peut-être de prévoir de mettre à disposition plus facilement un certain nombre de spécialistes. C'est le moment pour le public de poser des questions…

Question : Pouvez-vous expliquer pourquoi on observe une telle répartition entre les parties « froides » et « chaudes » du glacier ?

C. Vincent : Nous sommes en train de travailler là-dessus en faisant des simulations numériques pour essayer de comprendre exactement le phénomène. Les résultats préliminaires de cette étude montrent que cette répartition est liée à la distribution de l'accumulation de neige sur le glacier. Sur la partie haute du glacier, l'accumulation est importante (du fait des avalanches, etc.) ; le névé y est permanent et beaucoup plus épais qu'en contrebas où la couche de névé disparaît en été et laisse la glace affleurer (ces dernières années cependant, il n'y avait quasiment plus de névé même sur la partie amont). L'explication de l'existence d'une zone tempérée en amont du glacier et d'une zone froide dans sa partie aval est donc la suivante : Dans la zone amont, où le névé persiste toute l'année, de l'eau de

fonte percole pendant le printemps et l'été et s'infiltre dans le névé, puis vient re-geler en profondeur. Le regel de cette eau apporte de la chaleur latente, qui a tendance à réchauffer le névé. Dans les parties aval du glacier, le même phénomène se produit au printemps et en début d'été, jusqu'au moment où il n'y a plus de neige sur le glacier - typiquement au mois de juillet ; ensuite les transferts thermiques se font uniquement dans la glace, par conduction, et sont donc très peu efficaces, la conduction dans la glace étant très faible. La glace de la partie aval reste donc froide tandis la partie amont du glacier est dans des conditions tempérées, ou presque tempérées, grâce à cet effet d'apport de chaleur latente liée au regel.
Cette hypothèse avait déjà été avancée, et les simulations numériques tendent à la confirmer.

Question : Est-ce que qu'on peut retrouver ce cas de figure sur d'autres glaciers ?

C. Vincent : Oui, par exemple, dans le cas du lac de Rochemelon, c'est de la glace froide qui était à l'origine de la retenue de l'eau, en l'absence d'écoulement sous-glaciaire. On peut sans doute retrouver ce type de régime sur d'autres glaciers, mais il faut une configuration spéciale, remplissant certains critères pour que la langue du glacier soit froide, tels que la distribution de l'accumulation de neige et la gamme d'altitudes.

François Gillet (ancien directeur du PARN) : Pour expliquer la provenance de l'eau, tu as parlé uniquement de l'infiltration de l'eau de fonte dans la partie supérieure du glacier, relativement tempérée. Cependant, le versant de l'Aiguille du Goûter qui surplombe le glacier présente une vaste surface et reçoit des quantités très importantes de neige et parfois de pluie. Une part non négligeable et peut-être même l'essentiel de l'eau provient donc probablement du bassin versant amont, et ne se limite pas à la seule zone d'infiltration en partie supérieure du glacier, qui présente tout de même des températures légèrement négatives, et sur laquelle on peut penser que l'eau s'écoule plutôt en surface ; d'ailleurs il n'y a pas de crevasses sur ce glacier et c'est un élément d'appréciation très important.

C. Vincent : Oui, je suis complètement d'accord. Quand je parlais de l'eau de fonte de surface, j'incluais l'eau qui provient du bassin versant, qu'il ne faut absolument pas négliger, et qui fera l'objet de la prochaine étude. La question que l'on se pose actuellement est de savoir si l'eau s'infiltre dans la glace ou dans une rimaye ou encore à l'interface entre le rocher et la glace à l'amont, voire sur les bords du glacier. C'est un élément important car il conditionne la quantité d'eau qui peut arriver chaque année.

Vincent Boudières (PARN) : Une question pour Stéphane Garambois. Dans le cas de Tête Rousse on est dans une gestion intégrée du risque, à la fois scientifique et opérationnelle. Sur cette expérience là, quelles sont les pistes qui vous semblent capitalisables pour la suite, pour ré intervenir sur un problème similaire, c'est-à-dire un problème avec un caractère d'urgence, une temporalité courte et de grosses incertitudes scientifiques ? Comment les scientifiques peuvent-ils dégager des pistes pour intervenir plus efficacement auprès des services opérationnels, sur des risques d'origine glaciaire comme sur les autres types de risques avec ce genre de caractéristiques ?

S. Garambois : Il y a deux aspects.
Tout d'abord nous avons développé des méthodes en cours de crise. Pourtant, je n'ai pas eu le temps de développer des investigations radar en trois dimensions (alors que c'est un objet « très 3D »), qui auraient sans doute permis de faire un diagnostic de la présence d'eau plus rapidement. Il y a donc une recherche en amont à faire sur plusieurs problématiques un peu spécifiques, ça c'est notre rôle, donc il faut mettre des moyens là-dessus, y compris de notre part.
D'autre part, entre le moment où nous avons détecté une anomalie au centre du glacier, à environ 40 m de profondeur, où nous avons mis en évidence la présence d'un objet hétérogène qui nous paraissait être de l'eau - ou des débris, ou des crevasses, on ne savait pas trop -, début 2008, et le moment où nous avons pu convaincre les pouvoirs publics qu'il y avait un risque avéré et qu'il fallait intervenir, il s'est écoulé à peu près 2 ans : sans doute aurait-on pu gagner du temps, si on avait su à qui s'adresser

pour avoir des moyens d'investigation supplémentaires pour réaliser, par exemple, des forages, qui n'ont pas pu être financés à cette époque. Nous avons tardivement obtenu un projet par l'intermédiaire de l'université, avec des délais longs liés au mode de dépôt du projet (acceptation, mise en place, etc.). Sur ce point je crois qu'il y a un effort à faire : comment se donner les moyens de travailler sur un risque potentiel mais non certain ? (notion d'incertitude) ; à qui s'adresser pour avoir des financements complémentaires pour évaluer si oui ou non le risque est avéré ? Il s'agit d'une des difficultés majeures que nous avons rencontrées…

P. Ostian : …et c'est une vrai question à se poser aujourd'hui. Cela rejoint ce que disait Christian Vincent…

C. Vincent : Oui ça va dans le même sens et c'est un problème… Tant qu'on n'est pas sûr que l'aléa soit avéré, on ne peut pas être alarmiste (ex. lors du Conseil Municipal du 4 août 2008 au sujet du risque de vidange brutale d'une poche d'eau potentielle dans laquelle on ne savait même pas s'il y avait de l'eau …). Et là, toute la difficulté réside dans le constat que tant qu'on n'est pas alarmiste, il ne se passe rien ! Ce n'est pas du tout une critique vis-à-vis des élus ou des gestionnaires opérationnels du risque, au contraire… C'est tout à leur honneur, dans le but de ne pas gaspiller l'argent du contribuable. Pourtant cette expérience pointe un **maillon manquant**, qui fait qu'on n'a pas la possibilité de faire les investigations nécessaires (exemple des financements manquant pour réaliser les forages en 2008). Puis nous sommes aussi impliqués dans d'autres programmes de recherche. Nous n'avons pas laissé tomber ce problème-là, puisque les investigations se sont poursuivies en 2009, mais il aurait peut-être dû rester une priorité, ce qui n'a pas été le cas pour des raisons de financements.

F. Gillet : Dans le prolongement de ce qui vient de se dire, en ce qui concerne le glacier de Tête Rousse, les conditions d'aujourd'hui diffèrent complètement de celles de 1892, puisqu'à cette époque le glacier était un glacier dit tempéré, donc à une température proche de 0°C. Aujourd'hui les conditions sont tout à fait nouvelles, probablement assez liées à l'évolution climatique actuelle ; on peut donc penser qu'il existe d'autres glaciers qui risquent de se retrouver dans des conditions assez voisines de celles du glacier de Tête Rousse. Or identifier des poches à l'intérieures des glaciers n'est vraiment pas une chose facile. La question qui se pose est la suivante : est-ce que les méthodes qui ont été développées à l'occasion de la crise du glacier de Tête Rousse sont généralisables pour voir s'il y a des risques ou pas à certains endroits ?

S. Garambois : En fait le glacier de Tête Rousse est un objet qui est vraiment tridimensionnel au niveau de la poche d'eau, mais en dehors de cela il s'agit d'un glacier homogène, sans crevasses : on peut utiliser des techniques radar car il y a peu de diffraction et de problèmes de ce type, l'hétérogénéité est donc assez visible.
Sur des glaciers plus crevassés (ex. : Mer de Glace, Argentière…), le milieu est beaucoup plus hétérogène, ce qui rend l'interprétation des investigations radar problématique. Il faudrait donc passer aux méthodes sismiques, qui sont des méthodes lourdes et ne permettent donc pas une couverture spatiale aussi importante qu'avec des méthodes plus légères.

C. Vincent : Le problème est le même pour la RMP, pour laquelle l'instrumentation est vraiment lourde. Sur Tête Rousse chaque campagne a représenté 10 jours de terrain, pour un glacier qui est tout petit… De plus on ne peut pas imaginer de faire de la RMP par des moyens héliportés ou aéroportés. Pour le radar, cela pourrait être envisagé (une campagne radar vient d'être faite sur le glacier de Taconnaz), mais l'interprétation est extrêmement délicate quand le glacier est trop crevassés, comme l'a précisé S. Garambois il est très difficile de distinguer une poche d'eau d'une crevasse…

Didier Richard (Cemagref) : Au sujet de cette discussion et de la question posée par François Gillet, un point peut être souligné dans la perspective du débat de cet après-midi. Les difficultés que vous soulevez à intervenir sur des pas de temps à la fois courts et longs (c'est-à-dire longs par rapport au fait de pouvoir être suffisamment alarmistes pour que les décisions puissent être prises, mais courts

parce qu'ensuite le temps est compté pour mener les investigations) renvoient à la question de l'anticipation. Et la difficulté qu'on rencontre avec l'anticipation est que les moyens lourds qui ont été mobilisés dans ce cas particulier ne sont a priori pas généralisables sur la totalité des systèmes glaciaires – et périglaciaires. Peut-être qu'une piste de réflexion pourrait être, à partir de critères beaucoup plus grossiers donc plus facilement accessibles, d'arriver à pré-cibler des systèmes glaciaires ou périglaciaires, qui à défaut de nécessiter ou de justifier immédiatement des investigations lourdes pourraient justifier une vigilance légèrement accrue. Maintenant, il reste à évaluer la faisabilité d'une telle démarche. [*Cette question est renvoyée au débat de l'après-midi*].

P. Ostian : Vous avez dit « nous avons été surpris de découvrir la présence d'eau dans ce glacier ». Certes comme l'a dit François Gillet, la nature du glacier de Tête Rousse a évolué en 120 ans. Malgré tout, cela pose le problème de la mémoire, parce qu'en 1892 c'est tout de même une poche d'eau qui a explosé dans le glacier… Donc je ne comprends pas votre surprise. Est-ce que vous avez perdu la mémoire de 1892 ? Vous n'imaginiez pas qu'une poche d'eau puise se reformer ?

C. Vincent : Non ! Puisque l'étude a été faite suite à la question du RTM de savoir si la galerie qui avait été creusée après la catastrophe de 1892 était encore utile. En fait il y a eu plusieurs surprises. D'abord l'épaisseur du glacier révélée par les mesures radar : 75 m d'épaisseur, pour un glacier qui fait 200 m de large. À vrai dire je n'aurais jamais pensé qu'il était si épais. Les mesures de température aussi nous ont surpris. En 2008, nous avions fait des forages peu profonds, à 12 m, pour installer des capteurs de température. C'était un peu « pour voir », ça ne coûtait pas cher. Pour ma part, j'aurais dit que c'était un glacier tempéré. Mais non, c'était un glacier froid ! La troisième surprise était cette zone d'anomalie radar. A priori on ne pensait pas qu'il y avait de l'eau dans ce glacier. Si on avait pu le penser, on aurait fait des études bien avant ! Une autre surprise était que ce glacier avait perdu peu d'épaisseur : 15 m depuis 1904, alors que dans le même temps la Mer de Glace au refuge du Montenvers a perdu 150 m d'épaisseur ! Pourtant, les archives RTM des années 1950 indiquaient que le glacier avait perdu la moitié de son épaisseur… Le glacier de Tête Rousse est donc encore épais, alors qu'on pensait que c'était un glacier en voie de disparition. Nous n'imaginions donc pas du tout qu'une poche d'eau puise se reformer.

Un participant (Mairie de Bourg-Saint-Maurice) : Aujourd'hui la poche d'eau a été vidée. J'imagine qu'elle va se remplir à nouveau. Qu'avez-vous mis en place pour suivre le phénomène ? Des capteurs sont-ils restés au fond ?

C. Vincent : Effectivement, la cavité se remplit à nouveau : nous mesurons le niveau d'eau à l'intérieur, et il monte. Ça ne représente pas des volumes importants pour l'instant. Néanmoins c'est une préoccupation et nous sommes en train de mettre en place un programme d'étude (de recherche appliquée) pour répondre aux questions suivantes : à quelle vitesse se remplit la cavité ? Faudra-t-il vidanger dans le futur ? D'où vient l'eau ? etc. [*cf. discussion de l'après-midi, p. 51*]

Théodule Alex (Fondation Montagne Sûre, Vallée d'Aoste) : Lors de cet événement-là, la poche d'eau s'est formée à l'interface entre le rocher et le glacier. Lors de l'événement de 1892, la poche d'eau se trouvait à l'intérieur du glacier et ne touchait pas le lit rocheux. Est-ce que cela dépend exclusivement du régime thermique ? Est-ce qu'il y a une explication logique ?

C. Vincent : Oui, nous avons une explication, je ne sais pas si c'est la bonne mais c'est une hypothèse. Effectivement en 1892, la cavité n'était pas en contact avec le lit rocheux (cf. Fig. 2). On en est à peu près sûr grâce aux mesures des Eaux et Forêts sur cette cavité et sur le conduit intraglaciaire ; on connaît bien leur géométrie. La question est de savoir si les causes sont les mêmes aujourd'hui qu'en 1892, et nous pensons que non. Pour nous la cavité qui s'est rompue en 1892 s'est formée en raison de la présence d'un lac supraglaciaire qui se serait formé entre ~1860 et 1874. Une étude approfondie a

été faite à ce sujet[3] et plusieurs indices montrent que ce lac se serait agrandi et approfondi pendant cette période, durant laquelle la fonte était importante et l'accumulation faible. À partir de 1874 jusqu'en 1892, il y a eu une période avec des bilans de masse positifs : le lac était recouvert chaque hiver d'une pellicule de glace et de neige, et le manteau neigeux de l'hiver ne fondait pas complètement pendant l'été, donc l'accumulation prédominait, d'où la formation d'une voûte sur ce lac, qui faisait dès lors penser à une cavité intraglaciaire, alors qu'à l'origine c'était un lac supraglaciaire. Ensuite, il y a eu formation du conduit intraglaciaire (cf. Fig. 2), dont les mécanismes de formation restent très obscurs, puis formation de la cavité inférieure, et ensuite deux scénarios possibles pour expliquer la vidange rapide : soit (1) une rupture de la cavité d'origine mécanique du fait de la pression de l'eau sur le bouchon de glace, soit (2) la langue du glacier était froide, comme aujourd'hui, puis s'est réchauffé, et l'eau a pu s'infiltrer et soulever le glacier. Les deux hypothèses expliquent que le drainage se soit produit subitement.

F. Gillet : La question est de savoir quel est le risque réel de rupture du glacier s'il y a une poche telle qu'elle est figurée sur le profil longitudinal des températures de la glace (cf. Fig. 14) ? Le risque dépend de la pression et donc de la hauteur d'eau dans la cavité. Vous avez fait des recherches en glaciologie très intéressantes en matière de résistance mécanique de la glace sur l'effondrement de la voûte. Avez-vous cherché à calculer la capacité de résistance du barrage constitué par la partie du glacier qui retient l'eau, qui se trouve à température négative, et qui probablement ne présente pas de risque de rupture jusqu'à un certain niveau d'eau ?

C. Vincent : Non, pas jusqu'à maintenant puisque nous avons réagit dans l'urgence -et je pense que nous avions de bonnes raisons de le faire. Lorsqu'il y a une rupture de lac emprisonné dans un glacier, en général des lacs supraglaciaires (type Rochemelon), la rupture survient quand la pression d'eau atteint le poids de la colonne de glace. A ce moment là il peut y avoir soulèvement du glacier. Dans la bibliographie, les phénomènes de ce type sont rares, heureusement, mais tous montrent que lorsque le niveau d'eau atteint la surface de la glace on peut avoir une rupture ; parfois la rupture se produit avant que la pression d'eau atteigne le poids de la colonne de glace. Dans notre cas ce stade-là était dépassé puisque l'eau refoulait. Donc on n'avait plus le choix ! Néanmoins la question reste pertinente : il reste à faire de la simulation mécanique. Ceci dit, même si le modèle mécanique indiquait qu'il n'y a pas de danger, je pense que la décision aurait été identique

J.M. Vengeon : Merci à tous pour ces discussions. Je suis étonné également par la question de la mémoire, entre un événement qui a plus d'un siècle et la réactivation d'études juste à temps pour intervenir et éviter une nouvelle catastrophe. On a vu que ces études ont été réalisées en raison de l'obligation d'entretien d'un ouvrage, qui a permis de se poser des questions, etc., Or il n'y a pas de tels ouvrages partout, ce qui pose la question suivante en vue du débat de cet après-midi : « comment faire pour maintenir la mémoire des événements et finalement se poser les bonnes questions au bon moment ? ».

[3] Vincent C., S. Garambois, E. Thibert, E. Lefebvre, E. Le Meur and D. Six. 2010. Origin of the outburst flood from Tête Rousse glacier in 1892 (Mont-Blanc area, France). *Journal of Glaciology, 56, 198, 688-698.*