HAL
open science

Impact du changement climatique sur la stabilité des versants

Auxane Cherkaoui, Marwan Al Heib

To cite this version:

Auxane Cherkaoui, Marwan Al Heib. Impact du changement climatique sur la stabilité des versants. 7. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur (JNGG 2014) "Observer, modéliser, décider", Jul 2014, Beauvais, France. ineris-01863825

HAL Id: ineris-01863825

https://ineris.hal.science/ineris-01863825

Submitted on 29 Aug 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA STABILITE DES VERSANTS

IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE SLOPE STABILITY

Auxane CHERKAOUI[1], Marwan AL HEIB [1]

1 INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des RISques), Parc technologique Alata, 60 550 Verneuil-en-Halatte, France. Contact : auxane.cherkaoui@ineris.fr

RÉSUMÉ — Les versants naturels font partie intégrante du paysage français. Plusieurs facteurs influent sur leur stabilité comme leur environnement extérieur et particulièrement les paramètres climatiques. L'objet de cette contribution est de discuter de l'impact du changement climatique sur la stabilité des versants naturels et plus particulièrement comment le changement climatique impacte les mécanismes de glissement dans des massifs de sols ou de roches. La stabilité d'un versant est caractérisée par son coefficient de sécurité qui dépend principalement de caractéristiques géotechniques de la surface potentielle de glissement (frottement, cohésion, etc.). Ces facteurs sont très dépendants des paramètres climatiques. Dans le contexte du changement climatique, les températures et les précipitations subissent des variations non négligeables perturbant le cycle climatique normal et donc la stabilité des versants. Des outils ont été développés pour évaluer l'impact direct du changement climatique via les facteurs climatiques (températures, précipitations, etc.) et l'impact indirect via l'environnement (végétation ; etc.) sur la stabilité des versants, notamment l'évolution de la fréquence et de l'intensité des aléas liés aux versants instables. Différents auteurs citent de nombreuses modélisations numériques et statistiques qui donnent les tendances globales d'évolution des aléas même si les limites d'application de ces méthodes restent contraignantes. La synthèse des publications disponibles montre qu'en milieu montagnard, l'intensité de l'aléa glissement superficiel et la fréquence de l'aléa chutes de blocs seront augmentées à cause de la dégradation du pergélisol, du retrait glaciaire et des changements dans les cycles de gel/dégel, causés principalement par l'augmentation de la température. L'augmentation des précipitations intenses et prolongées saturant les sols et produisant des pressions interstitielles transitoires élevées, tout comme la perte de la végétation, favorisa la survenue des glissements de terrain sur de nombreux sites naturels. Enfin, un changement dans les régimes de précipitations risque de réactiver d'anciens glissements profonds plutôt que d'en activer de nouveaux.

ABSTRACT — Natural slopes are part of the French landscape. Several factors influence their stability as their external environment and especially climate parameters. The purpose of this study is to discuss the impact of climate change on

the stability of natural slopes. The stability of a slope is characterized by its safety factor which depends mainly on the geotechnical characteristics of the potential sliding surface (friction, cohesion, etc.). These geotechnical characteristics are highly dependent on climatic parameters. In the context of climate change, temperatures and precipitation undergo significant changes disrupting normal climate cycle and thus the stability of slopes. Tools have been developed to assess the direct impact of climate change via climatic parameters (temperature, precipitation, etc.) and indirect impact via the environment context (vegetation, etc.) on the stability of slopes, especially the changes in the frequency and intensity of hazards associated with unstable slopes. Authors mention many numerical and statistical models that provide overall trends in hazards even if the limits of application of these methods remain binding. The analyzes carried out show that in the mountain environment, the intensity of superficial slip hazard and the frequency of rockfall hazard will be increased because of permafrost degradation, glacial retreat and changes in the freeze / thaw, mainly caused by the increase in temperature. The increase in intense and prolonged rainfall saturating the soil and producing high transient pore pressure as the loss of vegetation favored the occurrence of landslides on several natural sites. Finally, a change in precipitation patterns may reactivate old deep landslides rather than activating new.

1. Introduction

Que ce soit les rivages côtiers, les falaises en milieu montagnard ou encore les larges vallées, ils présentent tous une morphologie de type versant. Malgré les différences qui caractérisent ces milieux, ils possèdent tous des versants naturels potentiellement instables en raison de la combinaison de deux facteurs : leurs caractéristiques propres et leur environnement extérieur. Les premiers sont particuliers au site, permanents et difficilement généralisables. Les facteurs extérieurs, en revanche, peuvent être fortement modifiés, particulièrement s'il s'agit de paramètres climatiques tels que la température et les précipitations.

Dans le contexte du changement climatique, l'évolution des températures et des précipitations a été analysée par le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernementaux sur l'évolution du Climat) dans le but de déterminer des scénarios d'évolution du climat jusqu'en 2100. Le GIEC attribue ce changement climatique à l'accumulation, dans l'atmosphère, des gaz à effet de serre (le principal mesuré étant le gaz carbonique) produits par le développement des activités humaines. Le taux d'augmentation des gaz à effet de serre a permis aux experts de bâtir différentes simulations sur l'évolution des principaux paramètres impactés par le changement climatique à l'échelle mondiale, à savoir (GIEC, 2007) :

- l'élévation des températures dont la valeur moyenne est estimée à +0,74 °C sur le siècle passé (période 1906-2005). Les différentes simulations réalisées fournissent une gamme d'augmentation de température pour le siècle à venir variant de +1,1 °C (limitation optimale de l'émission des gaz à effet de serre) à +6,4°C (poursuite d'une augmentation rapide des émissions), ce qui correspond à des froids extrêmes l'hiver

et un réchauffement de 5 à 8°C l'été (Bärring et Persson, 2006). Ainsi, on constate une augmentation de la température plus importante au niveau des terres et dans les latitudes les plus élevées de l'hémisphère Nord pendant l'hiver, ainsi qu'une élévation de la température plus importante dans les régions arides que dans les régions humides avec des vagues de chaleur plus intenses, longues et fréquentes (Bastone et De la Torre, 2011) ;

- la fonte des neiges et des glaces du fait de l'augmentation des températures. Par exemple, dans l'océan Arctique, l'étendue annuelle des glaces a diminué de 2,7% par décennie depuis 1978 (Didier et al., 2010) ;
- l'élévation du niveau des océans (+1,8 mm/an en moyenne depuis 1961 et +3,1 mm/an en moyenne depuis 1993) due à l'expansion thermique des océans sous l'effet du réchauffement et à la fonte des glaciers de montagne et des glaces polaires. Selon les projections des modèles climatiques, la hausse du niveau de la mer va se poursuivre pour atteindre 20 à 60 cm à la fin du siècle, soit une augmentation annuelle d'environ 4 ± 2 mm (Didier et al., 2010) ;
- la modification du régime des précipitations. Les experts prévoient une augmentation des précipitations aux hautes latitudes et une diminution aux basses latitudes (Bärring et Persson, 2006).

En partant de ces scénarios, l'objectif de ce travail est de caractériser l'impact attendu du changement climatique sur la stabilité des versants naturels. L'influence des paramètres climatiques sur les critères de stabilité de certains versants naturels est décrite pour déterminer l'évolution de l'intensité et de la fréquence de chaque aléa lié au talus et au versant naturel en fonction du changement climatique.

2. Stabilité des versants naturels

2.1. Paramètres influençant l'aléa

L'aléa correspond à la probabilité qu'un phénomène donné se produise, au cours d'une période de référence, en atteignant une intensité qualifiable ou quantifiable. La caractérisation d'un aléa repose donc sur le croisement de l'intensité prévisible du phénomène avec sa probabilité d'occurrence (ou prédisposition).

Les paramètres principaux influençant l'aléa mouvement de terrain sont la géologie, la morphologie, le couvert végétal, l'eau et les sollicitations cycliques (vent, chocs thermiques, séismes) qui sur plusieurs années provoquent une «fatigue» du matériau et favorisent une baisse de sa résistance (Bastone et De la Torre, 2011).

2.2. Impact des paramètres climatiques et environnementaux sur le coefficient de sécurité

Pour visualiser les effets des changements environnementaux sur la stabilité d'une pente, un des préalables est de connaître le mécanisme et les facteurs qui contrôlent la stabilité des pentes. Habituellement, le coefficient de sécurité (F) est utilisé pour déterminer la stabilité d'une pente, correspondant au rapport des forces de résistance par rapport aux forces de glissement. Il peut être calculé, en l'absence de

la cohésion, par la formule suivante (Bo et al., 2008) :

$$F = \frac{\tan \Phi'}{\tan i} \qquad (1)$$

où i est l'angle d'inclinaison (à partir de l'horizontale) et Φ' est l'angle de frottement drainé de la surface du glissement. Cette formule simplifiée est uniquement valable pour la rupture plane d'une pente infinie sans eau dans des sols. Si F est supérieur à 1 la stabilité est garantie mais s'il est inférieur à 1, il y a théoriquement rupture. Généralement, une marge de sécurité est ajoutée selon le cas considéré, permettant de considérer une stabilité avérée pour un coefficient de sécurité de 1,5.
En présence d'écoulement d'eau et lorsque des forces d'infiltration sont impliquées plus en profondeur sous la pente, F est exprimé pour un sol saturé à infiltration parallèle à la pente (Bo et al., 2008) :

$$F = A \frac{\tan \Phi'}{\tan i} \qquad (2)$$

où A est compris entre 0 et 1 en fonction de γb le poids volumique du sol immergé, de γsat le poids volumique du sol saturé, de Ru et du ratio de la pente, où Ru est le ratio de la pression interstitielle (Ru = u / (γ*z), avec u la pression interstitielle, γ est le poids volumique apparent du sol et z la profondeur de la surface de glissement par rapport au terrain naturel).
Ces équations, cependant, ne sont valables que pour des matériaux sans cohésion. En réalité, le sol naturel présente une cohésion apparente (sauf éventuellement dans le cas de glissements anciens). Celle-ci est généralement causée par la cimentation.
Pour une pente formée par un sol cohérent, F augmente en raison de la cohésion (Bo et al., 2008) :

$$F = \frac{\tan \Phi'}{\tan i} + B\,(c'/\gamma\, H) \qquad (3)$$

où B est un paramètre compris entre 1 et 6 en fonction de la pente, c' est la cohésion apparente, γ est le poids volumique apparent du sol et H est l'épaisseur de la masse en mouvement. Toutefois, à long terme, avec l'augmentation de la saturation, les effets de succion diminuent et la cohésion apparente diminue. Ainsi de nombreux sols perdent leur cohésion et l'équation (3) redevient l'équation (1).
Une cohésion apparente peut également résulter de la succion du sol. Cette dernière s'applique à un sol non saturé, et varie en fonction de son degré de saturation et de l'amplitude de la succion. La succion du sol fournit donc une résistance supplémentaire, ce qui explique pourquoi les pentes naturelles semblent stables même lorsque F calculé, sans succion du sol, est inférieure à un. Cependant, cette force supplémentaire est perdue lorsque le sol se sature, par exemple, lors de fortes pluies (bien souvent les variations du niveau piézométrique gouvernent la cinématique des grands glissements). Lorsque la succion du sol intervient du fait d'une désaturation du sol, F augmente selon l'équation ci-dessous (Bo et al., 2008) :

$$F = \frac{\tan i}{\tan \Phi'} + B\,(c/\gamma\, H) \qquad (4)$$

où c est la cohésion totale, qui comprend deux composantes, la cohésion apparente c' et le paramètre de succion matricielle (ua-uw) tanΦb. Dans ce cas, ua est la pression d'air des pores, uw est la pression de l'eau interstitielle et Φb est l'angle de frottement par rapport aux changements de succion matricielle. Toutefois, lorsque la saturation du sol se produit, la succion matricielle disparaît et l'équation de F remonte à l'équation (1) ou (3).
Lorsque les pentes naturelles du sol ont un couvert végétal, les racines servent de renfort et F augmente de nouveau (Bo et al., 2008).

$$F = \frac{\tan i}{\tan \Phi'} + B\,(c_1/\gamma\, H) \qquad (5)$$

où c1 est la force de cohésion du sol et du renforcement racinaire. La cohésion du sol dans la zone racinaire est généralement inexistante en raison des effets de vieillissement des racines. La cohésion restant à la suite de renfort de la racine peut être perdue si la végétation est modifiée ou disparaît.
Ainsi, le coefficient de sécurité d'un talus constitué d'un sol meuble dépend principalement des paramètres suivants :

- angle de la pente ;
- caractéristiques du matériau (angle de frottement, cohésion, poids volumique,...) ;
- eau (saturation, cohésion, nappe souterraine, succion, pression interstitielle) ;
- couvert végétal ;
- sollicitations extérieures…

3. Impacts des paramètres climatiques sur la stabilité des versants naturels

3.1. Impact des précipitations

Un des effets de l'augmentation des précipitations va être une augmentation du niveau des nappes phréatiques. Cela conduira à une réduction de la résistance au cisaillement du sol et une augmentation des forces et des vitesses d'infiltration. Une augmentation du gradient hydraulique associé à une augmentation de la vitesse d'infiltration pourrait réduire considérablement les facteurs de sécurité. Une augmentation des forces de percolation pourrait également avoir une incidence sur l'érosion hydraulique interne du sol (Bo et al., 2008). En outre, une augmentation de l'infiltration remplirait les vides d'air dans les sols avec de l'eau, et la force significative obtenue à partir de la succion du sol serait perdue.
L'augmentation des précipitations entraînera également un excédent d'eau dans les bassins versants causant l'augmentation des débits dans les cours d'eau et des inondations extrêmes (Didier et al., 2010). Cela pourrait provoquer l'érosion du pied des pentes naturelles dans les plaines inondables ou en bordure de cours d'eau (Bo et al., 2008). Ce processus peut déclencher un glissement de terrain dû à la réduction de la résistance (perte de butée) en pied de falaise.

L'érosion de surface peut également se produire par enlèvement de la végétation et augmentation de l'infiltration des eaux de ruissellement.

3.2. Impact des températures

Les changements de température peuvent affecter la stabilité d'une pente sous au moins trois aspects.
Tout d'abord, les changements de température peuvent provoquer des changements dans le couvert végétal (changement du type de végétation ou disparition de la végétation existante). Ces effets entraînent les mêmes conséquences que ceux décrits ci-dessus en raison de changements dans les précipitations (Rathnaweera et al., 2012 ; Bo et al., 2008).
Deuxièmement, la température affecte également les eaux souterraines. Comme la conductivité hydraulique du sol est fonction de la viscosité d'un fluide, la vitesse d'infiltration pourrait augmenter en raison d'une élévation de température. En outre, la masse d'eau souterraine subirait une dilatation thermique. Cette expansion thermique pourrait conduire à une élévation du niveau des eaux souterraines. Par conséquent, une augmentation significative de la température réduira la stabilité de la pente naturelle (Rathnaweera et al., 2012 ; Bo et al., 2008).
Troisièmement, l'augmentation de la température peut dessécher le sol. Alors que dans certains cas, une teneur en humidité plus faible augmentera les paramètres de résistance du sol, elle peut au contraire entraîner des pertes de cohésion du sol, par exemple en raison de la fissuration d'un dépôt d'argile (Gunzburger et al., 2004). Ces fissures accélèrent également l'infiltration avec une diminution du facteur de sécurité associé (Rathnaweera et al., 2012 ; Bo et al., 2008).
En milieu montagnard, concernant la température de gel, une hausse ou une baisse de la température en hiver peut soit augmenter, soit diminuer le nombre de cycles de gel-dégel par an (Saad, 2012). En effet, dans une zone où les températures restent négatives longtemps en hiver, le décalage vers le haut de la valeur de la température peut entrainer l'apparition de cycles de gel-dégel. A l'inverse, pour une zone qui présente des cycles de gel-dégel avec des températures de gel négatives de quelques degrés, une hausse de la température pourrait entraîner un passage de la température du négatif au positif et donc faire disparaître les cycles de gel-dégel en question.

3.3. Impact de la végétation

La végétation influe de manière significative sur la stabilité des pentes naturelles (Bo et al., 2008). Elle a généralement des effets plus positifs (force de renfort des racines pour le sol superficiel, succion du sol maintenue par les racines qui absorbent l'eau, le feuillage intercepte les précipitations réduisant l'infiltration d'eau, les racines permettent la cohésion des particules du sol réduisant l'érosion) que négatifs (les arbres massifs exposés au vent transfèrent les forces du vent au sol par leur racines déstabilisant le sol, le poids des arbres sur une pente raide a le même effet).

La perte de la végétation augmente le risque d'instabilité d'une pente naturelle. Les changements dans le type de végétation dus à une augmentation des précipitations, par exemple le passage de petits arbres à des arbres de grande hauteur, peuvent également nuire à la stabilité à cause de l'augmentation du poids et de l'effet du vent.

4. Quantification des impacts : fréquence et intensité de l'aléa

4.1. Glissements de terrain superficiels

4.1.1. Evolution de l'intensité face au changement climatique

Beaucoup d'hypothèses ont été faites mais aucune n'a été confirmée (Prudent, 2008). Le seul milieu qui a permis de tirer des conclusions est le milieu montagnard où les observations ont montré que la dégradation du pergélisol et le retrait glaciaire, dus au changement climatique, augmenteront l'intensité des glissements superficiels (augmentation des volumes de matériaux mobilisables).

4.1.2. Evolution de la fréquence face au changement climatique

Il est clairement établi que l'augmentation des précipitations intenses et prolongées saturant les sols et produisant des pressions interstitielles transitoires élevées favorise la survenue des glissements de terrain, tout autre paramètre restant constant (Huggel et al., 2012, Rathnaweera et al., 2012). Les experts chercheurs prévoient aussi une multiplication des glissements superficiels à cause de la multiplication des feux de forêts qui déstabilisent les couches superficielles du sol et d'une augmentation des précipitations à certaines périodes de l'année.

4.2. Glissements de terrain profonds

4.2.1. Evolution de l'intensité face au changement climatique

Du fait de la forte dépendance des glissements profonds aux caractéristiques propres au site, il est difficile de prévoir une évolution de l'intensité. Cependant, il semble que l'intensité des glissements profonds soit plus importante avec l'augmentation des précipitations (Prudent, 2008) et aussi en milieu montagnard avec la dégradation du pergélisol et le retrait glaciaire.

4.2.2. Evolution de la fréquence face au changement climatique

De même que pour l'intensité, la survenue des glissements profonds serait plus régulière qu'auparavant du fait de l'augmentation des précipitations intenses (Prudent, 2008, Rathnaweera et al., 2012). Collison et al. (2000) émettent cependant un autre avis. A partir d'une augmentation des précipitations annuelles moyennes et d'une augmentation de la température, ils projettent une élévation des taux d'évapotranspiration et donc une intensification du cycle hydrologique. A partir de ces hypothèses, les résultats de leur modélisation suggèrent que le changement climatique n'est pas susceptible d'avoir des conséquences dramatiques sur la

fréquence des grands glissements de terrain, mais de petits changements dans la distribution des profondeurs de la nappe phréatique pouvant diminuer considérablement les périodes d'instabilité à petite échelle.
Suite à de nouvelles conditions climatiques dans certaines zones et particulièrement à un changement des régimes de précipitations, il est plus probable d'assister à une réactivation d'anciens glissements profonds plutôt qu'à une activation de nouveaux glissements profonds. Dixon et Brook (2007) ont étudié l'impact du changement climatique sur la réactivation de glissements de terrain au Royaume-Uni par modélisation statistique probabiliste. Ils concluent notamment que les périodes de retour de ces glissements pourraient diminuer. Cependant, les variations de température prédites pourraient influencer la réponse du glissement de terrain par évapotranspiration accrue conduisant à une modification de seuils de déclenchement causée par l'augmentation des précipitations. En effet, il est probable que des températures plus élevées auront tendance à augmenter la stabilité (augmentation des périodes de retour pour les mouvements) en raison de l'évapotranspiration élevée et donc de la réduction des pluies efficaces.

5. Eboulements et chutes de blocs

5.1. Evolution de l'intensité face au changement climatique

En milieu montagnard, il a été démontré, à l'aide de modèles numériques, que les variations de la température de surface augmentent le déplacement des blocs du massif rocheux fracturé (Gunzburger et al., 2004). Cependant, aucune mesure in-situ n'a quantifié cet impact, même si de nombreux instituts travaillent sur le sujet tels que le laboratoire EDYTEM (Environnements, DYnamiques et TErritoires de la Montagne).

5.2. Evolution de la fréquence face au changement climatique

La fréquence des chutes de blocs s'intensifie avec l'augmentation de la température. Cela serait dû, selon les hypothèses avancées, au changement dans les cycles de gel et dégel et à la détérioration du pergélisol pour les hautes altitudes. Aucune autre interaction avec un paramètre climatique n'a été prouvée. Ainsi, toute corrélation directe avec la température semble difficile parce qu'elle ne tient pas compte de la situation microclimatique spécifique pour chacun des événements et des sites.

6. Laves torrentielles

6.1. Evolution de l'intensité face au changement climatique

Un nombre important d'hypothèses propose une augmentation de l'intensité dans un contexte de changement climatique mais aucune tendance n'a été modélisée. La disponibilité en matériaux (sédiments) est le facteur critique qui pourrait induire un changement futur local de l'intensité des laves torrentielles, avec des volumes et des distances d'arrêt plus importants (ONERC, 2008 ; Huggel et al., 2012). En particulier,

les risques liés au domaine périglaciaire pourraient potentiellement connaître une augmentation de l'intensité des événements. Les espaces de haute montagne pourraient donc être plus propices aux laves torrentielles que par le passé car les zones de retrait glaciaire et de dégradation du pergélisol sont supposées fournir de nouveaux volumes importants de matériaux mobilisables (ONERC, 2008 ; Huggel et al., 2012).

6.2. Evolution de la fréquence face au changement climatique

Sans considérer les caractéristiques locales du site, les simulations s'accordent sur une diminution du nombre de laves torrentielles pour un climat plus chaud (ONERC, 2008) et une augmentation dans les zones où des précipitations intenses et importantes augmenteront (Huggel et al., 2012).

7. Conclusion et perspectives

Il est vrai que les effets potentiels du changement climatique sur les versants naturels sont difficiles à évaluer précisément mais ce travail a montré qu'il est possible de dégager des tendances qui seront affinées dans les travaux futurs.
Le changement climatique se traduit par une augmentation des températures, des précipitations ainsi que des phénomènes extrêmes (sécheresse, inondation, etc.). La température et les précipitations ont un impact non négligeable sur le poids volumique, l'angle de frottement et la cohésion au niveau de la surface potentielle de glissement. La stabilité d'un versant, caractérisée notamment par son facteur de sécurité, va globalement diminuer avec l'augmentation des précipitations et des températures même si la multitude des mécanismes engagés a parfois des effets contradictoires.
Concernant l'aléa glissement superficiel, l'intensité sera augmentée en milieu montagnard où la dégradation du pergélisol et le retrait glaciaire (causés principalement par l'augmentation de la température) augmentent les volumes de matériaux mobilisables. L'augmentation des précipitations intenses et prolongées saturant les sols en produisant des pressions interstitielles transitoires élevées favoriseront la survenue des glissements de terrain sur la majorité des sites naturels.
Concernant l'aléa glissement profond, certains auteurs sont en faveur d'une augmentation en intensité et en fréquence en parallèle avec l'augmentation des précipitations intenses alors que d'autres pensent que l'effet sera limité voire inexistant. La réactivation d'anciens glissements profonds plutôt que l'activation de nouveaux glissements profonds semble avérée.
Concernant l'aléa chutes de blocs et éboulements, il semble que la fréquence s'intensifie avec l'élévation de la température. Là encore, cela serait dû au changement dans les cycles de gel et dégel et à la détérioration du pergélisol pour les hautes altitudes. L'intensité ne semble pas être impactée.
Concernant l'aléa lave torrentielle, l'intensité pourrait augmenter car la disponibilité du matériau (sédiments) deviendrait plus importante particulièrement dans les zones de retrait glaciaire et de dégradation du pergélisol. Les simulations s'accordent sur

une diminution du nombre de laves torrentielles pour un climat plus chaud et une augmentation dans les zones où des précipitations intenses et importantes augmenteront.

Ces conclusions sont majoritairement basées sur des modélisations numériques ou statistiques. L'influence d'un paramètre variant seul est relativement bien évaluée. Cependant, il est encore difficile de modéliser un ensemble de paramètres climatiques évoluant de manière indépendante et ayant des impacts contradictoires.

Pour palier cette limite intrinsèque de la modélisation, il faudra améliorer dans l'avenir les outils de prévision en exploitant davantage les observations et les mesures de terrain, qui pourront servir de données d'entrée à la modélisation.

Références bibliographiques

Bärring, L. & Persson, G. 2006. Influence of climate change on natural hazards in Europe. Geological Survey of Finland, Special Paper 42, 93–107, 4 figures, 2 tables, 1 map.

Bastone V., De la Torre Y., 2011.Etude préliminaire de l'impact du changement climatique sur les risques naturels à la Réunion. 135 p.

Bo, NW., Fabius M., Fabius K., 2008. Impact of global warming on stability of natural slopes. Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards. Université Laval, Québec, 594 p.

Collison A., Wade S., Griffiths J., Dehn M., 2000. Modelling the impact of predicted climate change on landslide frequency and magnitude in SE England. Engineering Geology 55 (2000) 205–218.

Didier C., Gombert P., Al Heib M., Charmoille A., 2010. Impact du changement climatique sur la stabilité des cavités souterraines. Rapport INERIS DRS-10-103862-00411A.

Dixon N., Brook E., 2007. Impact of predicted climate change on landslide reactivation: case study of Mam Tor, UK. Landslides (2007) 4:137–147 DOI 10.1007/s10346-006-0071-y. 11 pages.

GIEC (2007). "Bilan 2007 des changements climatiques." Rapport de synthèse: 114p.

Gunzburger Y., Merrien-Soukatchoff V., Guglielmi Y., 2004. Influence of daily surface temperature fluctuations on rock slope stability. Rock Mechanics & Mining Sciences 42 (2005) 331–349

Huggel C., Khabarov N., Korup O., Obersteiner M., 2012. Physical impacts of climate change on landslide occurrence and related adaptation. Manuscript for the Cambridge University Press Book.

ONERC, 2008. Changement climatiques dans les Alpes : Impacts et risques naturels. Rapport Technique N°1 de l'ONERC dans le cadre du projet ClimChAlp, Octobre 2008.

Prudent G., 2008. Impacts observés et potentiels du changement climatique sur les aléas naturels. Synthèse du projet ClimChAlp, Working Package 5 – Mouvements de terrain

Rathnaweera TD., Palihawadana MP., Rangana HLL., Nawagamuwa UP., 2012. Effects of climate change on landslide frequencies in landslide prone districts in Sri Lanka. Civil Engineering Research Exchange Symposium 2012.

Saad A., 2012. Influence du changement climatique et des conditions extrêmes sur les massifs fractures. Rôle des fluides dans leur processus d'altération. Thèse réalisée à l'IFFSTAR.