

ROADS AND CLIMATE CHANGE IN MOUNTAINOUS AREAS: A HOT PROBLEM TO BE SOLVED WITH COOL HEADS

Aurèle Parriaux

Laboratoire de géologie de l'ingénieur et de l'environnement, Ecole polytechnique
fédérale de Lausanne, Suisse.

Aurele.parriaux@epfl.ch

ABSTRACT

Mountainous areas are complex systems according to their climatic, topographic, hydrological and geological conditions. The road has conquered these regions but remains in a precarious state due to the numerous and diverse risks that threaten it. The equilibrium between road safety and natural hazards, which has been found often with difficulty, must be reconsidered according to the new boundary conditions resulting from the climate change. The paper presents the danger to transpose in a simplistic way global climatic scenarios to strong relief regions. Particularly it insists on the subtlety of the relationship temperature – snow – frost. The communication will indicate to the road engineer some tracks in order he can adapt himself to a broader way of thinking, more open to other disciplines concerning the territory; also in order he can adapt his works to these new conditions, even with their large present uncertainties. In mountainous regions, the origin of problems is often rather far from the road itself. The engineer must no more consider the road as a linear infrastructure but has to integrate it in a large 3D territorial context, which is source of its vulnerability. This principle is already available today. It will be decisive tomorrow.

Text in French

1. MOTIVATION

Le réchauffement climatique que nous vivons suscite beaucoup d'inquiétude dans la population. Cette inquiétude est légitime puisque les modifications qui sont en cours vont donner lieu à des dommages importants dans de nombreuses régions du monde. La route est bien entendu concernée, comme beaucoup d'infrastructures humaines.

Les régions de montagne constituent un cas particulier face à ces changements, par le type de risques qu'ils impliquent et par la difficulté d'y transposer des scénarios à grande échelle. Spécifions que le terme de « régions de montagne » est pris ici dans son sens large incluant des territoires à relief marqué, mais pas forcément à haute altitude. Toutefois, le cas de la Chaîne alpine servira souvent d'exemple en raison de la richesse des expériences acquises dans ce contexte.

La présente communication veut aussi montrer comment l'ingénieur devrait considérer « la tête froide » un problème de cette ampleur. En effet, à l'image de ce que nous avons vécu il y a plus d'une vingtaine d'années avec « la mort des forêts », la sensibilité du public est malheureusement utilisée, de manière opportuniste par trop de scientifiques. Des messages totalement alarmistes se mettent à foisonner, en particulier dans le domaine de la route. A lire certains d'entre eux, des phénomènes géologiques tels que l'érosion particulière ou les glissements de terrain seraient arrivés avec le changement climatique. Or, la perception par les responsables de nos infrastructures peut être profondément biaisée par de tels messages, ce qui peut donner lieu à des réactions disproportionnées, à des mesures erronées et un gaspillage des deniers publics. Il est incontestable que certaines régions, certains sites ou ouvrages nécessiteront des modifications fondamentales, notamment des tronçons en bord de mer ou de fleuves où les élévations sont déjà limites actuellement. Cependant, nos ingénieurs sont en mesure de résoudre la grande majorité des problèmes sur le réseau routier existant, par des adaptations, pas nécessairement urgentes et pas nécessairement très coûteuses. Mais il faut pour cela qu'ils intègrent très tôt cette nouvelle composante. La démarche raisonnable consiste à « penser Changement climatique » dans tout projet routier dès sa conception, que ce soit un tronçon nouveau ou une opération de maintenance. Il s'agit alors d'évaluer quelles modifications concrètes le changement climatique pourrait avoir sur l'utilisation de la route au cours de sa durée de vie.

2. SPECIFICITÉS DES RÉGIONS MONTAGNEUSES

Y a-t-il lieu de traiter de manière spécifique les régions de montagne en ce qui concerne le changement climatique ? Si oui, en quoi les zones de relief se distinguent-elles des autres régions du Globe au point de vue du contexte de la route ? Un bon nombre de caractéristiques climatiques, topographiques et géologiques justifie cette spécificité, par exemple (fig 1) :

- plus hautes altitudes donc basses températures
- effets topographiques hautement tridimensionnels
- eau non essentiellement sous forme de pluie mais aussi de neige et de glace
- répartition de la couverture neigeuse, y compris le transport par le vent
- microclimats
- conditions géologiques souvent très variables
- exposition de beaucoup de ces régions aux glaciations du Quaternaire, avec ce que cela implique comme volume de dépôts meubles
- érosion active
- fortes pentes (souvent en équilibre limite)
- activité sismologique importante liée au contexte tectonique.

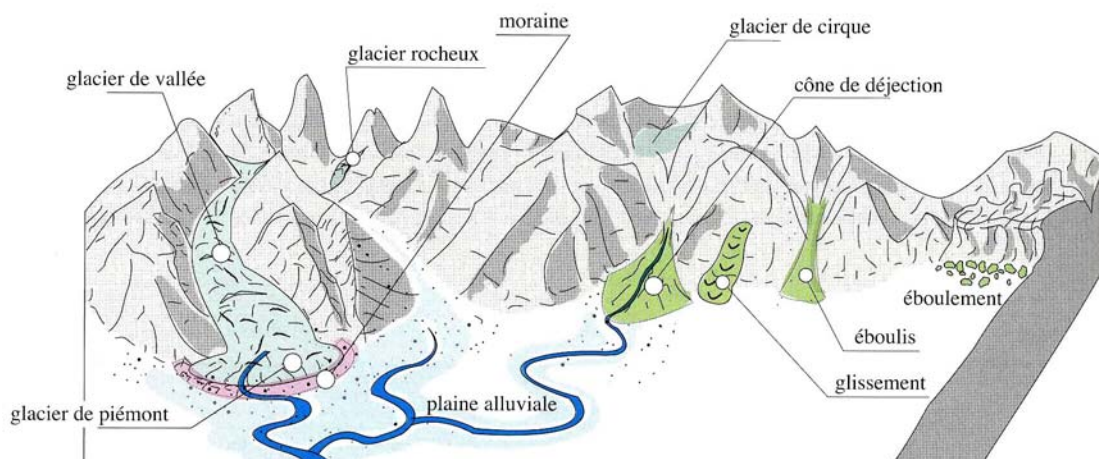


Figure 1 - Particularité des régions de montagne avec leurs nombreux milieux sensibles au changement climatique (d'après [16]).

3. SPECIFICITÉS DU RÉSEAU ROUTIER EN MONTAGNE

La route dans ces régions difficiles présente aussi des caractéristiques bien différentes de celles des régions de plaine, qui la rend infiniment plus vulnérable. Il suffit pour s'en convaincre de suivre quelques événements qui l'ont à plusieurs reprises fragilisée au cours de ces récentes années. Rappelons en quelques-uns que nous avons vécus dans les Alpes suisses causés par des phénomènes géologiques différents :

3.1 Lave torrentielle du Pissot

Le 13 août 1995, aux environs de minuit, une pluie extrêmement intense et de courte durée provoqua une importante lave torrentielle (environ 50'000 m³) dans un torrent très raide au front des Alpes. L'autoroute du Simplon A9, qui traversait le cône de déjection en tranchée, fut coupée par la lave qui avait quitté le cours du torrent (fig 2). Quelques voitures vinrent collisionner les sédiments, heureusement sans perte humaine. La lave menaça également des grosses citernes de carburant construites au pied du cône. L'autoroute fut totalement coupée pendant deux jours, amenant tout le trafic des Alpes occidentales sur la seule route urbaine bordant le Léman. Le dimensionnement de ce tronçon d'autoroute avait été fait dans les années 1960 sans prendre en compte le phénomène « lave torrentielle ». Un grand bassin de décantation a été construit en amont pour un coût de quelque US\$ 20'000'000.

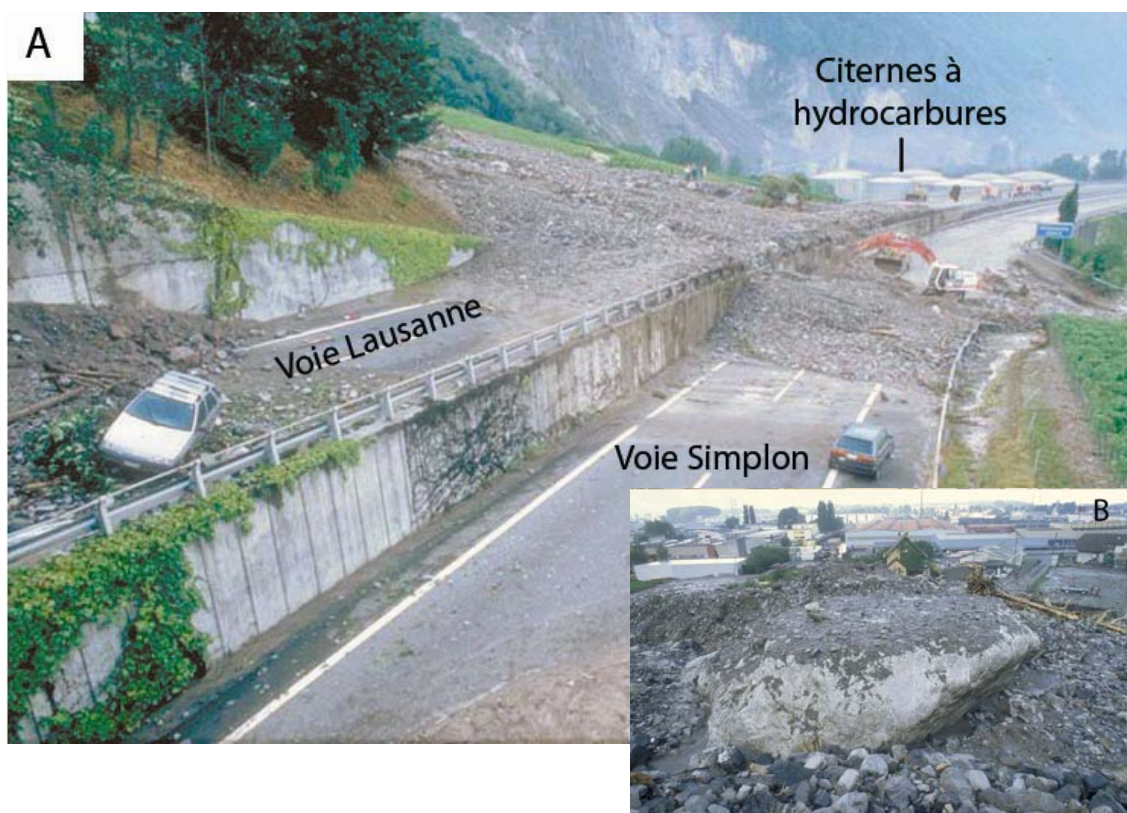


Figure 2 - La lave torrentielle du Pissot, Préalpes vaudoises. A : Amas des sédiments sur les deux voies de l'A9 ; au pied du cône, les grands réservoirs de carburant. B : Bloc de 60 m³ transporté par la lave et ayant franchi l'autoroute dans le chenal du torrent qui enjambe les deux voies.

3. 2 Glissement – coulée de Gondo

En octobre 2000, le sud des Alpes a été soumis à des précipitations tout à fait exceptionnelles. Une sorte de mini-mousson venant d'Afrique du Nord déversa entre 700 et 900 mm de pluie en cinq jours, dont 400 mm en 36 heures. Le village de Gondo, à la frontière entre l'Italie et la Suisse, est construit au pied d'une haute falaise (fig 3). Au pied de la falaise, un cône d'éboulis s'est accumulé sur une

moraine peu perméable. Les fortes précipitations, encore accentuées par le ruissellement important sur la falaise ont provoqué un tel flux d'eau souterraine dans l'éboulis que celui-ci a été emporté par les forces de percolation le 14 octobre 2000. Les matériaux se sont d'abord accumulés derrière un mur contre les chutes de blocs, puis, rapidement le mur a été emporté à son tour balayant plusieurs maisons sur son passage et causant la mort de 14 personnes. La route du Col du Simplon a été coupée pendant plus d'une semaine. De telles intensités de pluies n'avaient jamais été mesurées jusqu'ici et selon les lois d'ajustement statistiques, un tel événement devait être au moins millénaire.

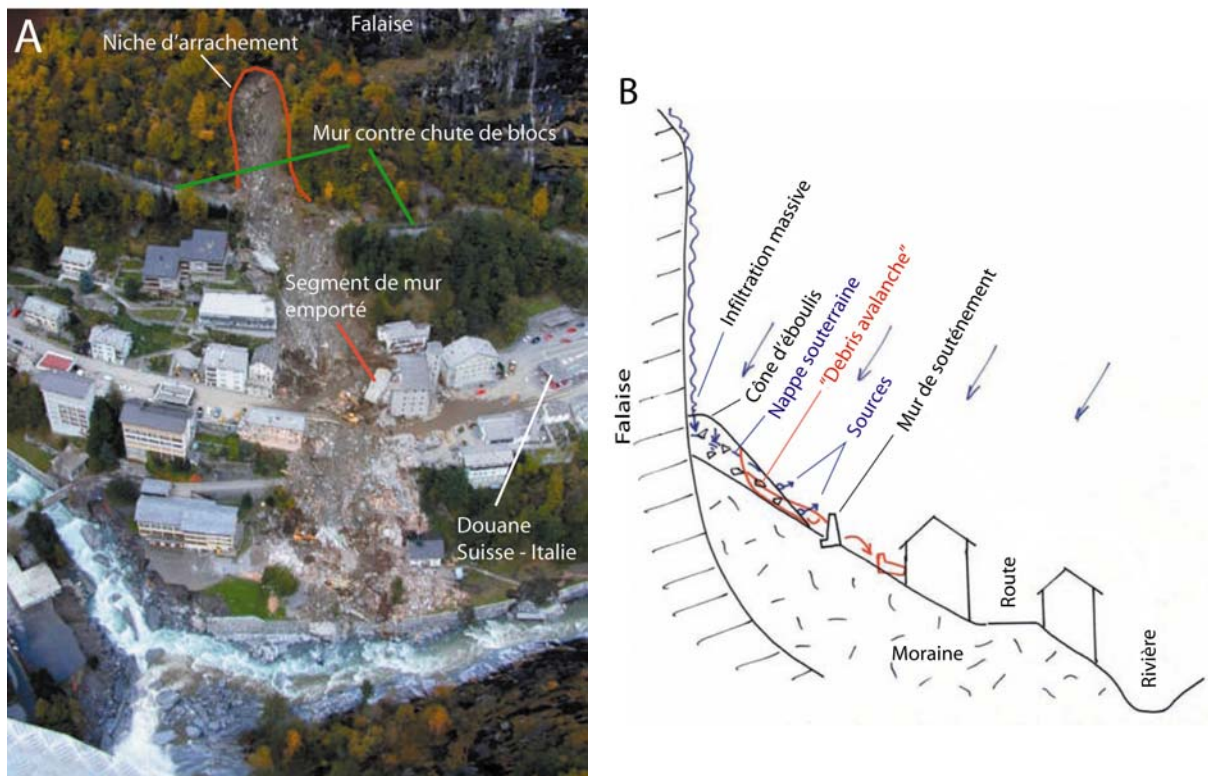


Figure 3 - Glissement – coulée de Gondo, Alpes valaisannes méridionales. A : Tracé de la coulée avec coupure de la route. B : Schéma du phénomène.

3.3 Eboulement de Gurtellen

Le 31 mai 2006, sur l'autoroute du Gothard A2, trois jours avant le weekend de Pentecôte, un éboulement de quelque 10'000 m³ a provoqué la mort de deux touristes par la chute d'un gros bloc sur leur voiture (fig 4). Une fonte de neige intense avait régné les jours avant la catastrophe. La circulation a été immédiatement coupée sur ce grand axe routier nord – sud (40'000 à 50'000 véhicules par jour en été, dont les $\frac{3}{4}$ du trafic alpin des poids lourds par la Suisse). La question était de savoir si elle serait ouverte à nouveau pour laisser passer le torrent de touristes se rendant au sud des Alpes pour la Pentecôte. Les évaluations géologiques imposèrent de maintenir ce grand axe fermé, le temps de procéder au minage d'une falaise de granite qui lâchait des énormes blocs depuis une altitude de 800 m au-

dessus de la route. Pendant un mois, le trafic a été dévié sur l'A13 et le tunnel du San Bernardino, le tunnel du Mont-Blanc, le Simplon et le Grand Saint-Bernard, déjà fortement chargés. Des discussions ministérielles ont eu lieu pour répartir une partie du trafic sur les pays voisins. Cet exemple montre bien quelle vulnérabilité présente un grand couloir routier à travers les Alpes, malgré de nombreux aménagements de protection réalisés. A noter qu'à l'époque de la construction de l'A2, dans les années soixante, des géologues zurichois avaient en effet lancé des mises en garde sur la fréquence des éboulements dans cette zone, nécessitant d'après eux la construction de galeries pour protéger l'autoroute.



Figure 4 - L'éboulement de Gurnellen, sur l'autoroute du Gothard A2, a provoqué la mort de deux touristes puis la fermeture de l'autoroute durant un mois.

Dans quelle mesure le changement climatique a été impliqué dans les causes de ces catastrophes ? Pour répondre à cette question, il faut examiner la situation de plus près.

D'une manière générale, cette vulnérabilité augmentée s'explique pour les raisons suivantes :

- forte exposition aux dangers naturels
- stabilité fragile de la chaussée
- maintenance difficile en raison des coûts élevés
- faible densité du réseau routier, parfois sans itinéraire de remplacement (fig 5)
- très fort trafic touristique à certaines périodes

Elle implique l'engagement d'une forte responsabilité de la part des services de gestion du trafic. Par exemple, la décision de fermer ou non un grand axe routier un weekend de forte affluence n'est pas facile à prendre (voir le cas de Gurnellen, chapitre 3.3).

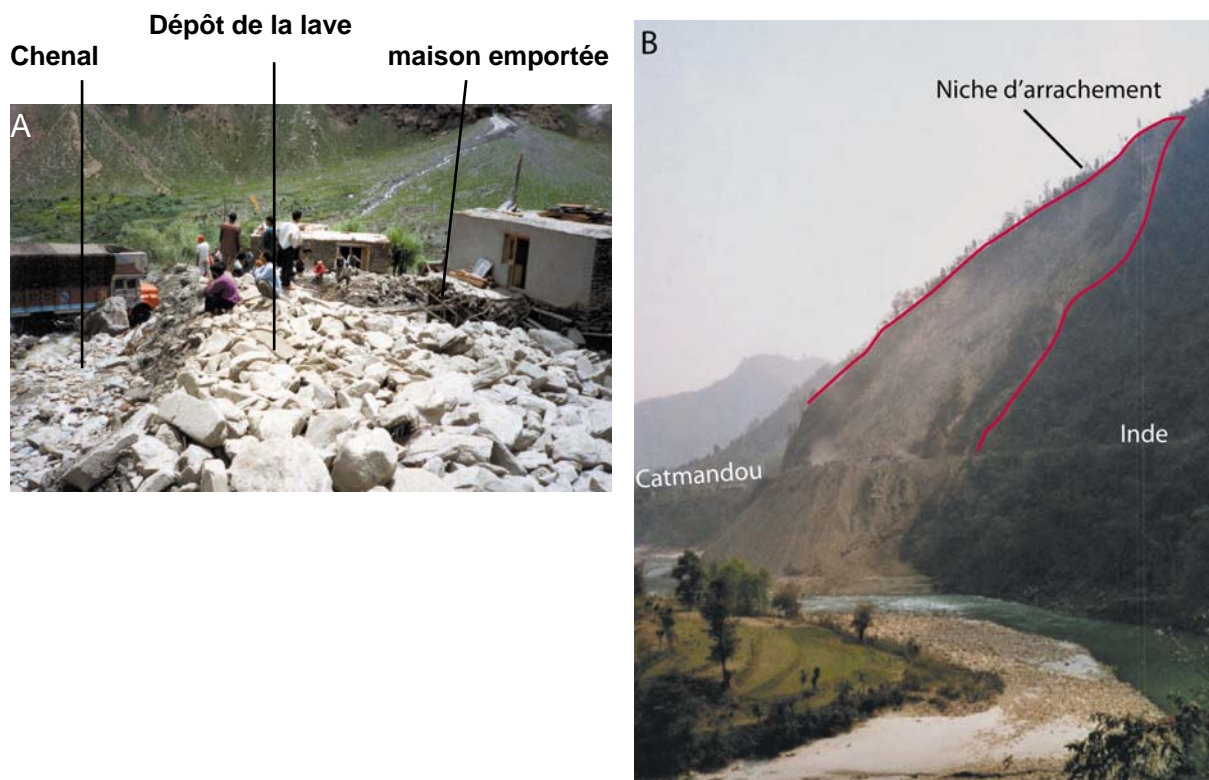


Figure 5 - Deux événements de coupure de route stratégique dans l'Himalaya. A : Lave torrentielle coupant la route transhimalayenne donnant d'accès au Cashmire indien (d'après [16]). B : Glissement de Krisnabir coupant la route d'accès à Katmandou depuis l'Inde.

4. SCÉNARIOS CLIMATIQUES GÉNÉRAUX

Nous ne traitons pas ici des scénarios à l'échelle de la Planète (voir par exemple « IPCC WGI Fourth Assessment Report 2007; OcCC, Événements extrêmes et changements climatiques, 2003 »). Les pays qui se trouvent dans des conditions de relief marqué essaient d'en tirer un scénario vraisemblable qui devrait servir de ligne directrice pour la planification du territoire et des infrastructures. C'est cet exercice qu'à fait la Suisse, pays au centre des Alpes, avec une partie du pays au nord de la chaîne, l'autre au sud, donc des parties de pays soumis à des climats très différents.

L'Organe consultatif sur les changements climatique (OcCC) part du constat que durant le XXe siècle, la Terre s'est réchauffée de 0.6 °C [7] alors qu'en Suisse, ce réchauffement a atteint 1.2 à 1.5 °C dans le nord de la Suisse et environ 1 °C au Sud des Alpes [4]. L'accroissement s'est fortement accéléré dès les années 1980 (fig. 6).

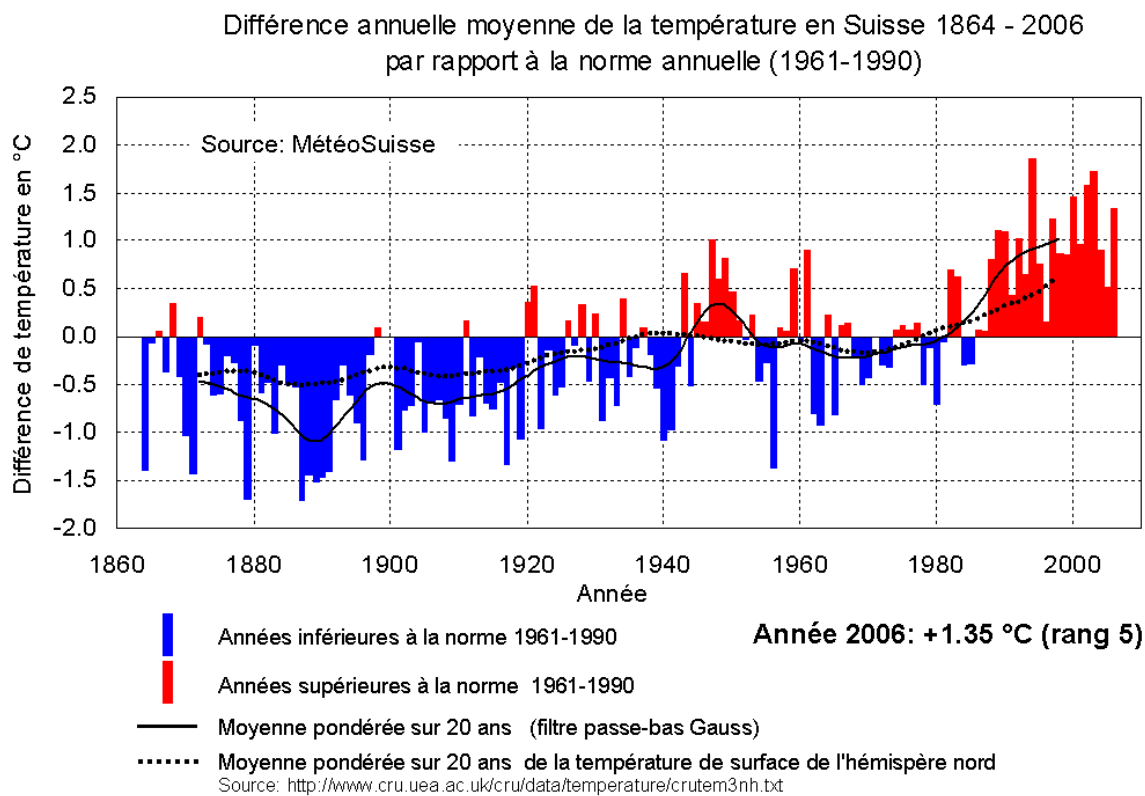


Figure 6 - Histoire de la température en Suisse sur près d'un siècle et demi (d'après [18]).

Les pronostiques pour le XXI^e siècle poursuivent ce réchauffement mais la fourchette d'incertitude est considérable, variant entre les modèles entre 1.4°C et 6.8 °C [13]. La synthèse de nombreux modèles régionaux articulés à des modèles globaux, notamment les 16 scénarios simulés par le projet européen PRUDENCE, a permis de dresser une image probabiliste du futur climat de la Suisse [15]. La projection est faite pour 2050, échéance qui est bien adaptée aux ouvrages routiers.

Scénario climatique de la Suisse à l'échéance 2050 :

« La température augmentera partout et en toute saison.

Au Nord des Alpes, le réchauffement sera de l'ordre de +1.8 °C en hiver (fourchette entre +0.9 et +3.4 °C). En été, il sera de l'ordre de +2.7 °C (fourchette entre +1.4 et +4.7 °C).

Dans le Sud des Alpes le réchauffement sera à peine plus élevé : en hiver il sera de l'ordre de +1.8 °C (fourchette entre +0.9 et +3.1 °C) et en été de +2.8 °C (fourchette entre +1.5 et +4.9 °C).

Les précipitations devraient augmenter dans l'ensemble du pays en hiver et diminuer en été.

Au Nord des Alpes, les précipitations devraient augmenter de 8% en hiver (fourchette entre -1% et +21%) et diminuer de 17% en été (fourchette entre -7% et -31%). Au Sud, l'évolution des précipitations est plus ou moins identique. Une augmentation de 11% est attendue en hiver (fourchette entre +1% et +26%), tandis qu'une diminution de 19% est attendue en été (fourchette entre -6% et -36%). »

Il faut bien convenir que ce scénario « officiel » pourrait ne pas se vérifier dans les faits, selon que des mesures seront prises ou non pour limiter l'effet de serre sur la Planète. Il reste aussi assez vague et n'est pas transposable directement au cœur des vallées alpines.

5. SUBTILITÉ DE LA RELATION TEMPÉRATURE - GEL

Les facteurs dominants qui agissent sur la sécurité des ouvrages routiers sont les eaux (de surface et souterraines) et le gel. Or, gel et eau dépendent étroitement du système température – pluie – neige – gel. Pour préciser comment sont liés ces facteurs, le Laboratoire de géologie de l'ingénieur et de l'environnement de l'École polytechnique fédérale de Lausanne a entrepris une recherche expérimentale dans les Alpes valaisannes [1 et 17]. Examinons quels en sont les principes et les résultats principaux.

Deux stations expérimentales ont été implantées dans le territoire alpin, dans le canton du Valais :

- Grand Saint Bernard (2500m), à proximité du col du même nom qui relie le Valais au Val d'aoste
- Hannigalp - Grächen (2090m) dans la vallée qui mène à la station de Zermatt et au Cervin.

Ces stations sont implantées dans des terrains géologiquement semblables (débris grossiers de versants et dépôts glaciaires). En revanche, elles diffèrent complètement au point de vue climatique : régime de précipitation très intense au Grand Saint Bernard au carrefour de tous les vents qui transitent par ce col majeur, fort déficit d'apports pluviométriques à Hannigalp, typique du Valais central (fig 7).

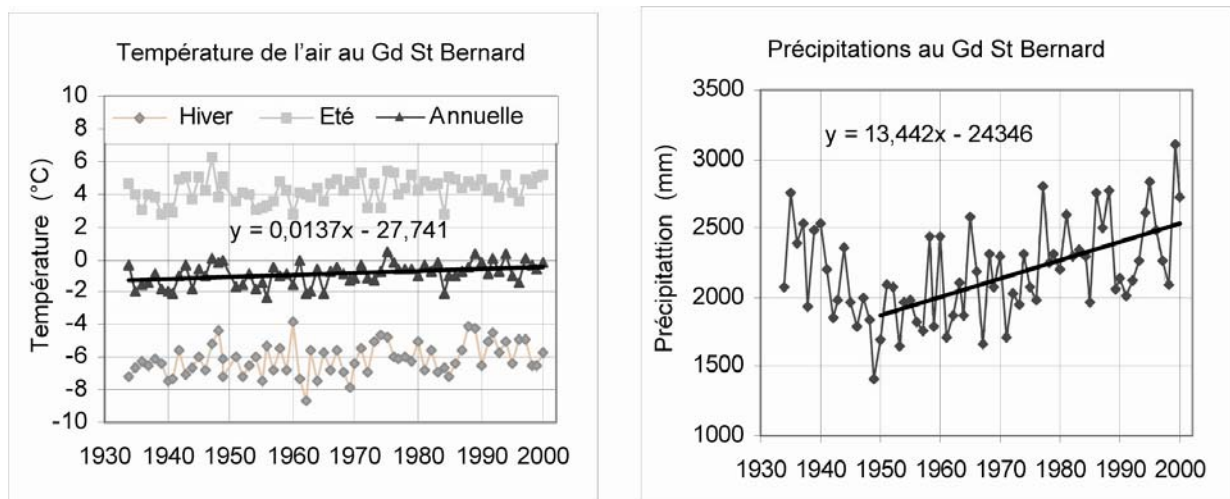


Figure 7a - Caractéristiques climatiques principales du site expérimental du Grand St Bernard (d'après [1]).

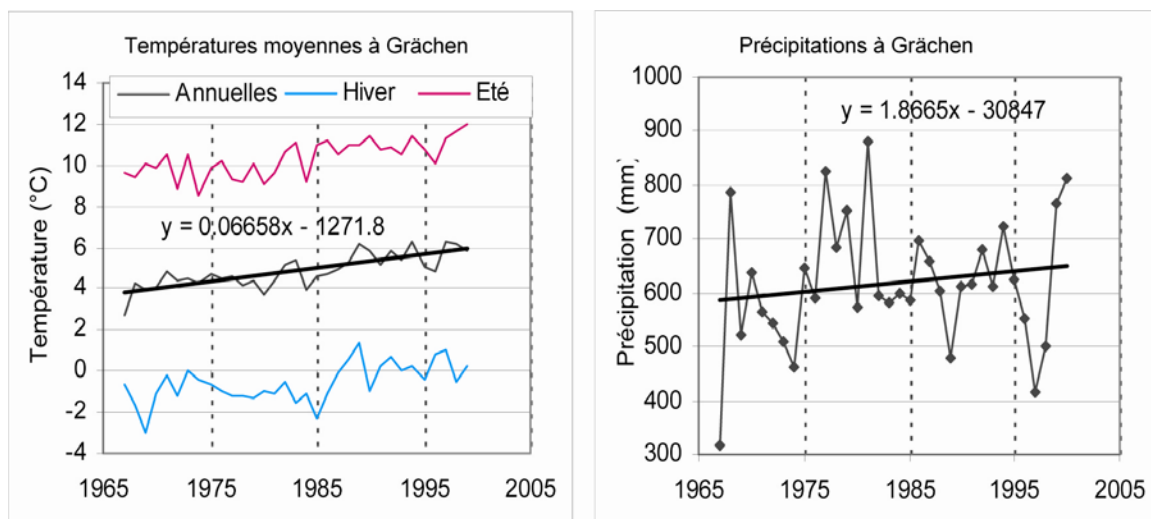


Figure 7b - Caractéristiques climatiques principales du site expérimental de Grächen (d'après [1]).

Les sites sont équipés de tranchées creusées dans les sols naturels, permettant de mesurer et de collecter les différents flux hydrologiques (fig 8).

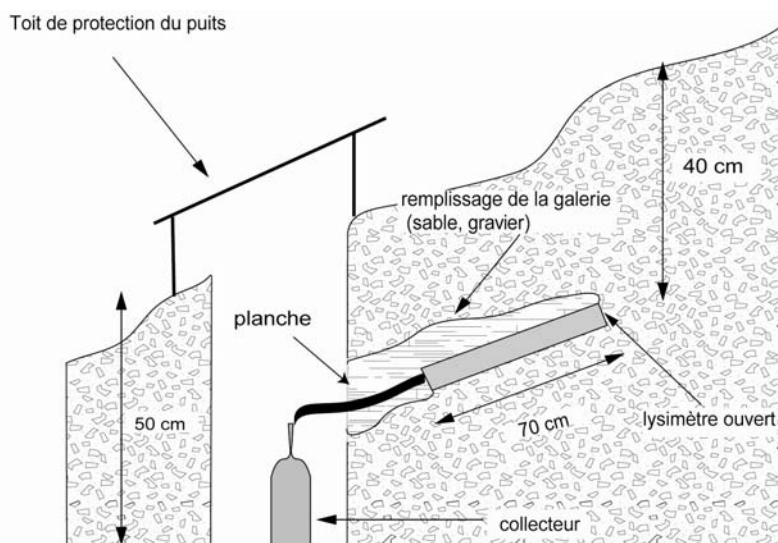


Figure 8 : Schéma de l'équipement du site Hannigalp (Grächen). A droite, lysimètre creusé sous le sol, sans toucher la couverture, pour mesurer la percolation en profondeur. A gauche, tranchée d'accès pour la construction du panneau lysimétrique, pour les appareils de suivi et la collecte des échantillons d'eau (d'après [1]).

Cette recherche portant sur deux périodes annuelles a eu la chance d'observer des conditions climatiques diamétralement opposées : l'hiver 2000-2001 bénéficia dès le début de la saison froide d'un important manteau neigeux (fig 9).

En revanche, l'hiver 2001-2002 débuta sans neige, ce qui permit un développement important du gel du sol, en raison de l'absence de la couverture isolante que constitue la neige (fig 10).

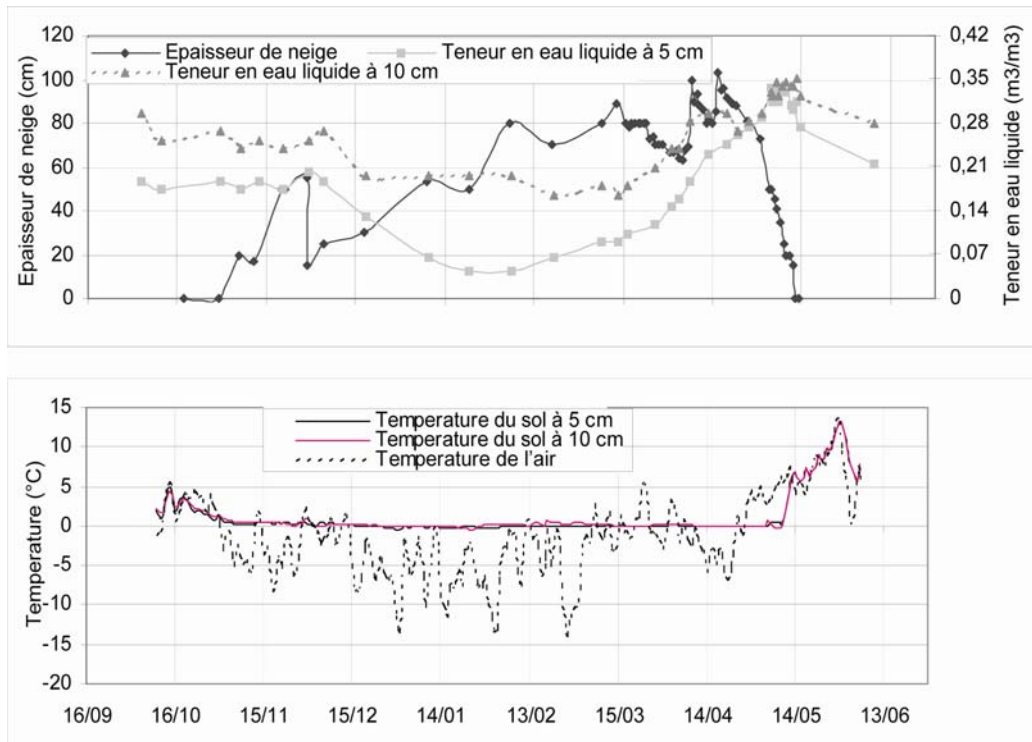


Figure 9 : Relation entre la couverture neigeuse, la teneur en eau et la température du sol sur le site de Hannigalp durant l'hiver 2000-2001, sans gel du sol (d'après [1]).

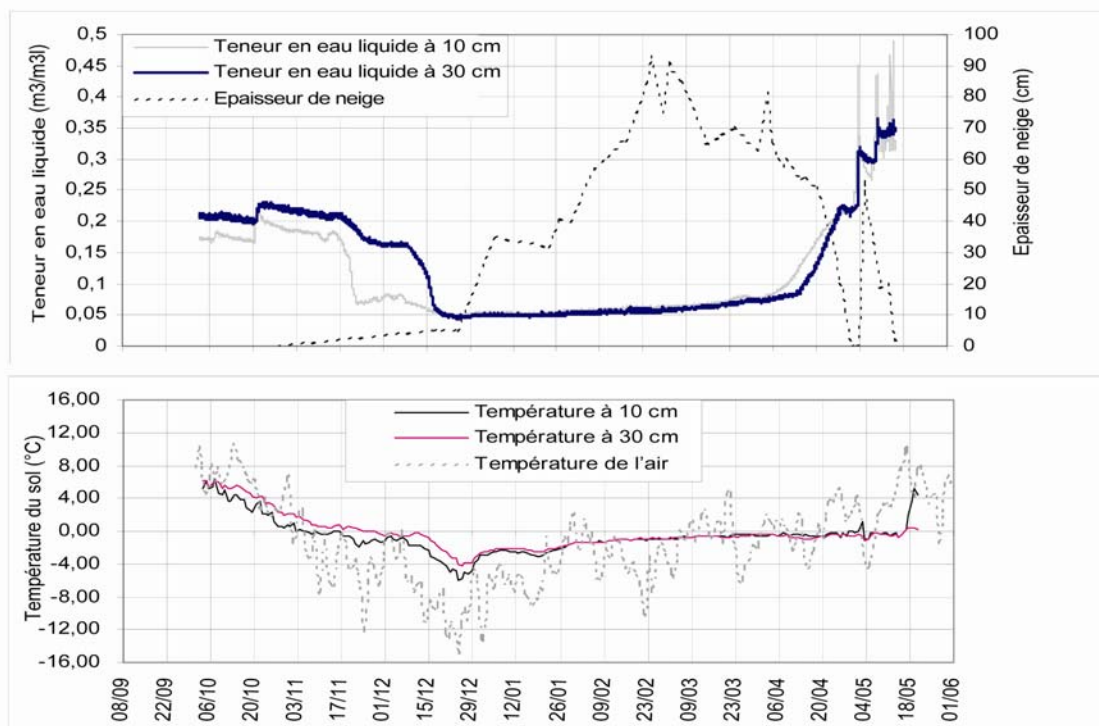


Figure 10 : idem à fig 9 pour l'hiver 2001-2002, avec un important gel du sol (d'après [1]).

Le bilan hydrique durant ces deux saisons hivernales varie en raison de la présence ou de l'absence de sol gelé. Lorsque le sol est gelé, sa perméabilité chute, sans toutefois devenir totalement étanche. Ce résultat provient du fait que le sol n'est pas

totalemment saturé lors du gel. Cette réduction est toutefois importante puisque les flux de percolation vers le sous-sol sont réduits de quelque 30%, notamment quand une couche de glace se forme au contact entre la neige et le sol. Cette variation significative dans la répartition percolation profonde – ruissellement, a un effet sur la stabilité des versants : durant les hivers neigeux sans gel du sol, la forte percolation vers le sous-sol lors de la fonte de la neige va impliquer une augmentation du risque de glissements profonds. En revanche, lors des hivers avec gel, les eaux de fonte vont se concentrer dans la partie supérieure du sol et donner lieu à une croissance du risque de coulées et de glissements superficiels.

Ces types d'aléas menacent la route d'une manière bien différente et les solutions de sécurisation ne sont pas identiques. Les coulées et autres instabilités superficielles sont très dangereuses pour le trafic en raison de leur rapidité, mais ne créent pas de très gros dommages aux infrastructures. Les glissements plus profonds sont de mouvement plus continu et donc rarement dangereux pour les usagers de la route ; mais ils sont en revanche plus coûteux à stabiliser. En conclusion, ce sont les hivers peu neigeux qui sont a priori les plus menaçants pour la sécurité routière. Comment loger cette conclusion dans les scénarios de changement climatique ?

Pour cette recherche, 4 scénarios contrastés ont été calculés afin de tester la sensibilité du modèle :

- scénario 1 : pas de changement par rapport au climat actuel
- scénario 2 : augmentation de température uniquement : 2°C
- scénario 3 : augmentation de la pluviométrie uniquement : 15%
- scénario 4 : couplage des scénarios 2 et 3

Le résultat de ces simulations est donné en termes d'épaisseur de neige, de sol gelé et de percolation, en fonction de l'altitude (fig 11).

Il est intéressant d'observer que dans les scénarios avec augmentation de température (no 2 et 4), les comportements s'inversent avec l'altitude. A moyenne altitude, l'épaisseur de neige est moins importante que maintenant en raison du réchauffement. Mais en même temps, cette absence de neige devrait induire un gel plus important du sol malgré la croissance de la température. A haute altitude, le réchauffement ne serait pas suffisant pour réduire l'épaisseur du manteau neigeux. Les pergélisols devraient continuer à disparaître comme on l'observe déjà maintenant.

En résumé, ces simulations montreraient que le réchauffement ne conduirait pas à une diminution de la profondeur de gel à moyenne altitude mais bien au contraire à son renforcement. Nous avons vu plus haut que cette situation était la plus délicate au point de vue des coulées et autres phénomène superficiel subit. Or, c'est à ces altitudes-là que se trouvent une bonne partie des routes de montage.

Cette conclusion paradoxale montre combien le système température – neige – gel est subtil au point de vue des interactions entre ses composantes. Les scientifiques ont encore de la peine à dégager des tendances claires et incontestables. Cela montre aussi qu'il faut se méfier des conclusions intuitives souvent trop simplistes.

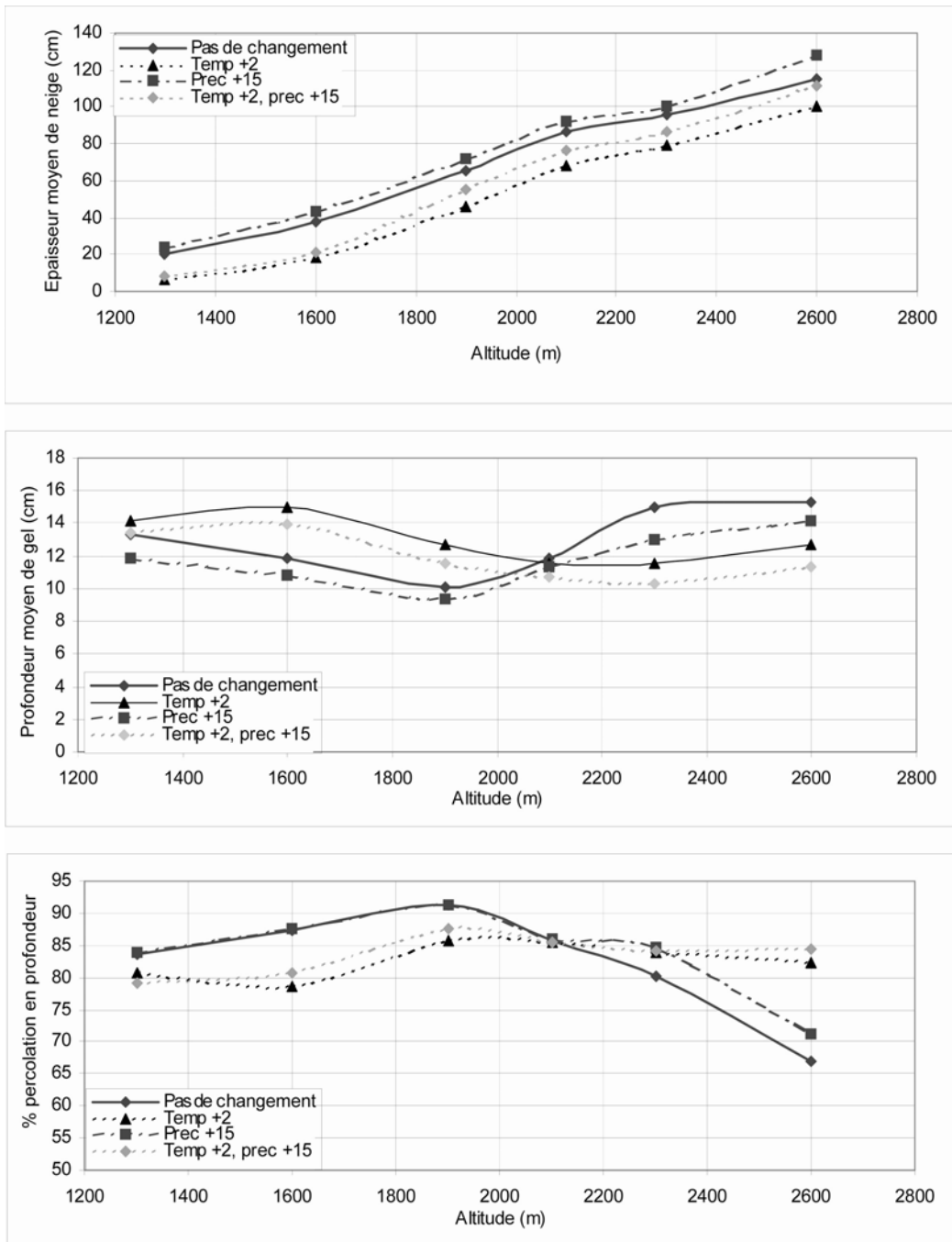


Figure 11 : Simulation de quatre scénarios climatiques à l'aide du modèle COUP (d'après [10]). Calcul de l'épaisseur moyenne du couvert neigeux, de la profondeur de gel et du flux de percolation en profondeur (d'après [1]).

Dans les hautes chaînes, on parle beaucoup de la vulnérabilité du pergélisol. En effet, à l'instar des glaciers, ces terrains subissent le changement climatique de manière sensible, bien que fortement amortis par rapport aux changements en surface [12]. Pour les analyser de plus près, il faut considérer que les pergélisols peuvent être divisés en deux catégories :

- les pergélisols de terrains meubles (notamment les glaciers rocheux)
- les pergélisols en rocher (fissures remplies de glace)

L'équilibre thermique de ces corps gelés est complexe. Les modèles purement conductifs, couramment employés, sont souvent insuffisants. En effet, ces terrains sont parfois parcourus de discontinuités dans lesquelles de l'advection thermique est apportée, soit par des eaux souterraines, soit par de l'air. Les pronostics sur la vitesse de disparition des pergélisols sont donc difficiles.

6. INFLUENCE SUR LES PHÉNOMÈNES QUI MENACENT LA ROUTE

Les phénomènes qui génèrent un risque pour la route appartiennent au cortège des dangers liés au relief :

- Avalanches (notamment le problème des rideaux de rétention fondés dans le pergélisol)
- Eboulements
- Glissements de terrain
- Coulées
- Erosion des talwegs
- Laves torrentielles
- Inondations

Comment le régime des eaux va-t-il agir sur l'intensité du danger et par conséquent du risque ?

Le changement climatique semble impliquer des perturbations hydrologiques qui vont agir sur l'eau en tant qu'un des principaux moteurs de l'instabilité. Au-delà du scénario climatique décrit plus haut, le régime hydrologique des cours d'eau devrait se trouver passablement modifié et ceci selon les tendances suivantes :

Cas des bassins à régime nivo-pluvial

Ceux-ci devraient passer à un régime plus nettement pluvial. Cela implique que l'écoulement des eaux sera plus continu dans les rivières tout au long de l'hiver et que la crue de printemps sera plus modeste. Les étiages d'été en seront plus rudes puisqu'ils ne se grefferont plus sur la courbe de décrue du printemps. La régularisation des débits devrait induire des effets sur l'érosion torrentielle plutôt positifs.

Cas des bassins à régime nivo-glaciaire

Ce genre de bassin va évoluer vers un régime nival en raison de la disparition progressive de la plupart des petits et moyens appareils glaciaires. En conséquence, les hautes eaux estivales avanceront dans l'année pour donner des crues de printemps. Donc, dans ce cas, il faut s'attendre à un effet négatif sur l'érosion puisque la part d'eau s'écoulant maintenant durant l'été sera amenée en coïncidence avec les fortes précipitations du printemps.

Ces changements du régime moyen des cours d'eau ne sont pas suffisants pour évaluer l'effet sur l'érosion. Le changement climatique semble amener une modification de la fréquence des événements pluviométriques extrêmes. Le cas de Gondo (voir chapitre 3.2) semble bien l'indiquer. Si cette hypothèse se confirme, elle aura une incidence déterminante sur l'érosion des berges. Celle-ci activera par voie

de conséquence la déstabilisation des versants, donc l'environnement direct de la route en montagne.

Cette déstabilisation des versants issue de l'érosion du pied des pentes devrait se conjuguer avec l'augmentation des teneurs en eau interstitielle des terrains de couverture et leur diminution de leur résistance au cisaillement, leur modification de comportement par le passage de mouvements lents à des mouvements plus brutaux par mise en liquéfaction. Les pentes rocheuses verront également leur stabilité réduite par la mise en charge des fissures. Dans les zones à pergélisol, tant en terrain meuble qu'en rocher, cette instabilité sera encore accentuée. Globalement, l'on constate que ce sont les facteurs déstabilisants qui devraient nettement l'emporter. C'est donc à ces nouvelles conditions que l'ingénieur doit se préparer en concevant et en dimensionnant ses ouvrages routiers.

Notons toutefois que tous ces phénomènes sont des phénomènes ordinaires d'érosion des chaînes de montagnes. Le réchauffement climatique ne crée pas de nouveau phénomène géodynamique. Il change la relation intensité – fréquence et par conséquent le degré d'exposition à ces phénomènes. Il fait que des zones qui n'étaient pas le théâtre de certains phénomènes le deviennent, comme ils l'ont été certainement à plusieurs reprises depuis le dernier retrait des glaciers du Quaternaire. La route n'échappe pas à ce principe.

7. COMMENT L'INGÉNIEUR ROUTIER PEUT-IL TENIR COMPTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

Lorsque l'ingénieur reçoit certaines informations sur l'effet du changement climatique, on peut concevoir qu'il en ressente une certaine déstabilisation. Dans le fond, cette réaction est salutaire par le simple fait que cela l'oblige à se remettre en question, à accroître sa modestie intellectuelle face à ce qui se passe dans le contexte de ses œuvres. Ceci dit, si l'on veut apporter une réponse concrète à ce nouveau défi, cela implique de ne pas céder à la panique et de garder « la tête froide ».

L'ingénieur doit maintenant s'adapter à ces nouvelles conditions qui ne remettent pas en cause tout ce qu'il a appris, toute son expérience. Les mécanismes qui contrôlent la durabilité de ce qu'il construit demeurent. Ce sont les conditions aux limites qui changent. Il n'y a pas de nouveaux phénomènes hydrologiques et géologiques mais les endroits où ils peuvent se produire changent ainsi que la relation intensité – probabilité telle qu'elle a été établie dans le passé.

A ce stade, vu les incertitudes et la complexité du système « route en interaction avec son environnement », on est en mesure de proposer quelques règles fondamentales qui devraient être introduites dans le processus de création et d'entretien des routes.

Phase de conception

- considérer la route dans un contexte plus large. La route est bien un ouvrage linéaire mais dans un contexte tridimensionnel, 4D si on ajoute l'évolution temporelle.
- procéder à des reconnaissances préalables sur les risques géologiques et hydrologiques
- mettre l'accent sur les risques en cascade
- faire preuve de plus de prudence dans le choix du tracé pour l'adapter au contexte géologique et hydrologique, donc travail multidisciplinaire (ingénieur – géologue – hydrologue – nivologue – glaciologue)
- augmenter les facteurs de sécurité des ouvrages en testant leur stabilité dans plusieurs scénarios possibles qui peuvent être défavorables.

Maintenance

- mettre en place un réseau d'observation local (météorologique, hydrologique et géologique) avec facteurs d'alerte dans les zones à risque
- traiter ces données, déterminer des tendances d'évolution effective, si nécessaire renforcer la sécurité des ouvrages et de leur environnement
- mettre une attention particulière dans le contrôle de l'état de fonctionnement des ouvrages de drainage.

Il faudra aussi observer comment le climat évolue effectivement et introduire une adaptabilité des ouvrages dès leur conception, la possibilité de les transformer aux conditions réelles à moindre coût. Sur le plan pratique, le rapport de Catherine Drouault, établi dans le cadre du comité 4.5 de l'AIPCR, est un excellent exemple des mesures techniques à prendre en compte pour intégrer l'effet du changement climatique en matière routière.

CONCLUSION

La société en général et l'ingénieur en particulier ont le know how pour s'adapter à ces nouvelles conditions climatiques mais ce n'est plus une seule personne ou discipline qui le possède. Demain encore plus qu'aujourd'hui, la phase de conception générale des infrastructures, par leur intégration dans un environnement spatio-temporel, nécessitera la prise en compte d'une somme de facteurs liés à la complexité du territoire. La route aura cessé d'être un ouvrage linéaire pour devenir un élément d'un système tridimensionnel. Une fois passée la phase de perte de confiance, l'ingénieur civil en trouvera sa mission enrichie, par le fait qu'elle sera beaucoup plus proche des préoccupations fondamentales de la société. Cela contribuera aussi à faire changer son image péjorative de bétonneur qu'il a trop souvent. C'est donc une chance à ne pas manquer.

BIBLIOGRAPHIE

1. Bayard D., 2003, The effect of seasonal soil frost on the alpine groundwater recharge including climate change aspects. Thèse EPFL N° 2709.
2. Beniston M., Diaz H.F., 2004, The 2003 heat wave as an example of summers in a greenhouse climate? Observations and climate model simulations for Basel, Switzerland. *Global and Planetary Change*, 44, 73–81.
3. Beniston M., 2005, Mountain Climates and Climatic Change: An Overview of Processes Focusing on the European Alps, *Pure appl. geophys.* 162 1587–1606 0033 – 4553/05/091587–20 DOI 10.1007/s00024-005-2684-9
4. Begert M., et al., 2005, Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. *Int. J. Climatol.*, 25, 65-80.
5. Frei C., 2004, Die Klimazukunft der Schweiz – Eine probabilistische Projektion, Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich ().
6. Harris C.; Haeberli W., Vonder Mühll D. and King L., 2001, Permafrost Monitoring in the High Mountains of Europe: the PACE Project in its Global Context, *Permafrost Periglac. Process.* 12: 3–11 (2001) DOI: 10.1002/ppp 377
7. IPCC, 2001. *Climate Change. The IPCC Third Assessment Report. Volumes I (Science), II (Impacts and Adaptation) and III (Mitigation Strategies).* Cambridge Univ. Press, Cambridge.
8. IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The physical science basis. Working Group I, Fourth Assessment Report*
9. IPCC, 2007. *Climate Change 2007. Working Group II, Fourth Assessment Report: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability*
10. Jansson, P.-E., Gustafsson D., G. Alvenäs, and L. Lewan, 2002, Soil evaporation, snow and radiation processes. P.-E. Jansson and L. Karlberg (eds.), *Coupled Heat and Mass Transfer Model for Soil-Plant-Atmosphere Systems*, Royal Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Stockholm, 145-185.
11. MétéoSuisse et PLANAT, Janvier 2007, *Changement climatique et catastrophes naturelles en Suisse, Fiche documentaire sur les faits actuels.*
12. Noetzli J., Gruber S., Kohl T., Salzmann N. and Haeberli W., 2007(submitted), Three-dimensional distribution and evolution of permafrost temperatures in idealized high-mountain topography. *Journal of Geophysical Research.*
13. OcCC, *Evénements extrêmes et changements climatiques.* Bern 2003
14. OcCC, *Rapport Annuel 2005.* Bern 2005
15. OcCC, *Klimaänderung und die Schweiz 2050, Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft,* Bern, März 2007.
16. Parriaux A., 2006, *Géologie : Bases pour l'ingénieur.* PPUR Lausanne, ISBN 2-88074-555-1.
17. Stähli M., Bayard D., Wydler H., Flühler H., 2004, Snowmelt Infiltration into Alpine Soils Visualized by Dye Tracer Technique. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*; 36(1), pp. 128-135.